

# Proyecto Fin de Carrera

## Ingeniería de Tecnologías Industriales

### Dinámica Lateral mediante Matlab

Autor: Gonzalo Navarro Fernández  
Tutor: Johan Wideberg

**Dpto. Ingeniería y Ciencia de los Materiales y del Transporte**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2018





Proyecto Fin de Carrera  
Ingeniería en Tecnologías Industriales

## **Dinámica Lateral mediante Matlab**

Autor:  
Gonzalo Navarro Fernández

Tutor:  
Johan Wideberg  
Profesor titular

Dpto. Ingeniería y Ciencia de los Materiales y del Transporte  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2018



Proyecto Fin de Carrera: Dinámica Lateral mediante Matlab

Autor: Gonzalo Navarro Fernández  
Tutor: Johan Wideberg

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018





# Resumen

---

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo el estudio de un modelo de simulación de la dinámica lateral de un vehículo utilizando el programa MATLAB. Para ello, implementaremos diferentes test y maniobras muy utilizados en la industria automovilística en el diseño y testeo de prototipos.

En este trabajo se hará mención igualmente a las diferencias existentes en la respuesta entre los diferentes tamaños de automóviles. Además estudiaremos los resultados desde el punto de vista de dos modelos, uno linealizado para pequeños ángulos y otro modelo completo de cara a determinar las situaciones de validez de ambos desarrollos.



# Abstract

---

The objective of this paper is the study of lateral dynamics in vehicles. To do that, we will perform simulations of different test and manouvers, that are often performed in industry, using Matlab. Besides, we will test a variety of models with the purpose of seeing how the results change. This model is composed of 2 different parts, one with a lineal theory and one with a complete theory. After all the tests, it will be discussed the range of validity of both models.



# Índice

<b>Resumen</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>X</b>
<b>Índice</b> .....	<b>XII</b>
<b>Notación</b> .....	<b>XV</b>
<b>1 Introducción</b> .....	<b>2</b>
1.1 Principales formas de obtención de datos.....	3
<b>2 Fundamentos Teóricos</b> .....	<b>4</b>
<b>3 Maniobras</b> .....	<b>7</b>
3.1 Maniobras seleccionadas.....	7
3.1.1 J turn.....	7
3.1.2 Fishhook.....	8
3.1.3 Step Steering Input.....	10
3.1.4 Reducing Radius Test.....	11
3.1.5 Sine with Dwell.....	11
3.2 Otras pruebas.....	12
3.2.1 Double Lane Change Test.....	12
3.2.2 Steady State Circular Test.....	13
3.2.3 $\mu$ -Split Single Lane Change.....	14
<b>4 Vehículos a Estudio</b> .....	<b>16</b>
4.1 Estudio sobre el mercado automovilístico. Justificación de los tipos de vehículos a analizar.....	16
4.2 Descripción de los tipos de vehículo a estudiar.....	16
4.2.1 Vehículos pequeños.....	17
4.2.2 Vehículos de tamaño medio, tipo sedán.....	18
4.2.3 Vehículos deportivos.....	19
4.2.4 Furgonetas.....	20
<b>5 Análisis de los resultados obtenidos</b> .....	<b>23</b>
5.1 Situaciones de inestabilidad e inexactitud.....	23
5.2 Casos especiales.....	24
5.3 Irregularidades en los transitorios de las maniobras.....	29
<b>6 Comparación con resultados de experimentos reales</b> .....	<b>31</b>
<b>7 Comparación de los resultados con otros trabajos o modelos</b> .....	<b>33</b>
<b>8 Futuras líneas de investigación</b> .....	<b>37</b>
<b>9 Otros estudios similares</b> .....	<b>39</b>
<b>Anexo a: Cálculo de fuerzas. Fórmula mágica de Pacejka</b> .....	<b>40</b>
<b>Anexo B: Resultado completo de las simulaciones</b> .....	<b>42</b>
<b>Referencias</b> .....	<b>105</b>

<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>109</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>110</b>



# Notación

---

$A_x$	Aceleración en la dirección x
$A_y$	Aceleración en la dirección y
$b$	Distancia al eje delantero
$c$	Distancia al eje trasero
$C_\alpha$	Rigidez a la deriva
$F_f$	Fuerza en el eje delantero
$F_r$	Fuerza en el eje trasero
$I$	Inercia del sistema
$M$	Masa del cuerpo
RRT	Reducing Radius Test
SwD	Sine with Dwell
$T$	Par motor
$V_x$	Velocidad en la dirección x
$V_y$	Velocidad en la dirección y
$X$	Posición en dirección x
$Y$	Posición en dirección y
$\alpha_f$	Ángulo de deriva de la rueda delantera
$\alpha_r$	Ángulo de deriva de la rueda trasera
$\delta$	Ángulo de giro
$\Omega$	Velocidad de giro
sin	Función seno
cos	Función coseno
tg	Función tangente
arctg	Función arco tangente
$\partial y \partial x$	Derivada parcial de y respecto





# 1 Introducción

---

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo el estudio de un modelo de simulación de la dinámica lateral de un vehículo utilizando el programa MATLAB. Para ello, implementaremos diferentes test y maniobras muy utilizados en la industria automovilística en el diseño y testeo de prototipos. Estas simulaciones, son especialmente críticas en el diseño de sistemas como la suspensión o la dirección, entre otros, y por tanto las diversas situaciones que se probarán buscarán estudiar la respuesta del coche ante situaciones que bien se podrían producir durante la conducción real, tales como giros paulatinos, cambios bruscos en la dirección para esquivar obstáculos imprevistos... Además de los sistemas ya mencionados, este trabajo también puede ser utilizados como base en el diseño de otras partes o secciones del modelo, por ejemplo el ESP, que constituye una parte clave en el diseño, ya que se ha demostrado que soluciona hasta un 80% de las situaciones de peligro. En este trabajo se hará mención igualmente a las diferencias existentes en la respuesta entre los diferentes tamaños de automóviles, diferenciando entre pequeños, medianos y grandes, por ello, cada una de las maniobras se repetirá varias veces, cambiando las magnitudes geométricas para reflejar cada situación en cada tipo de vehículo y estudiar las diferencias que aparecen. Además, estudiaremos los resultados desde el punto de vista de dos modelos, uno linealizado para pequeños ángulos y otro modelo completo de cara a determinar las situaciones de validez del modelo simplificado. Para realizar la simulación nos valdremos del programa informático MATLAB, utilizado habitualmente en la industria por su capacidad de resolución matemática y de representación.

## -Objetivos

Los principales objetivos que definen este trabajo son:

- Definir una hoja de ruta para el estudio del comportamiento lateral de un automóvil.
- Comparar las diferencias en la respuesta de diversos vehículos en función de su tamaño.
- Proponer soluciones que permitan mejorar los resultados obtenidos.

## 1.1 Principales formas de obtención de datos

El principal objetivo durante la etapa de diseño de un automóvil, es comprobar que todas las partes que la integran desempeñan su función correctamente. Para llevar a cabo esta labor, suele utilizarse un proceso iterativo durante el desarrollo, basado en probar diferentes piezas o secciones, que podrían llegar a formar parte del conjunto, a través de test o pruebas que permitan obtener datos para comprobar su correcto funcionamiento. Hay varias formas de lograr esta información, en función del gasto/tiempo y la precisión que se necesite. Algunas de ellas son:

-Experimentos reales: como resulta evidente, la manera más fiable y precisa de poner a prueba el coche y recabar datos, es disponer de una pista o carretera y realizar distintas maniobras. Esta forma, que ha sido la más clásica y utilizada en el ámbito científico, es también la más cara y laboriosa, ya que implica, además de un gasto de tiempo, una inversión en infraestructuras y equipos.

-Programas analíticos de datos: esta forma de recopilación de información se contrapone sustancialmente a la anterior. En ella a partir de un programa numérico, un modelo teórico y los datos técnicos del vehículo (cuya obtención puede requerir también experimentos), se obtienen unos resultados analíticos que, siendo interpretados correctamente, proporcionan una fuente que se puede considerar fiable de obtención de datos. Es más barato que el método anterior pero también menos fiable, donde dicha fiabilidad dependerá de cada modelo y de la precisión de los datos introducidos. Este será el método utilizado en este documento.

-Programas de simulación multicuerpo: en un punto intermedio entre los dos casos anteriores, encontramos este tipo de software que permite simular, en el sentido más estricto de la palabra, el sistema de estudio, y ponerlo en diferentes situaciones para estudiar su comportamiento. Un ejemplo de este tipo de software, y quizá el más utilizado en el ámbito automovilístico es el programa ADAMS. Su precisión variará en cada caso, y su coste depende del valor de cada software en concreto.

## 2 Fundamentos Teóricos

De cara a una mejor comprensión de los modelos desarrollados en el trabajo, se pasará a realizar una breve exposición de los fundamentos teóricos en los que se basa el desarrollo matemático utilizado en este documento:

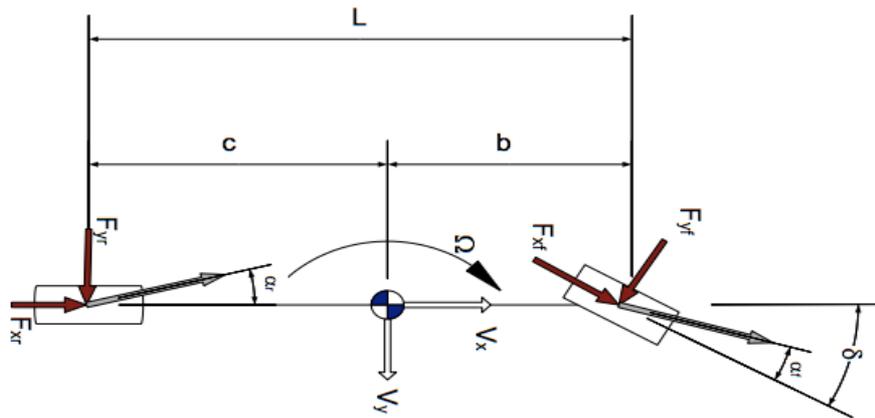


Figura 2-1. Esquema del modelo dinámico, de la referencia [9] Dinámica Lateral: Control y comportamiento direccional, de Johan Wideberg

Si tenemos que este sería un modelo aproximado de la dinámica lateral de un automóvil, donde  $F_{yf}$  y  $F_{yr}$  son las fuerzas delanteras y traseras, respectivamente, respecto al eje Y,  $F_{xf}$  y  $F_{xr}$  tienen el mismo significado respecto del eje X,  $V_x$  y  $V_y$  son las componentes de la velocidad proyectadas a cada uno de los ejes,  $\alpha_r$  y  $\alpha_f$  son los ángulos de deriva de las ruedas traseras y delanteras, respectivamente,  $\delta$  es el giro de las ruedas y  $\Omega$  la velocidad de giro, la aceleración en las componentes X e Y puede escribirse como:

$$i) \quad A_x = \frac{dv_x}{dt} - V_y * \Omega$$

$$A_y = \frac{dv_y}{dt} + V_x * \Omega$$

Y haciendo equilibrio de fuerzas y pares se obtiene:

$$M * A_x = F_{xr} + F_{xf} \cos(\delta) - F_{yf} \sin(\delta)$$

$$M \cdot A_y = F_{yr} - F_{yf} \cos(\delta) + F_{xf} \sin(\delta)$$

$$I \cdot \frac{d\Omega}{dt} = -F_{yr} \cdot c + F_{yf} \cos(\delta) \cdot b + F_{xf} \sin(\delta) \cdot b$$

A partir de aquí aplicando la ecuación constitutiva:

$$F_{yf} = C\alpha_f \cdot \alpha_f$$

$$F_{yr} = C\alpha_r \cdot \alpha_r$$

De donde  $C\alpha$  se define como rigidez a la deriva, y es la magnitud que relaciona la fuerza y el ángulo de deriva, y depende principalmente de factores como la presión de inflado, carga normal y fuerza de tracción o frenado.

Si además aplicamos las relaciones de compatibilidad:

$$\tan(\delta - \alpha_f) = \frac{b \cdot \Omega + Vy}{Vx}$$

$$\tan(\alpha_r) = \frac{c \cdot \Omega - Vy}{Vx}$$

Eliminando las fuerzas laterales y los ángulos de deriva, las ecuaciones de equilibrio quedarían:

$$M \left( \frac{dVx}{dt} - Vy \cdot \Omega \right) = F_{xr} + F_{xf} \cos(\delta) - C\alpha_f \cdot \left( \delta - \text{atan}\left(\frac{b \cdot \Omega + Vy}{Vx}\right) \right) \cdot \sin(\delta)$$

$$M \left( \frac{dVy}{dt} + Vx \cdot \Omega \right) = C\alpha_r \cdot \left( \text{atan}\left(\frac{c \cdot \Omega - Vy}{Vx}\right) \right) + F_{xf} \sin(\delta) + C\alpha_f \cdot \left( \delta - \text{atan}\left(\frac{b \cdot \Omega + Vy}{Vx}\right) \right) \cdot \cos(\delta)$$

$$I \left( \frac{d\Omega}{dt} \right) = -C\alpha_r \cdot \left( \text{atan}\left(\frac{c \cdot \Omega - Vy}{Vx}\right) \right) \cdot c + F_{xf} \sin(\delta) \cdot b + C\alpha_f \cdot \left( \delta - \text{atan}\left(\frac{b \cdot \Omega + Vy}{Vx}\right) \right) \cdot \cos(\delta) \cdot b$$

Si ahora linealizamos para ángulos pequeños y consideramos  $\frac{dVx}{dt} = \text{cte}$  las ecuaciones de equilibrio resultan:

$$M \frac{dVy}{dt} + \frac{C\alpha_f + C\alpha_r}{Vx} \cdot Vy + \left( MV_x + \frac{C\alpha_f \cdot b - C\alpha_r \cdot c}{Vx} \right) \cdot \Omega = C\alpha_f \delta$$

$$I \frac{d\Omega}{dt} + \frac{C\alpha_f \cdot b - C\alpha_r \cdot c}{Vx} \cdot Vy + \left( \frac{C\alpha_f \cdot b^2 - C\alpha_r \cdot c^2}{Vx} \right) \cdot \Omega = C\alpha_f b \delta$$

$$\frac{d\psi}{dt} = \Omega$$

Y las ecuaciones para obtener la trayectoria serían:

$$\frac{dX}{dt} = V_x \cos(\psi) - V_y \sin(\psi)$$

$$\frac{dY}{dt} = V_y \cos(\psi) + V_x \sin(\psi)$$

Con esta base teórica, y su implementación en Matlab obtendremos los valores de distintos parámetros valiéndonos de las distintas maniobras.

# 3 Maniobras

---

## 3.1 Maniobras seleccionadas

Los test que se van a implementar en este trabajo son los siguientes:

- J-turn
- Fishhook
- Reducing radius test
- Step steer input test
- Sine with dwell test

Típicamente, implementaremos estas maniobras a 80 y 100 km/h, al ser estos los valores más utilizados habitualmente, salvo en casos concretos donde no nos sea posible por, por ejemplo, inestabilidad.

### 3.1.1 J turn

Es una maniobra de evasión en la que un vehículo esquiva un obstáculo a partir de una entrada en forma de rampa. Es una maniobra utilizada habitualmente por los fabricantes de automóviles en el estudio del régimen transitorio de la dinámica lateral. Es una “open-loop manoeuvre” o maniobra de bucle abierto, acorde a su definición en la ISO 7410. Lo que hace tan habitual el uso de esta maniobra es su repetibilidad y su reproducibilidad, además de que solo es necesario un único conductor y un controlador, así como cierta instrumentación, como controladores de velocidad, aceleración y giro, o sensores de levantamiento de ruedas. Este último aparato se debe a que esta maniobra, si se cuenta con la carga necesaria, es capaz de producir el levantamiento del vehículo sobre dos ruedas.

El procedimiento para realizar esta maniobra consiste en girar el volante con una pendiente inicial de 1000 grados/s hasta alcanzar un valor de aceleración lateral de 0.3 el valor de la gravedad. Los valores del giro en el volante varían en función del coche en concreto, ya que depende de factores tales como distancia entre ejes o la relación de dirección. Como este valor suele ser pequeño se multiplica por el escalar 8 de cara a proveer un giro lo suficientemente severo. El valor de la aceleración lateral se selecciona de esta forma ya que la incertidumbre en el ángulo de giro de volante es baja para cualquier vehículo y, además, los sistemas de control de estabilidad (ESP) no afectan al resultado del test a una aceleración tan baja. Una vez se alcanza el giro de volante óptimo para lograr las condiciones mencionadas anteriormente, se pasa a un periodo en el que el ángulo de giro se mantiene constante durante un tiempo típico de 4 segundos, para posteriormente reducir dicho ángulo a través de otra rampa, desde el valor que se tenía hasta un valor nulo de giro del volante, en un tiempo que se suele escoger de 2 segundos, aunque este valor puede variar en algunos casos.

A la hora de implementar esta maniobra, previamente al comienzo del giro, el conductor acelera hasta lograr una velocidad ligeramente superior a la requerida, a partir de ahí, deja el vehículo en punto muerto y activa el mecanismo que se encarga del control de la entrada en el volante.

Gráficamente, el proceso se describe de esta manera:

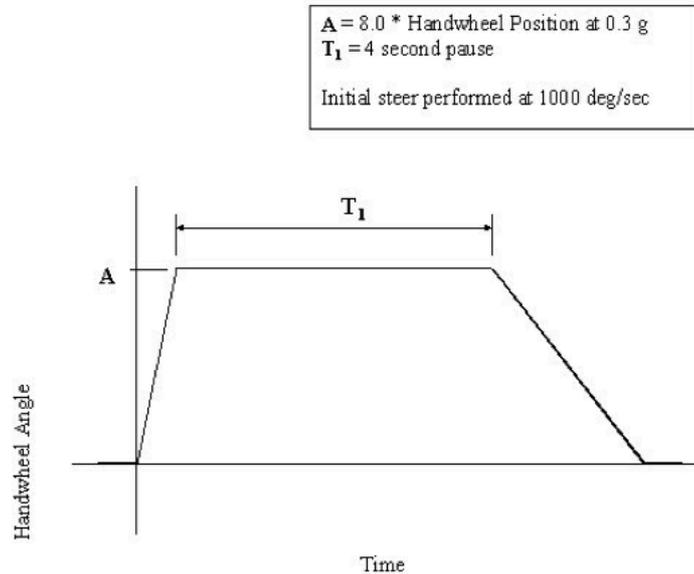


Figura 3-1. Representación de la maniobra J Turn, de la referencia [5], Experimental Examination of Test Maneuvers That May Induce On-Road, Untripped Light Vehicle Rollover, de NHTSA

### 3.1.2 Fishhook

Es una maniobra consistente en ejecutar dos giros de volante, a izquierda y posteriormente a derecha, o viceversa (aunque es muy habitual en la práctica realizar el test de ambas formas), cuyos valores de giros en ambos sentidos, y el tiempo que se permanece en cada posición están previamente fijados de cara a obtener el mayor número de datos posibles. Esta maniobra fue creada originalmente por Toyota en el desarrollo de sus prototipos y, posteriormente, fue modificada y utilizada por otras empresas como Nissan u Honda. En este test, existen posibilidades de que se produzca un levantamiento del vehículo sobre dos ruedas, si hay un exceso de peso o el sistema de suspensión está diseñado incorrectamente, que puede considerarse altamente inseguro si los sistemas de detección registran una subida de las ruedas de dos o más pulgadas, según la NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration). En términos de repetibilidad y reproducibilidad nos encontramos que este test es excelente en estos aspectos. Además, como en la maniobra previa, solo se necesita un conductor y los instrumentos requeridos son controladores para velocidad, giro y aceleración, así como sensores que, además de medir estas magnitudes, también controlen otras como el levantamiento sobre dos ruedas, por ejemplo.

El procedimiento para realizar esta maniobra consiste en, partiendo del vehículo avanzando en línea recta, aplicar una rampa de pendiente 720 grados/s hasta alcanzar nuevamente un valor de

aceleración lateral de 0.3 el valor de la gravedad. Al igual que sucedía en el caso del J Turn, este valor varía en cada vehículo en función de factores como la distancia entre ejes, por lo que suele ser muy habitual que antes de realizar este tipo de pruebas se lleven a cabo otros test con el objetivo de hallar dichos valores de aceleración lateral. Además de ello, y como en el caso anterior, este valor se suele multiplicar por un escalar de valor 6.5, con el objetivo de producir un giro lo suficientemente severo. Una vez alcanzado este valor de giro, se mantiene durante 0.250 s y posteriormente se aplica una rampa de pendiente de igual valor y signo opuesto a la anterior, hasta alcanzar de nuevo el mismo de aceleración lateral, pero en el otro sentido. Una vez en esa posición se mantiene el giro durante un tiempo que suele ser típicamente de 3 segundos, para finalmente volver a la posición en un periodo que suele estar en torno a los 3 segundos de nuevo, aunque puede variar en algunos casos.

Al igual también que en el caso anterior, previamente a comenzar las maniobras de giro, el conductor lleva el vehículo a una velocidad ligeramente superior a la deseada, en línea recta, y a partir de ahí suelta el acelerador, y una vez alcanzada la velocidad de inicio del test activa el mecanismo que controla el giro del volante.

Gráficamente, el proceso se describe de esta manera:

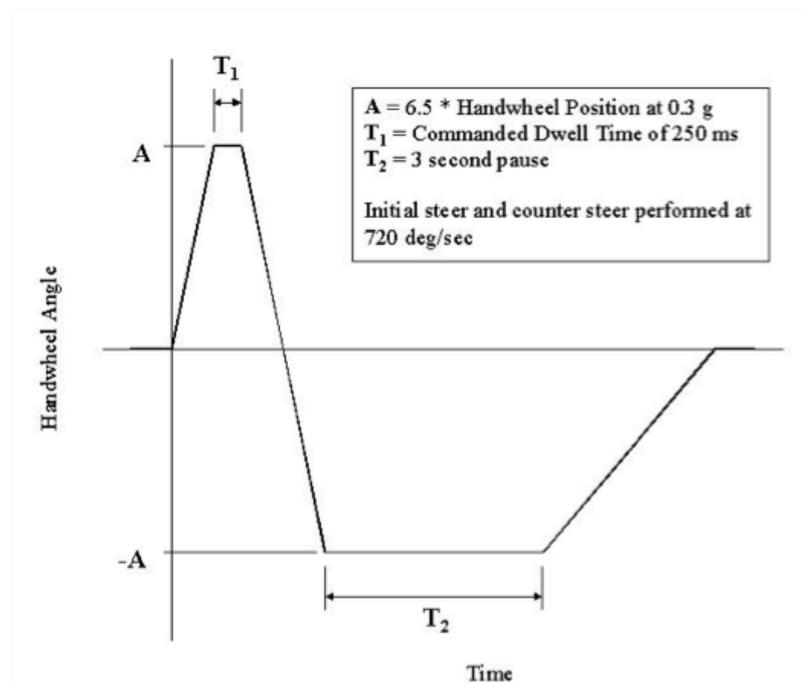


Figura 3-2. Representación de la maniobra Fishhook, de la referencia [5], Experimental Examination of Test Maneuvers That May Induce On-Road, Untripped Light Vehicle Rollover, de NHTSA

### 3.1.3 Step Steering Input

Esta maniobra es utilizada habitualmente de cara a describir el funcionamiento transversal de un vehículo, de acuerdo a la norma ISO 7401.

La forma de realizar este tipo de test, que es muy habitual no solo en el ámbito automovilístico, sino en general en la industria, es aplicar un escalón de tamaño variable a un sistema a probar. En los casos de vehículos, la metodología empleada habitualmente sigue el siguiente proceso: en primer lugar se conduce el coche en línea recta hasta llegar a una velocidad aproximada de unos 80 km/h, momento en el que se introduce el mencionado escalón a través de un sistema de control automático. La amplitud del escalón puede ser variable, aunque un valor que suele escogerse es aquel tal que se produzca una aceleración lateral de  $4 \text{ m/s}^2$ . No obstante, también es típico hacer pruebas con varios escalones de amplitudes diferentes de cara a observar más características y magnitudes distintas, y sus resultados pueden ser interpretados en términos análogos a medidas de eficiencia de frenado. Las magnitudes que deben medirse en la realización de este test son velocidad longitudinal y de guiñada, ángulo de giro del volante, aceleración lateral..., aunque también hay otras que pueden resultar interesante de medir como par de giro, fuerzas y momentos en las ruedas, ángulos de deslizamiento, etc.

En este test, también hay que tener en cuenta en el análisis de los resultados la posible incertidumbre en términos de tiempo a la hora de introducir la acción sobre el volante, ya que mientras que en los otros test vistos hasta ahora los ángulos se introducían con una cierta pendiente, este test debería hacerse teóricamente de forma instantánea, en lo que a giro de volante se refiere, lo cual es imposible, en este y en cualquier otro tipo de problema, debido a la ya mencionada incertidumbre que todos los sistemas poseen intrínsecamente.

Gráficamente, el proceso se describe de esta manera:

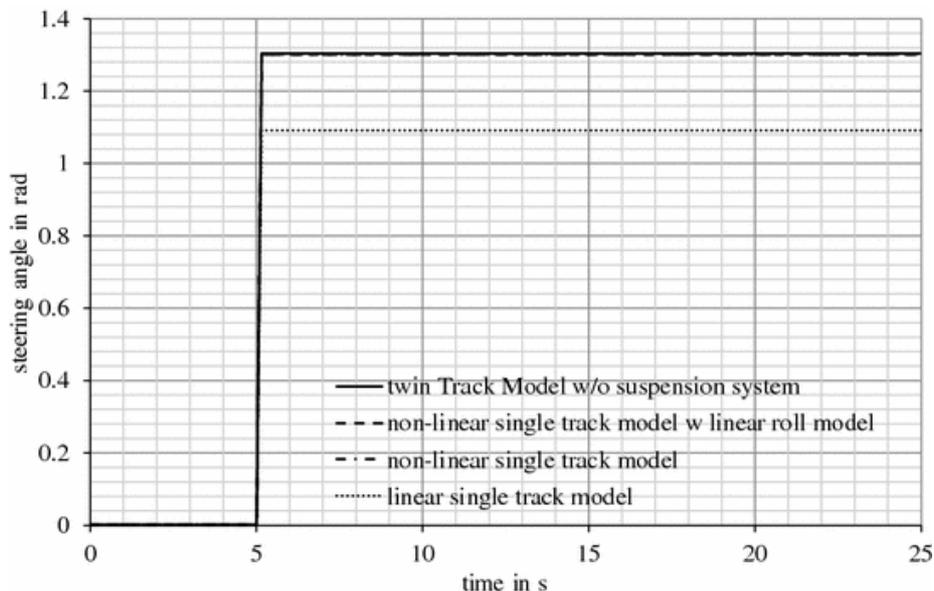


Figura 3-3. Representación de la maniobra Step Steering Test, de la referencia [13], Vehicle Dynamics. Modeling and Simulation, de Schramm, D., Hiller M., Bardini R.

### 3.1.4 Reducing Radius Test

Este test, que no es tan habitual como los otros, consiste en, partiendo del vehículo en línea recta, se va girando en trayectorias de radio cada vez menor. El objetivo de este test es observar el comportamiento del vehículo en los cambios de trayectoria tanto desde un punto de vista transitorio, justo en el período de cambio de radio, como en el permanente, ya que se mantiene el giro constante durante un tiempo antes de hacer la siguiente reducción. Las medidas que suelen tomarse en este tipo de prueba son: velocidades longitudinal y de guiñada, aceleración longitudinal, ángulo de giro del volante, par necesario, par real proporcionado por el motor... Para ello lo más habitual es usar instrumentación como GPS, sensores en el volante o sistemas de adquisición de datos. Los procedimientos para realizar esta maniobra están recogidos en las normas ISO 11026 e ISO 15037-2. De cara a determinar el valor de giro que provoca el vuelco del vehículo, éste debe irse incrementando progresivamente, provocando cada vez una trayectoria más cerrada.

### 3.1.5 Sine with Dwell

Esta maniobra guarda ciertas semejanzas con algunas de las maniobras vistas anteriormente (J Turn o Fishhook). Sin embargo, en este caso la entrada consiste en una senoide de amplitud variable, y de frecuencia 0.7 Hz, con una parada de medio segundo cuando el seno está en su punto más bajo. Los procedimientos para la realización de esta maniobra están recogidos en la norma ISO 19365:2016. Se hace el test en un asfalto seco, partiendo con el vehículo en línea recta, y una vez se llega a una velocidad de 80 km/h, se suelta el acelerador y se comienza la maniobra. Es una maniobra utilizada habitualmente por los fabricantes, ya que reproduce ciertas situaciones reales, relacionadas sobre todo con giros de volante con el objetivo de evitar obstáculos. Además, una de sus características principales es su buena repetibilidad. Aparte de todo esto, es la maniobra más severa encontrada para inducir derrape, aunque esto no debe suceder durante el test, que no será válido si se producen trompos o si las respuestas laterales no son adecuadas.

Gráficamente el proceso se ilustra, desde el punto de vista del ángulo introducido en el volante, de la siguiente manera:

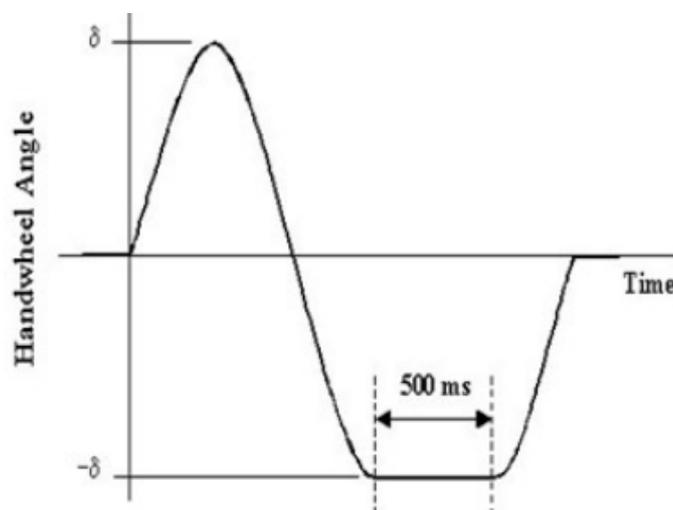


Figura 3-4. Representación de la maniobra Sine with Dwell, de la referencia [16], United States Rulemaking on Electronic Stability Control (ESC) on light Vehicles, de NHTSA

## 3.2 Otras pruebas

Los test que se simulan en este documento han sido escogidos por su alto uso en el mercado real y por su posibilidad de ser programadas de forma relativamente sencilla. Sin embargo, existen otros test, también altamente empleados habitualmente, que pueden ser implementados o probados en circuito cerrado, con el objetivo de obtener datos similares a los que se han obtenido en las simulaciones de este documento. Entre estos test podemos destacar algunos como el “Steady State Circular Test”, el “Double Lane Change Test” o el “ $\mu$ -split single lane change”, de los que se hará una breve explicación a continuación.

### 3.2.1 Double Lane Change Test

Esta maniobra, diferente de las anteriores al ser considerada como una maniobra en bucle cerrado, es otra de los métodos habitualmente en el desarrollo de un coche. Es en general, una maniobra difícil de ejecutar en la realidad, y también por tanto de simular, debido a su mala repetibilidad y reproducibilidad, cuyo origen está en la gran dependencia que tiene de la conducción del piloto, por lo que en este documento el objetivo será dar una aproximación de la maniobra, puesto que además en pruebas con coches reales es muy habitual que sea necesario realizar varias repeticiones con varios pilotos diferentes. No obstante, hay que decir que poco a poco se está consiguiendo implementar esta maniobra teniendo un controlador automático que lleve a cabo la secuencia de giros para llevar a cabo la trayectoria, aunque este método no está todavía muy extendido.

El procedimiento de realización de la maniobra consiste en, partiendo de una velocidad 50 km/h (aumentándola progresivamente hasta la velocidad límite que permita hacer la prueba adecuadamente), y teniendo en cuenta que se soltará el acelerador unos dos metros después del comienzo de la línea de entrada, se tienen dos líneas, una de entrada y una de salida, con una longitud de unas 12 metros, y una lateral, con una longitud de 11 metros. El ancho de las líneas de entrada y la intermedia es dependiente de la anchura del vehículo, mientras que la longitud de salida se mantiene constante, de valor 3 metros. El offset lateral entre la línea de entrada y la lateral es de 1 metro, mientras que el longitudinal es de 13.5 metros. En el caso del existente entre la línea lateral y la de salida, tenemos el mismo offset lateral que antes, mientras que el longitudinal se reduce a 12.5 metros.

Gráficamente se puede representar de la siguiente manera:

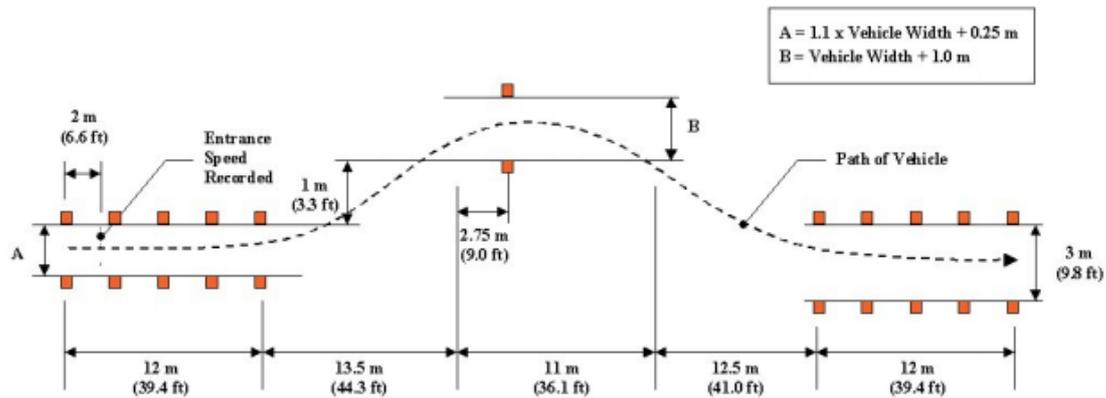


Figura 3-5. Representación de la maniobra Double Lane Change, de la referencia [5], Experimental Examination of Test Maneuvers That May Induce On-Road, Untripped Light Vehicle Rollover, de NHTSA

### 3.2.2 Steady State Circular Test

Es una prueba en bucle abierto caracterizada porque, o bien el radio de giro, o la velocidad, o el ángulo de giro del volante, se mantiene constante. Un ejemplo de este tipo de test podría ser un giro de radio constante con la velocidad incrementándose. La norma que estandariza e indica los procedimientos para realizar este tipo de maniobras es la ISO 4138. En este tipo de maniobras suele buscarse la obtención de parámetros dinámicos y de confort, y típicamente suelen medirse variables como el giro del volante o el ángulo de balanceo y su dependencia con la aceleración lateral, aunque también suele ser habitual medir otro tipo de valores como las aceleraciones y velocidades longitudinales y laterales, ángulos de deslizamientos o temperaturas de las ruedas. Estas variables suelen medirse con instrumentación especializada tipo GPS o sensores, ya sean de temperatura o ángulo, o bien del tipo acelerómetros o giróscopos. Un ejemplo de este tipo de sistemas es el MSW de Corrsys-Datron, recomendado por la DTA para realizar medidas simultáneas del giro del volante, del momento de giro y de la velocidad angular del giro.

Además, existen una serie de parámetros que se miden durante esta maniobra que permiten obtener diversa información del vehículo, entre los que pueden destacarse la diferencia en el ángulo de deslizamiento o el gradiente de la dirección automática.

Las características del ángulo de giro durante la aceleración lateral es una medida de las características de autodireccionamiento del vehículo. En efecto, un aumento de ésta, unido a un aumento de la aceleración lateral prueba la existencia de rasgos subviradores en el automóvil, aunque hay que recordar que siempre es preferible un vehículo neutral o subvirador frente a uno sobrevirador.

Por último, recalcar que aunque se pueden obtener abundantes características cinemáticas y dinámicas de este test, esta prueba también es ampliamente utilizada a la hora de evaluar el comportamiento de los neumáticos.

Un ejemplo de esta maniobra sería el que se muestra en la figura siguiente, en la que como vemos se mantiene constante el ángulo de giro a lo largo de la duración de la misma.

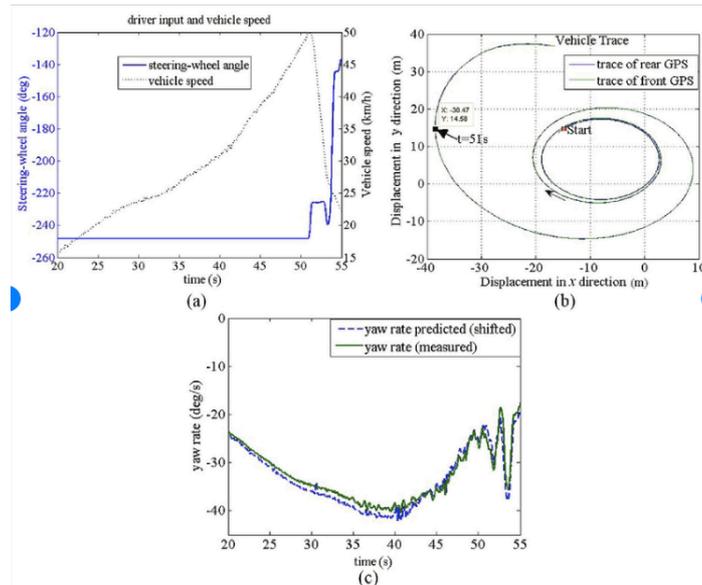


Figura 3-6. Representación de la maniobra Steady State Circular, de la referencia [19], Real Time Yaw rate prediction base don a non-linear model and feedback compensation for vehicle dynamics, de Hongjun Zhu, Liang Li, Maojing Jin, Hongzhi Li, Jian Song.

### 3. 2. 3 $\mu$ -Split Single Lane Change

El objetivo de este test es determinar el comportamiento lateral transitorio del vehículo de estudio. Su alcance suele estar más limitado a vehículos pesados e incluso autobuses. La normativa que regula el funcionamiento del test es la ISO 3833. Las variables que suelen medirse habitualmente son la velocidad longitudinal y la de guiñada, así como la aceleración lateral y el ángulo de giro, aunque también es habitual medir otros valores como el ángulo de deslizamiento o la desviación lateral. Para ello, es habitual utilizar unidades GPS, sensores para el giro del volante y sistemas de adquisición de datos. De cara a la preparación del test habrá que seguir las directrices de la norma ISO 1176 en cuanto a neumáticos y condiciones de carga se refiere. La prueba debe realizarse a 80,90 o 100 km/h, con una desviación permitida de aproximadamente 2 km/h a lo largo de la duración de la misma. En caso de que un vehículo no alcance dichas velocidades, se realizará el experimento a la velocidad máxima alcanzable por cada transporte en concreto. Los valores de aceleraciones lateral y longitudinal media estarán en torno a 3 y 0.1  $m/s^2$ , respectivamente. El test debe realizarse al menos 7 veces siguiendo la secuencia que se detalla a continuación:

Conduciendo el vehículo en línea recta, y partiendo de una velocidad de guiñada contenida en un rango de  $\pm 0.5$  %/s, se aplica una entrada en forma de un periodo completo de una sinusoidal de frecuencia 0.2 Hz (también debe testearse una frecuencia de 0.5 Hz). Se deben tomar datos girando el volante en ambas direcciones, bien alternando entre giro a derecha o izquierda, o bien tomando todos los datos en una misma dirección, repitiendo el proceso posteriormente para la otra. Idealmente, el test debe repetirse 3 veces para cada combinación de velocidad y ángulo de giro.

Parecida a esta maniobra, existe otro test con características y datos a recabar parecida al  $\mu$ -split single lane change test. Esta prueba se conoce como "Pulse steer input test". Como se mencionaba, los datos e incluso los valores de las aceleraciones y velocidades son muy similares a la maniobra anterior, encontrándose el cambio sustancial en la forma de realizar la maniobra, la cual se detalla a continuación:

Partiendo del vehículo que va siguiendo una línea recta, y de un estado estable en el que la velocidad de guiñada se encuentra contenida en un rango de  $\pm 0.5$  °/s, se aplica una señal de entrada en forma de onda triangular, seguido de un periodo de 3 a 5 segundos donde el volante se mantiene en el punto neutral. La amplitud de la entrada se obtiene realizando una maniobra circular estable, de tal forma que el radio de giro provoque la aceleración lateral deseada (que suele establecerse alrededor de  $3 \text{ m/s}^2$ ), a la velocidad a la que se realizará el test.

# 4 Vehículos a Estudio

---

## 4.1 Estudio sobre el mercado automovilístico. Justificación de los tipos de vehículos a analizar

A priori, podría parecer que el estudio de cuatro tipos de vehículos podría resultar excesivo e innecesario (aunque es obvio que cada modelo que se lanza al mercado es sometido a una serie de pruebas que variarán en cada caso, con el objetivo de cumplir los requisitos exigidos por la ley y la industria). Sin embargo, si se realiza un pequeño estudio del mercado se justifica la necesidad de analizar varios tipos de automóviles.

Si observamos el mercado desde una perspectiva global, se tiene que, por ejemplo en 2015, se matricularon unos 90 millones de automóviles por todo el mundo, lo cual supone un aumento de un 2.3 % respecto a 2014. Pero si analizamos región por región, o país por país, se observa como hay variaciones sustanciales, especialmente entre las preferencias de la población.

De esta forma, observamos como en China el vehículo por excelencia es el monovolumen, mientras en países como Alemania o España, el modelo preferido es el compacto. En esta misma línea países como México, Brasil o Japón se decantan por los utilitarios y en otras zonas como Norteamérica se decantan por vehículos 'pick up'. Como vemos el rango de elección de vehículos es amplio y por tanto, no podemos limitar la variedad de automóviles a testear.

Por último mencionar que, aunque los vehículos deportivos no son dominadores en el mercado, debido fundamentalmente a su alto precio, no pueden ser dejados de lado, ya que por sus elevadas prestaciones y características superiores, deben ser capaces de responder satisfactoriamente a todos lo imprevistos que puedan presentarse en la conducción, cuya evaluación durante el desarrollo del modelo, es uno de los objetivos de las pruebas que se simulan en este trabajo.

## 4.2 Descripción de los tipos de vehículo a estudiar

Como resulta obvio, dentro de la industria automovilística no todos los vehículos son iguales, existen de diferentes tamaños y formas, desde los conocidos 4x4 a los coches biplaza, pasando por los deportivos. Y estas diferencias, además de llamar la diferencia estéticamente, suponen grandes cambios en partes del diseño como la aerodinámica o la suspensión. Es por esto, que se considerarán estas características geométricas a la hora de probar cada maniobra, por ello, se realizará varias veces cada test, tantas como tipos de coches probemos, en este caso 4: vehículos pequeños, vehículos medianos, vehículos deportivos y furgonetas. Para cada tipo señalaremos las principales características.

#### 4.2.1 Vehículos pequeños

Este tipo de vehículo es un típico modelo de coche de pequeño tamaño con un motor diesel de inyección directa de 1.3 litros y cinco asientos.

Las principales propiedades geométricas e inerciales de este tipo de vehículos son:

Tabla 4-1. Datos de los vehículos pequeños

Definición	notación	valor
Altura	H	4.03m
Anchura	W	1.69m
Longitud	L	1.49m
Distancia a eje delantero	a	0.958m
Distancia a eje trasero	b	1.552m
Distancia entre ejes	l	2.51m
Masa	m	1250 kg
Altura del centro de gravedad	$h_g$	0.55m
Inercia en x	$J_x$	960 kg m <sup>2</sup>
Inercia en y	$J_y$	2058 kg m <sup>2</sup>
Inercia en z	$J_z$	2663 kg m <sup>2</sup>
Potencia máxima	$P_{max}$	51 kW
Par máximo	$T_{max}$	180 Nm

Las curvas de potencia y par, función de la velocidad angular, serían:

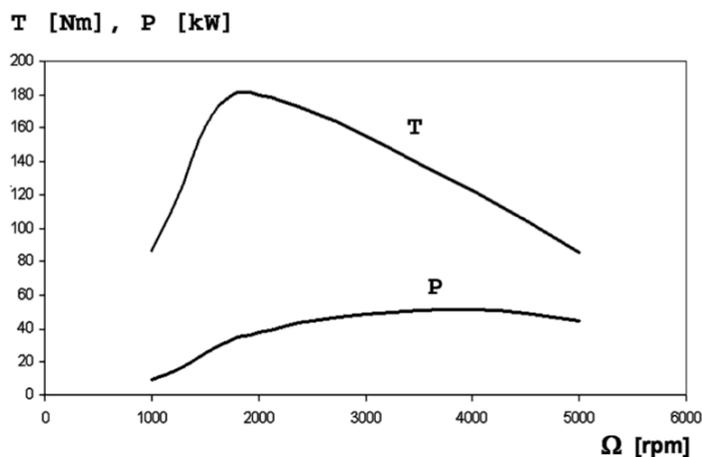


Figura 4-1. Representación par-velocidad angular en vehículos pequeños, de la referencia [24], The Automotive Chassis Volume 2: System Design, de G. Genta y L. Morello

Algunos vehículos que, por su tamaño, podrían ser considerados dentro de esta categoría son:

- Mitsubishi Space Star
- Ford Ka+
- Toyota Yaris
- Mazda 2
- Fiat Punto

#### 4.2.2 Vehículos de tamaño medio, tipo sedán

Este coche es el típico sedán último modelo, con cinco asientos y un motor diesel de inyección directa de 1.9 litros

Las principales características geométricas e inerciales son las siguientes:

Tabla 4-2. Datos de los vehículos medianos

Definición	notación	valor
Altura	H	4.25m
Anchura	W	1.76m
Longitud	L	1.53m
Distancia a eje delantero	a	1.108m
Distancia a eje trasero	b	1.492m
Distancia entre ejes	l	2.6m
Masa	m	1400 kg
Altura del centro de gravedad	$h_g$	0.565m
Inercia en x	$J_x$	545 kg m <sup>2</sup>
Inercia en y	$J_y$	1936 kg m <sup>2</sup>
Inercia en z	$J_z$	2038 kg m <sup>2</sup>
Potencia máxima	$P_{max}$	85 kW
Par máximo	$T_{max}$	280 Nm

Las curvas de potencia y par, función de la velocidad angular, serían:

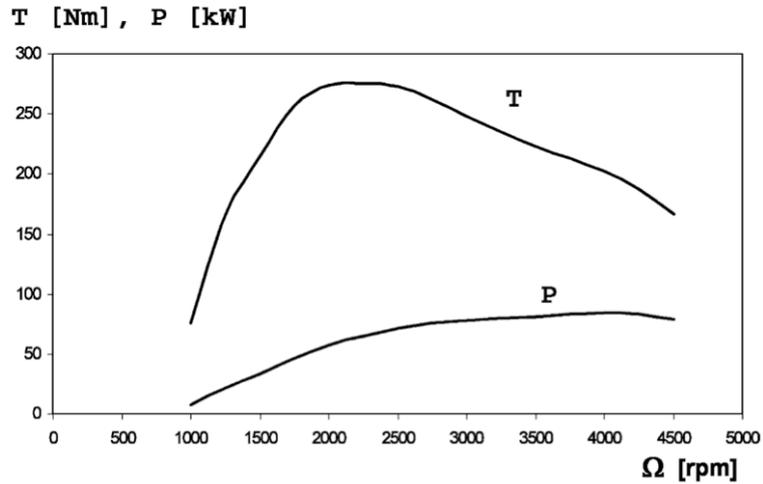


Figura 4-2. Representación par-velocidad angular en vehículos medianos, de la referencia [24], The Automotive Chassis Volume 2: System Design, de G. Genta y L. Morello

Algunos vehículos que, por su tamaño, podrían ser considerados dentro de esta categoría son:

- Citroen C4 Cactus
- DS DS4
- Toyota Auris
- Citroen C4
- Kia cee'd

### 4.2.3 Vehículos deportivos

Estos vehículos son modelos modernos de dos asientos y un motor de encendido por chispa de 4.2 litros.

Las principales características geométricas e inerciales son las siguientes:

Tabla 4-3. Datos de los vehículos deportivos

Definición	notación	valor
Altura	H	4.51m
Anchura	W	1.92m
Longitud	L	1.21m
Distancia a eje delantero	a	1.461m
Distancia a eje trasero	b	1.199m
Distancia entre ejes	l	2.66m

Masa	$m$	1690 kg
Altura del centro de gravedad	$h_g$	0.47m
Inercia en x	$J_x$	626 kg m <sup>2</sup>
Inercia en y	$J_y$	2165 kg m <sup>2</sup>
Inercia en z	$J_z$	2220 kg m <sup>2</sup>
Potencia máxima	$P_{max}$	290 kW
Par máximo	$T_{max}$	460 Nm

Las curvas de potencia y par, función de la velocidad angular, serían:

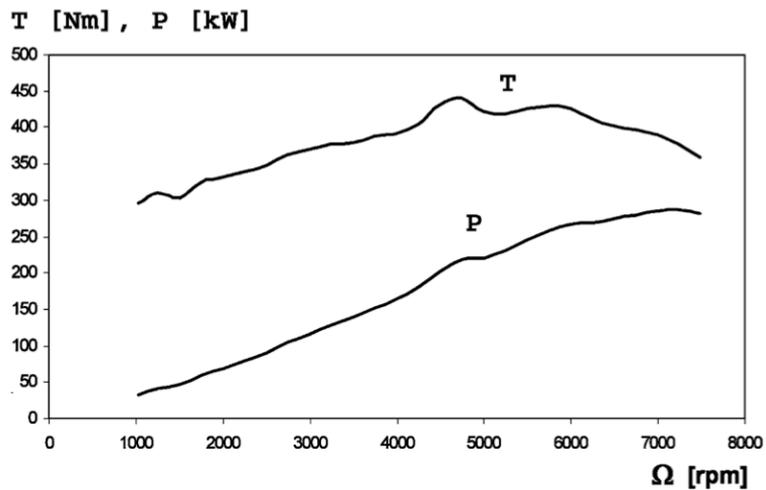


Figura 4-3. Representación par-velocidad angular en vehículos deportivos, de la referencia [24], The Automotive Chassis Volume 2: System Design, de G. Genta y L. Morello

Algunos vehículos que, por su tamaño, podrían ser considerados dentro de esta categoría son:

- Aston-Martin Vantage Coupe
- Honda NSX
- Mercedes-Benz AMG GT
- Ferrari 488 GTB
- Ferrari 488 Pista

#### 4.2.4 Furgonetas

Estos vehículos tienen capacidad para llevar 1.4 toneladas y cuentan con un motor diesel de inyección directa de 2.3 litros.

Las principales características geométricas e inerciales son las siguientes:

Tabla 4-4. Datos de las furgonetas

Definición	notación	valor
Altura	H	5.4m
Anchura	W	2.05m
Longitud	L	2.5m
Distancia a eje delantero	a	1.204m
Distancia a eje trasero	b	2.246m
Distancia entre ejes	l	3.45m
Masa	m	2100 kg
Altura del centro de gravedad	$h_g$	0.679m
Inercia en x	$J_x$	1400 kg m <sup>2</sup>
Inercia en y	$J_y$	6000 kg m <sup>2</sup>
Inercia en z	$J_z$	6230 kg m <sup>2</sup>
Potencia máxima	$P_{max}$	103 kW
Par máximo	$T_{max}$	330 Nm

Las curvas de potencia y par, función de la velocidad angular, serían:

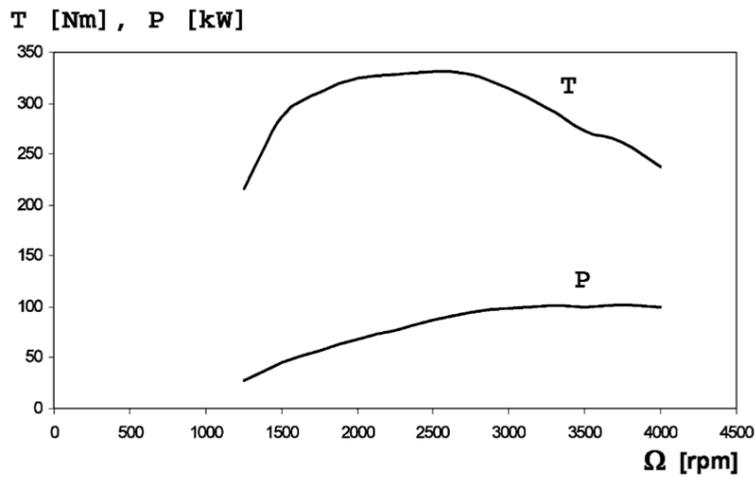


Figura 4-4. Representación par-velocidad angular en furgonetas, de la referencia [24], The Automotive Chassis Volume 2: System Design, de G. Genta y L. Morello

Algunos vehículos que, por su tamaño, podrían ser considerados dentro de esta categoría son:

- Opel Vivaro Combi Larga
- Fiat Talento Combi Larga
- Ford Tourneo Custom Larga

- Volkswagen T6 Caravelle Larga

## 5 Análisis de los resultados obtenidos

---

En esta sección el objetivo será analizar los resultados conseguidos a través de las simulaciones y encontrar, por tanto, el rango de validez del modelo propuesto, con el objetivo de delimitar las situaciones donde el modelo puede ser utilizado sin riesgo de incurrir en fallos e imprecisiones de gran magnitud. Para ello, se discutirá acerca de la exactitud de los modelos en la reproducción de las maniobras, para lo cual se realizarán comparaciones con experimentos reales realizados en la industria. Además, también se verá para que situaciones es válido el modelo lineal, con las simplificaciones que conlleva, y en cuales es necesario usar la teoría general.

### 5.1 Situaciones de inestabilidad e inexactitud

Si se observan detenidamente los resultados obtenidos, se aprecia que, como ya se predijo, el modelo lineal no es válido para aquellas maniobras en las que el vehículo realiza giros bruscos o de gran amplitud. Así podemos ver como para las trayectorias en las simulaciones de Sine with Dwell, Fishhook y J Turn, se producen picos en los valores de las variables, alcanzando estas amplitudes como  $80^\circ$  en los valores alfa o valores del orden de  $10^6$  kN, siendo estos resultados obviamente muy irreales, poniendo de manifiesto el limitado rango de uso de este modelo lineal para maniobras suaves. Además, no son estos los únicos casos donde el modelo para pequeños giros falla, ya que aunque es válido para vehículos pequeños y medianos en las maniobras de Reducing Radius Test y Escalón, se siguen apreciando fallos considerables cuando pasamos a vehículos deportivos y furgonetas, fundamentalmente. De esta forma, se dan situaciones de poca exactitud, si bien no producen diferencias tan sustanciales como las que apreciábamos en el resto de maniobras, donde la inestabilidad daba lugar a resultados muy dispares y que poco tenían que ver con la situación real. Así, analizando las simulaciones, en el caso de la maniobra RRT se tiene que el modelo lineal reproduce con una exactitud considerable la situación que se pretende analizar para los casos de vehículos pequeños y medianos, tanto en baja como en alta velocidad, y para los deportivos en el caso de baja velocidad, mientras que se producen fallos considerables en las furgonetas, en ambas velocidades. El caso restante (deportivos a alta velocidad) se analizará posteriormente, por la situación excepcional que en él se produce. Si pasamos ahora a analizar la maniobra Escalón, se tiene que, nuevamente, el modelo lineal se puede considerar válido para vehículos pequeños y medianos, donde la diferencia frente al modelo completo se puede considerar pequeña y válida para la situación donde nos encontramos, mientras que para deportivos y furgonetas, sea cual sea la velocidad, se aprecian inexactitudes de tamaño suficiente que no se pueden permitir en el ámbito de la ingeniería.

Para determinar las posibles causas que dan lugar a todos los problemas vistos hasta ahora hay que tener en cuenta varios aspectos:

1º En la mayoría de los casos las pruebas y test realizados suelen estar pensados, y por tanto se realizan, en vehículos utilitarios o automóviles “de calle”.

2° En relación al punto 1, el modelo está enfocado también a este tipo de vehículos y por tanto pueden ser esperables estos fallos.

3° Para el caso de los deportivos, existe una diferencia geométrica importante que puede tener influencia en los resultados, y es que además de su considerable diferencia de altura en comparación al resto de vehículos analizados, posee la característica de que la distancia del eje delantero al centro de gravedad es superior a la distancia del eje trasero a este mismo punto, situación que contrasta con el resto de los casos, donde la distancia trasera es muy superior a la delantera.

4° En el caso de las furgonetas, una posible explicación para los fallos es que su tamaño, bastante superior al del resto de casos, derive en situaciones de inexactitud.

5° Una característica que se puede observar, es que en la mayoría de los casos, si una simulación se vuelve inestable o inexacta para una velocidad concreta, a medida que aumente la velocidad, estos problemas no harán más que incrementarse. En contraste, en los casos donde la simulación produzca resultados que se puedan considerar satisfactorios, aunque se aumente la velocidad, estos fallos no se harán mucho mayores y los resultados obtenidos pueden seguir considerándose como válidos. La excepción más evidente a este criterio se produce en el caso de deportivos en la maniobra RRT en la cual hay una velocidad en la que el sistema se vuelve inestable en ambos modelos, de la que se hablará posteriormente. Es importante recalcar que esta “regla” es válida dentro de lo que podríamos denominar como velocidades habituales dentro de automóviles, ya que si nos dispusiésemos a estudiar los casos con velocidades de 200 km/h, por ejemplo, es posible que apareciesen más discrepancias que las vistas hasta el momento. Sin embargo, tampoco resulta especialmente interesante estas situaciones, ya que en muchos vehículos no pueden, y en todo caso no deben, darse durante la conducción en el mundo real.

6° Este aspecto es quizá el más significativo a la hora de explicar todas las discrepancias en el modelo lineal, ya que como se ha mencionado en todo el documento, este desarrollo simplificado está pensado para los casos de ángulos pequeños y  $\frac{dVx}{dt} = \text{constante}$ . Estas condiciones no se cumplen en muchos de los casos simulados, especialmente en las maniobras donde se producen giros de una magnitud importante y a una velocidad considerable.

## 5.2 Casos especiales

A continuación, se hará una parada de especial interés en el caso concreto que mencionamos anteriormente: vehículos deportivos en el test de Reducing Radius Test. El motivo de esta mención especial es que es el único caso donde el modelo completo se vuelve completamente inestable para velocidades relativamente bajas comparadas con aquellas que se han utilizado para las pruebas en este trabajo. En cada una de las simulaciones realizadas se han manejado velocidades de hasta 100 km/h, con el objetivo, como se mencionó anteriormente, de representar situaciones que puedan darse en la conducción real. Sin embargo, a la hora de realizar este test en este tipo de vehículos, se observa como, a velocidades bajas si se cumple las relaciones establecidas en el apartado 5 de las consideraciones vistas previamente, esto es, a una celeridad de 20-25 km/h, el resultado que ofrecen ambos modelos es muy similar, especialmente en términos de trayectoria. A partir de este punto, la simulación que ofrece la teoría lineal comienza a diferir significativamente de la no lineal, pero en cualquier caso no se hacen inestables hasta llegar a una velocidad aproximada de unos 55 km/h, donde, curiosamente, es la representación no lineal, y que hasta ahora hemos considerado más completa y realista, la que se vuelve inestable y comienza a producir trayectorias inesperadas, que no hacen más que volverse más descontroladas a medida que se aumenta la velocidad. Se puede ver reflejada esta explicación cualitativa en las siguientes figuras:

Simulación a 25 km/h

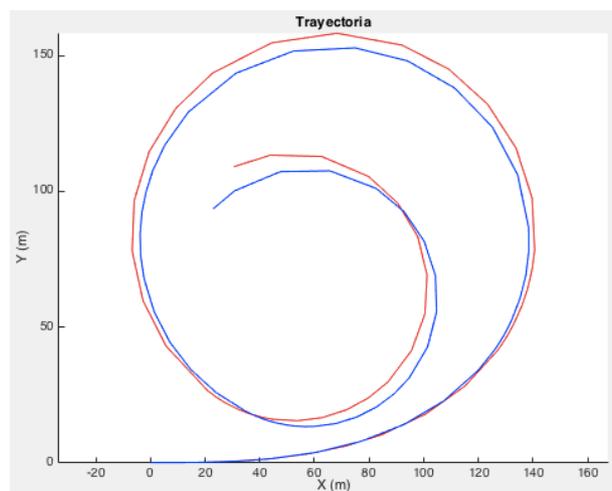


Figura 5-1. Trayectoria de vehículos deportivos en RRT a 25 km/h

Simulación a 50 km/h

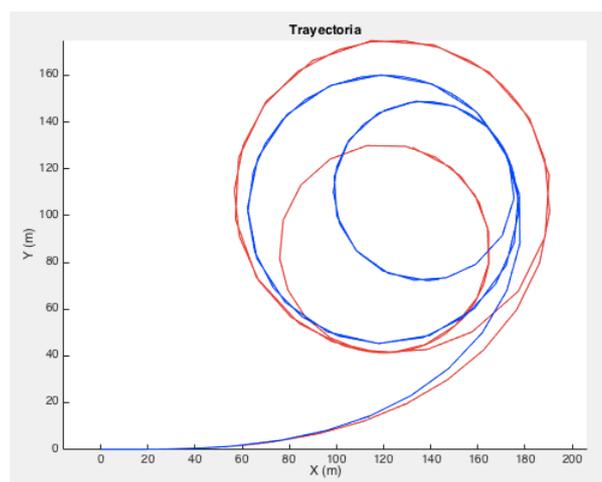


Figura 5-2. Trayectoria de vehículos deportivos en RRT a 50 km/h

Simulación a 55 km/h

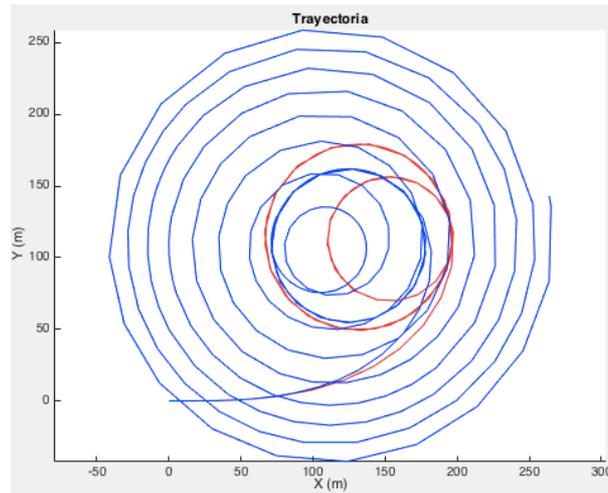


Figura 5-3. Trayectoria de vehículos deportivos en RRT a 55 km/h

Simulación a 100 km/h

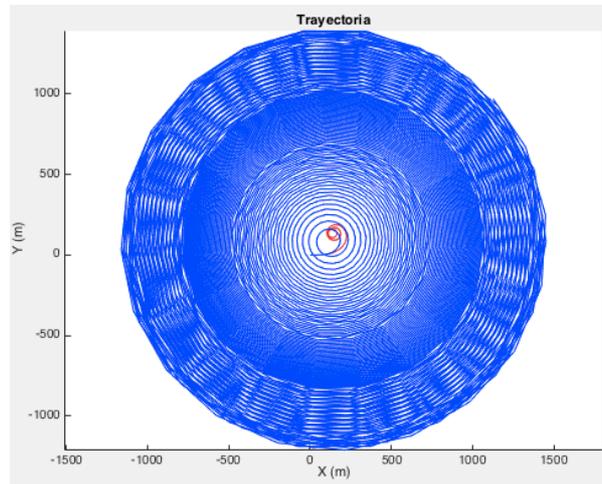


Figura 5-4. Trayectoria de vehículos deportivos en RRT a 100 km/h

Resulta también interesante mencionar que la inestabilidad se ve muy reflejada en el ángulo de deriva (lo cual resulta lógico, ya que está íntimamente relacionado con la trayectoria), pero no es tan evidente en el caso de la fuerza lateral y la aceleración lateral, donde es cierto que si comienzan a apreciarse ciertas discrepancias pero no tan significativas como en el caso del ángulo de deriva, y que por tanto, pudieran inducir el pensamiento de la fuerte inestabilidad que se produce. A pesar de que estas discrepancias y diferencias relativas se han más evidentes conforme se aumenta la velocidad, observando las imágenes siguientes, se observa lo que se acaba de comentar de que las variaciones entre ambos desarrollos se hacen evidentes en el ángulo de deriva, pero no resultan tan obvias observando la fuerza y aceleración. Las imágenes corresponden a la simulación a 55 km/h, ya que es el punto donde comienza la inestabilidad.

Evolución del Ángulo de Deriva a 55 km/h

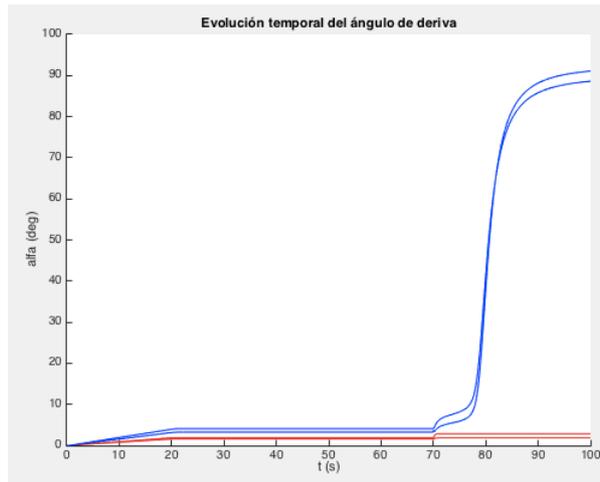


Figura 5-5. Ángulo de deriva en RRT en vehículos deportivos a 55km/h

Evolución de la Fuerza Lateral a 55 km/h

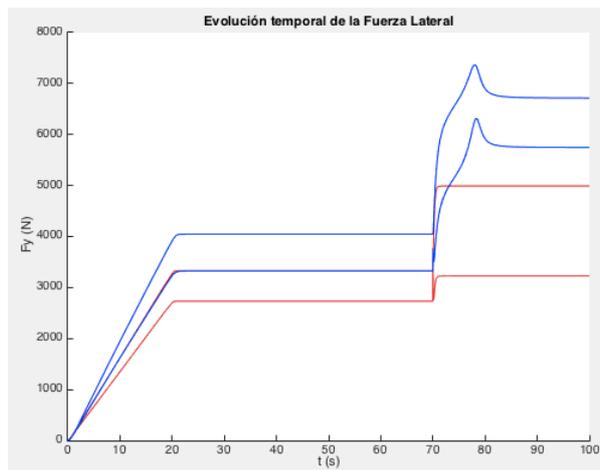


Figura 5-6. Fuerza lateral en RRT en vehículos deportivos a 55km/h

Evolución de la Aceleración Lateral a 55 km/h

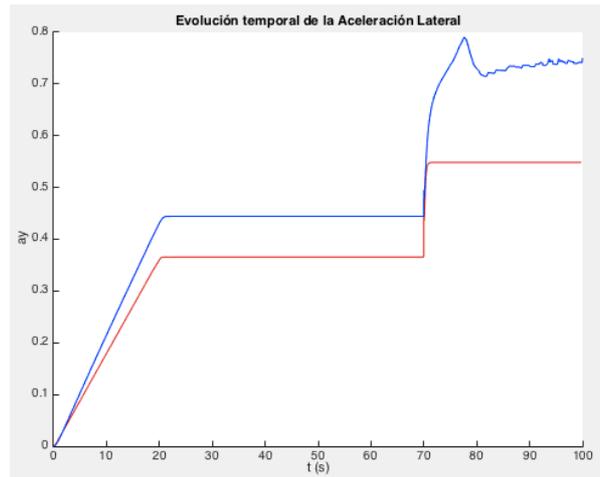


Figura 5-7. Aceleración lateral en RRT en vehículos deportivos a 55km/h

Estas posibles diferencias y la inestabilidad que se produce está relacionada con los aspectos que vimos anteriormente. No obstante, dichas características no parecen ser suficientes para justificar la inestabilidad en el sistema, y por tanto podría resultar interesante trabajar en la causa de este desajuste.

Por último, otra situación que llama la atención es la que se produce al simular la maniobra del escalón en vehículos deportivos. Aunque se presentan situaciones de imprecisión o inestabilidad en los resultados ofrecidos por el modelo lineal, algo que no es nuevo y ya se ha producido anteriormente, en el caso concreto del ángulo de deriva, al observar su evolución frente al tiempo, se observa que se produce justo lo contrario. Esto es, el modelo completo produce resultados inesperados, con valores alejados de lo que podría considerarse real y válido, mientras que la teoría lineal, cuyos resultados habría que cuestionarse en cualquier caso, al ser su rango de validez limitado, da lugar a resultados que parecen ir más en la línea del resto de simulaciones y de lo que se podría esperar. Una vez más se produce el conflicto en la simulación de vehículos deportivos, que son los que están produciendo mayores problemas en las simulaciones realizadas, siendo las posibles causas las ya mencionadas anteriormente, convirtiéndose, por tanto, en otra posible línea de investigación para el futuro.

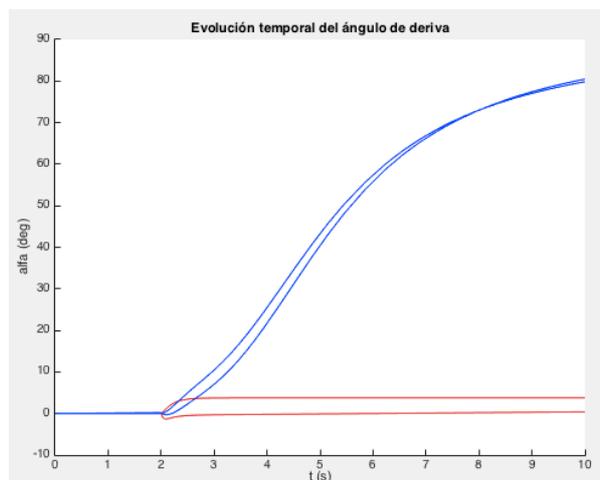


Figura 5-8. Ángulo de deriva en la maniobra escalón para vehículos deportivos

### 5.3 Irregularidades en los transitorios de las maniobras

Aunque también se discutirá este aspectos en apartados posteriores, cuando se comparen los resultados de las simulaciones con otros experimentos y estudios, el objetivo de esta sección será describir y resaltar algunos casos en los que el modelo produce situaciones inesperadas en los resultados, en forma de fluctuaciones y pequeños picos donde a priori cabría esperar trayectorias continuas. Es importante mencionar que, como criterio para considerarse irregularidad, se ha tenido en cuenta que ésta se produzca en el modelo no lineal del desarrollo, ya que se podría discutir y argumentar que los fallos producidos en la teoría lineal pueden deberse a las limitaciones propias de este desarrollo. También hay que recalcar que, aunque ya se ha dejado entrever, la motivación que lleva a realizar este apartado son las discrepancias que se producen cuando el modelo se compara con otro tipo de resultados de investigaciones ya realizadas. Tras todo lo mencionado, alguno de los fallos producidos son los siguientes:

Maniobra escalón para vehículos medianos a velocidad baja:

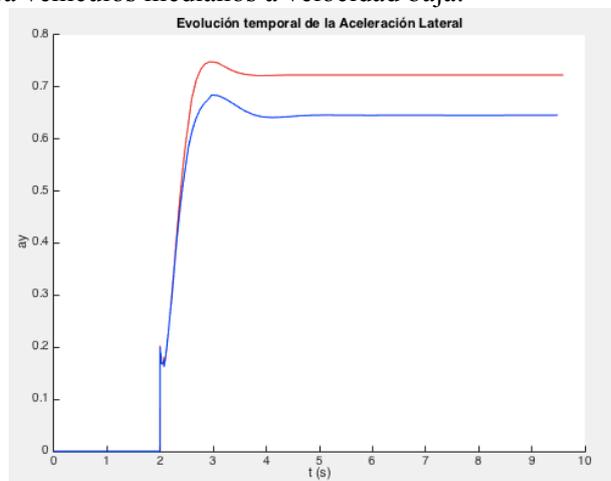


Figura 5-9. Aceleración lateral en la maniobra escalón para vehículos medianos a baja velocidad

Maniobra Sine with Dwell para vehículos medianos a velocidad baja

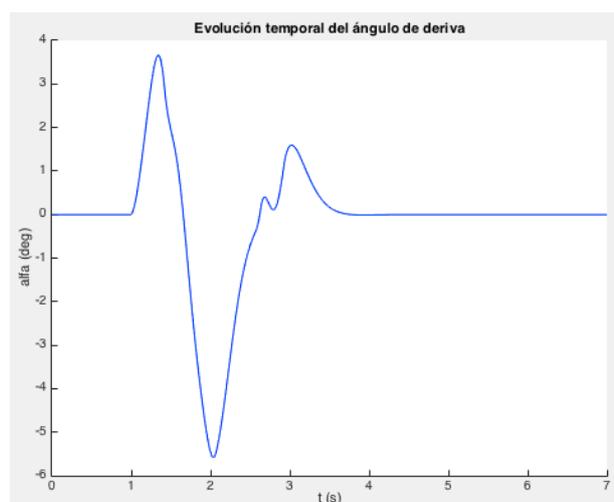


Figura 5-10. Ángulo de deriva en SwD para vehículos medianos a baja velocidad

Como puede verse en los casos presentados, que son alguno de los que se dan, no puede decirse que las variaciones sean de un calibre o importancia relativa grande respecto a la forma y

valores máximos y mínimos obtenidos. Sin embargo resultan inesperados, especialmente el primer caso estudiado, ya que en los puntos donde son visibles estas irregularidades, no se producen cambios en la trayectoria ni entradas en forma de giro o cambio de velocidad en los sistemas de control. Por ello, este podría ser un tema de futura investigación en este campo.

## 6 Comparación con resultados de experimentos reales

---

Hasta ahora todas las simulaciones y conclusiones que hemos obtenido han sido en base al modelo teórico que era objeto de estudio en este documento. Podríamos decir por tanto, que hasta ahora no hemos hecho más que comparar el modelo consigo mismo. Por ello, es el momento de preguntarse si los resultados obtenidos, ya sean del desarrollo lineal o del completo, se corresponden verdaderamente con los experimentos que se realizan día a día en la elaboración de automóviles, previo a su posterior venta al público.

Con este objetivo en mente, la idea es buscar dentro de los recursos de investigación a nuestro alcance, situaciones en las que se hayan realizadas pruebas del mismo tipo a las que se han realizado en este trabajo. Así, procederemos a buscar resultados de las maniobras con las que se ha trabajado y compararemos dichos resultados con los obtenidos a través de las simulaciones.

Por ello, realizaremos una comparación con un estudio de la NHTSA, cuyo objetivo fundamental es comprobar la resistencia dinámica al vuelco en diferentes vehículos, entre ellos 4x4 y vehículos conocidos como tipo “pick-ups”. Para ello, someten a los vehículos a la maniobra “Fishhook”. Esta comparación resulta especialmente interesante, ya que en la elaboración de este trabajo en general, y a la hora de simular esta misma maniobra, se han seguido las directrices marcadas por este organismo, con lo que puede concluirse que ambas simulaciones se han realizado siguiendo pautas comunes, con lo que contrastarlas puede proporcionar gran información acerca del modelo. La realización de este test (entre otros), más los datos de los vehículos que obtienen realizando diversas medidas, permite evaluar la característica dinámica ya evaluada. A continuación se presenta, en términos de aceleración lateral, una pequeña comparación entre los resultados de las simulaciones de este trabajo y los datos obtenidos de los test reales:

Método desarrollado en este trabajo:

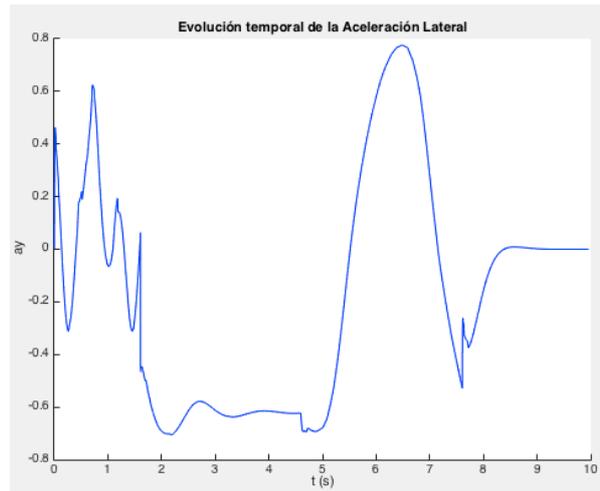


Figura 6-1. Aceleración lateral en la maniobra Fishhook en vehículos medianos

Estudio de comparación:

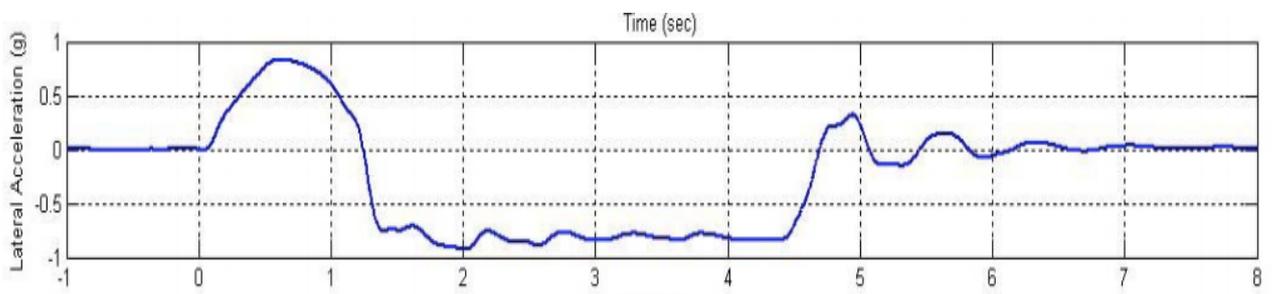


Figura 6-2. Aceleración lateral en la maniobra Fishhook en el experimento de comparación, de la referencia [23], A Demonstration of the Dynamic Tests Developed for NHTSA's NCAP Rollover Rating System - Phase VIII of NHTSA's Light Vehicle Rollover Research Program, de NHTSA

Como vemos los resultados dejan algunos aspectos claros que mencionar. Como puntos positivos podemos recalcar dos puntos fundamentales: en primer lugar, que las gráficas guardan cierto parecido atendiendo a la forma, y en segundo lugar, podemos ver que los valores de amplitud máxima son bastante cercanos y no puede decirse que se alcancen picos cuyo valor sea anormal. Como aspectos negativos, resulta obvio que, a pesar que como acabamos de mencionar, las gráficas guardan ciertas similitudes, hay varias discrepancias, sobre todo, en términos de inestabilidad. Además de ello, destaca que el valor más amplio en el experimento se produce en el inicio de la maniobra, mientras que, en la simulación aquí realizada, este pico se produce al final. Con todo ello, además de lo visto anteriormente, más lo que se verá a continuación, puede concluirse que el modelo puede ser mejorado en este aspecto transitorio, de lo cual se hablará en las futuras líneas de investigación.

## 7 Comparación de los resultados con otros trabajos o modelos

---

Como se ha mencionado anteriormente, el estudio y el modelado de la dinámica de los automóviles es objeto de estudio constantemente, ya que se busca, al igual que sucede en otros ámbitos industriales, conocer fielmente el comportamiento real del sistema de estudio, a partir del modelo de predicción teórica del que se dispone. Es por ello, que existen otros desarrollos que postulan que la dinámica puede estudiarse a través de modelos distintos al utilizado en este trabajo, algunos de los cuales ya se han citado previamente. El objetivo de este apartado será, utilizando como referencia alguno de estos trabajos, realizar una comparativa con el objetivo de poner en relieve las principales similitudes y diferencias, tanto en la manera de interpretar y desarrollar la dinámica en los vehículos, como en los propios resultados obtenidos en estas simulaciones.

En primer lugar, se realizará la comparación con el modelo teórico presentado en un artículo, visible en la referencia [21]. En este desarrollo se presenta una teoría basada en un sistema de 4 grados de libertad, cuya principal novedad es la inclusión en las investigaciones de datos cinemáticos y elásticos obtenidos experimental para representar más fielmente las características y la dinámica lateral del vehículo (buscar en la referencia para más información). Una vez desarrollado dicho modelo, se pone a prueba tanto analíticamente (mediante software de simulación), como experimentalmente, realizando un test real. Dicho test consiste en realizar la maniobra basada en aplicar un escalón al giro del volante. Más concretamente, este escalón tiene una amplitud de 55 grados, aplicado durante un tiempo de 0.2 segundos, partiendo de una velocidad de 60 km/h, utilizando un vehículo que se puede englobar dentro de lo que en este trabajo se ha denominado “vehículo mediano”. Por tanto, se puede realizar la comparación de ambos modelos si se reproduce en nuestro desarrollo la misma maniobra con la misma características, mostrándose a continuación los resultados de ambas, en términos de aceleración angular:

Modelo desarrollado en este trabajo:

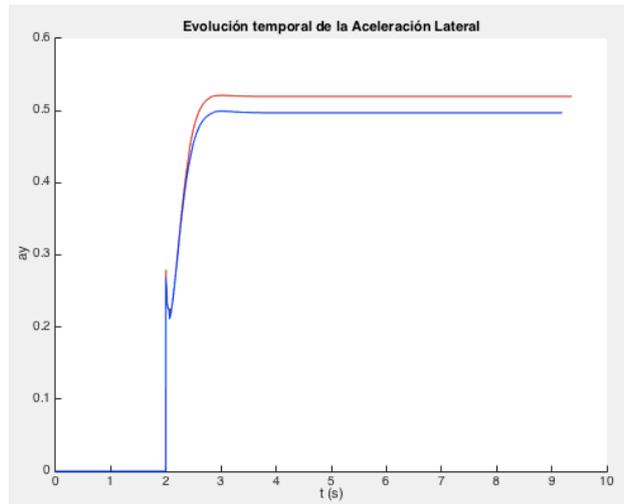


Figura 7-1. Aceleración lateral en la maniobra escalón para vehículos medianos a 60 km/h

Modelo alternativo de comparación:

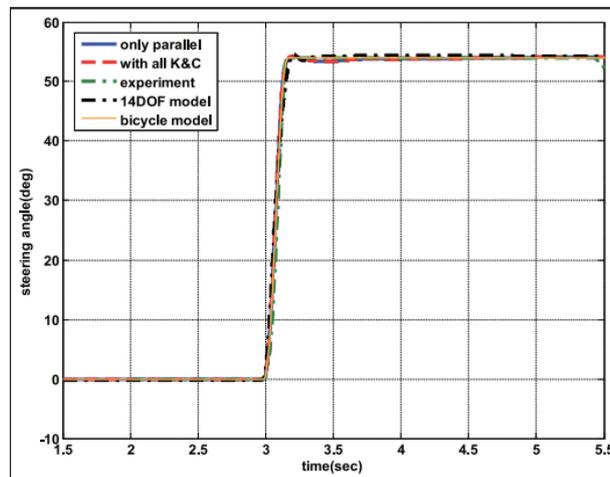


Figura 7-2. Aceleración lateral en la maniobra escalón en el modelo de comparación, de la referencia [21], Dynamic vehicle model for handling performance using experimental data, de SangDo Na, JinSeok Jang, KwangSuk Kim and WanSuk Yoo.

Aunque el resultado propio está expresado en términos relativos a la gravedad, puede observarse a simple vista que los resultados son bastante cercanos, e incluso calculando la aceleración en valores globales, se llega a la conclusión de que se tienen cifras parecidas. La mayor discrepancia que se observa, se produce durante el transitorio, donde se aprecia una caída repentina en el modelo propio. Este hecho, va en la línea de lo ya visto anteriormente, y que puede hacer que uno se pregunte si el modelo es del todo preciso antes de llegar a régimen permanente, ya que aunque la discrepancia no puede considerarse excesiva, el resultado del experimento real refleja que quizá el periodo transitorio de este modelo presente pequeños fallos. No obstante, como ya se ha mencionado, la diferencia entre los modelos y el resultado real no es lo suficientemente grande como para considerar el modelo de estudio como no válido, lo que confirma que tanto el desarrollo teórico como los experimentos van en buena línea.

Otro modelo de representación de la dinámica del automóvil, es el expuesto en el artículo que se puede encontrar en la referencia [22]. En este artículo, se propone un modelo clásico de representación del vehículo con 2-DOF, implementando una modificación al modelo, la introducción de la tecnología AFS. Esta tecnología, trata de mejorar la estabilidad del

vehículo introduciendo un pequeño ángulo extra al volante, además de la entrada por el conductor (para más información consultar las referencias). Para testear la validez del modelo, realizan diversas maniobras, entre ellas la prueba “sine with dwell test”, que también se ha realizado en las simulaciones de este modelo. A continuación se presentan los resultados de ambos casos, en términos de ángulo de deriva:

Modelo propio de trabajo:

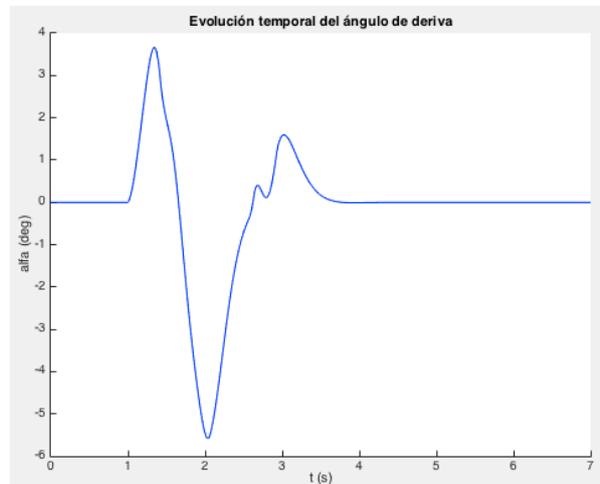


Figura 7-3. Ángulo de deriva en SwD en vehículos medianos

Modelo de comparación:

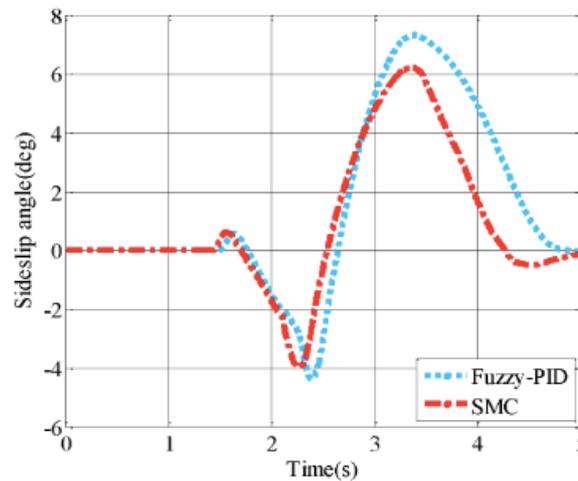


Figura 7-4. Ángulo de deriva en SwD en el modelo de comparación, de la referencia [22], Multi-Objective Sliding Mode Control on Vehicle Cornering Stability with Variable Gear Ratio Actuator-Based Active Front Steering Systems, de Xinbo Ma, Pak Kin Wong, Jing Zhao y Zhengchao Xie

A simple vista se observa que los resultados guardan bastante similitud (la diferencia es que cada gráfica pertenece a la rueda de lados opuestos). Las principales diferencias las encontramos en la amplitud de la respuesta, siendo ligeramente superior los valores del ángulo en el modelo de comparación, y en el periodo transitorio, donde se observan pequeñas inestabilidades en el modelo estudiado en este trabajo, algo que va en la línea de lo ya visto hasta ahora. No obstante, al igual que sucedió en el caso anterior, no puede decirse que las

diferencias sean considerables y de una magnitud tal que conlleve invalidar los estudios realizados con este modelo, con lo que se puede considerar un resultado satisfactorio.

## 8 Futuras líneas de investigación

---

Llegados a este punto cabe preguntarse, ¿cuáles son los posibles avances y estudios que habría que hacer o sería interesante llevar a cabo en el ámbito de la dinámica automovilística? Observando la evolución de los vehículos a lo largo de la historia resulta simple ver los cambios que han ido sufriendo los distintos medios de transporte con el paso de los años, siempre con el objetivo en mente de mejorar las prestaciones. Aunque quizá el cambio más significativo se dio con la introducción de los vehículos de motor, las mejoras y variaciones no se frenaron ahí y se siguieron implementando cambios con el objetivo de alcanzar la mayor excelencia. El momento que se vive actualmente, no es una excepción a este hecho, es por ello que en la industria estudia de forma continua maneras de realizar mejoras en distintos aspectos de los automóviles: mayores velocidades y aceleraciones, neumáticos con mayores capacidades y que se adapten a distintas situaciones, prestaciones aerodinámicas... Y el estudio de la dinámica tampoco escapa a estas continuas mejoras. Sin embargo, si hay un hecho que marca líneas de fuego en el ámbito investigador actual, es que el presupuesto no es ilimitado, y que además del tiempo, cualquier experimento/estudio conlleva unos gastos cuyos fondos no siempre pueden obtenerse fácilmente. Es por ello, que resulta lógico que encontrar un modelo global que defina y prediga con la mayor fidelidad posible los resultados dinámicos de cualquier maniobra y para cualquier tipo de vehículo (solo cambiando características de tipo geométrico y otros parámetros propios de cada modelo concreto), supondría un avance crucial en el desarrollo automovilístico, ya que permitiría con un simple clic obtener datos suficientes para validar o desechar un diseño en concreto o cambios realizados a un sistema previo, sin necesidad de llevar a cabo test como las maniobras utilizadas en este documento, u otros tipos de experimentos tales como estudios en túneles de viento, por ejemplo, suponiendo un ahorro tanto de tipo económico como de tipo temporal, al obtener los resultados deseados casi de manera instantánea.

Siguiendo esta misma línea de pensamiento, también cabría la duda de si es realmente necesario toda esta cantidad de maniobras distintas, cuyo objetivo no es otro que recoger diferentes tipos de datos sobre la respuesta del vehículo, o bien si sería posible encontrar uno o dos test estándar, que permitiesen recoger la misma cantidad de información. Aunque en principio podría parecer utópico, se puede considerar que merece la pena detenerse, como mínimo, en esta idea, ya que cada vez que se necesita realizar alguno de estos experimentos, se produce un gasto de infraestructura, personal y tiempo significativo, además de que es necesario la utilización de equipos que, en muchos casos, puede ser delicado, con lo que resulta lógico pensar que cuanto menor sea el número de pruebas a realizar, mayor será la optimización del tiempo y el presupuesto invertidos.

Hasta ahora hemos discutido acerca de líneas de investigación generales en el ámbito del diseño de los automóviles. Atendiendo ahora a la línea de este trabajo en concreto, el primer objetivo sería mejorar y desarrollar el modelo de tal forma que consiguiera resultado óptimos para cualquier tipo de vehículo y maniobra, evitando así los fallos que se vieron cuando se interpretaron los resultados. Además de esto, también sería interesante optimizar el modelo lineal, el cual, como ya se ha visto, dista en gran proporción de los resultados reales en ciertas ocasiones, lo cual provoca que sea necesario recurrir al modelo completo, lo que conlleva un coste computacional superior, al producirse el paso de un modelo simplificado a uno más elaborado. Otra cuestión que puede ser objeto de estudio para este desarrollo, son los pequeños fallos que se han producido esporádicamente en algunos periodos transitorios, que si bien su

importancia varía según el caso, siempre resulta más óptimo tener un modelo válido en todas las situaciones, más cuando este tiempo antes del régimen permanente es tan crítico en el ámbito de este estudio.

## 9 Otros estudios similares

---

En este apartado, se pretende dar una visión de en que punto se encuentra el estudio de la dinámica de automóviles en un ámbito académico e industrial. Para ello presentaremos otros trabajos, dando una explicación de qué aspectos tienen en cuenta a la hora de elaborar un nuevo modelo de predicción.

En primer lugar presentamos un estudio donde se analiza la dinámica utilizando un vehículo que se mueve a través de una serie de semáforos que se encienden y apagan siguiendo una secuencia específica. Variando los diferentes ciclos de semáforos, y a partir de un modelo teórico y un esquema de eventos implementado en Matlab, vemos la influencia de las secuencias en el comportamiento dinámico del vehículo. Para ello, se representa el estado del vehículo de tres formas diferentes: acelerado, cuando el conductor aumenta la velocidad hasta alcanzar la máxima permitida en la vía, siempre con una aceleración constante y positiva, nulo, si el vehículo alcanza la velocidad máxima o se encuentra detenido en un semáforo, y desacelerado, si el vehículo baja de velocidad al encontrar un semáforo en rojo. A partir de estas condiciones es posible simular una gran cantidad de fenómenos que suelen presentar sistemas de este tipo, y los resultados obtenidos suponen una mejora del modelo desde el punto de la vista de la teoría de bifurcaciones. Para más información consultar la referencia 27.

Otro trabajo, quizá algo más sofisticado en cuanto a forma de modelar y simular, es una tesis de la aplicación de dinámica multicuerpo al desarrollo de un simulador de bajo coste y su uso para crear controladores del automóvil de estudio. Para ello, se vale de una formulación aumentada de Lagrange, con la regla trapezoidal como integrador. A partir de ahí, y con un modelo propio creado con anterioridad, crean un simulador de conducción, que compara maniobras realizadas por un piloto humano, frente a las hechas por controladores, siempre que estas sean factibles. Una novedad curiosa se presenta a la hora de la recepción de los datos de salida, ya que, además de ser posible su visualización a través de la pantalla de un ordenador, como suele ser habitual, también existe la posibilidad de visualizar la simulación a través de gafas de realidad virtual, en diferentes entornos predeterminados. Para el diseño de los controladores, se ha conectado el modelo computacional con Matlab Engine. Para más información consultar la referencia

# Anexo A: Cálculo de fuerzas. Fórmula mágica de Pacejka

---

En este anexo se pretende justificar el cálculo de las fuerzas que se utilizan en los desarrollos. Esto se debe a que estas fuerzas, no han sido obtenidas mediante procesos matemáticos y razonamientos físicos habituales, al ser estos muy laboriosos y complicados. En su lugar se han empleado, como suele ser habitual en la práctica, métodos experimentales reflejados en fórmulas matemáticas cuyos coeficientes se determinan experimentalmente. El modelo utilizado, por ser el más habitual en la industria, se conoce como la fórmula mágica de Pacejka, donde la fuerza depende del deslizamiento transversal.

La expresión de esta fórmula suele encontrarse de dos formas, equivalentes:

- $Y = S_v + D \cdot \text{sen}(C \cdot \text{atan}(B \cdot (1 - E) \cdot (X + S_h) + E / B \cdot (\text{atan}(B \cdot (X + S_h))))))$
- $Y = S_v + D \cdot \text{sen}(C \cdot \text{atan}(B \cdot (X + S_h) - E \cdot (B \cdot (X + S_h) - \text{atan}(B \cdot (X + S_h))))))$

Y puede ser la fuerza longitudinal, la fuerza lateral o el momento autoalineante, en función de los coeficientes que se escojan. X será el ángulo de deriva, en este caso.  $S_h$  y  $S_v$  son desplazamientos que tienen en cuenta el rozamiento de rodadura y el ángulo de caída. Por último los coeficientes B, C, D y E, que varían fundamentalmente con la carga normal y el tipo de neumático, pueden ser calculados analíticamente o se puede obtener su valor a través de tablas.

## Cálculo de los coeficientes mediante tablas

Los valores de los coeficientes pueden sacarse de la siguiente tabla, donde se puede utilizar interpolación si fuera necesario:

	Carga (kN)	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>Sh</i>	<i>Sv</i>	<i>BCD</i>
<i>F<sub>y</sub></i>	2	0.244	1.50	1936	-0.132	-0.280	-118	780.6
	4	0.239	1.19	3650	-0.678	-0.049	-156	1038
	6	0.164	1.27	5237	-1.610	-0.126	-181	1091
	8	0.112	1.36	6677	-2.160	-0.125	-240	1017
<i>M<sub>z</sub></i>	2	0.247	2.56	-15.53	-3.920	-0.464	-12.5	-9.82
	4	0.234	2.68	-48.56	-0.460	-0.082	-11.7	-30.45
	6	0.164	2.46	-112.5	-2.040	-0.125	-6.00	-45.39
	8	0.127	2.41		-3.210	0.009	-4.22	-58.55
<i>F<sub>x</sub></i>	2	0.178	1,55	2193	0.432	0.000	25.0	605
	4	0.171	1.69	4236	0.619	0.000	70.6	1224
	6	0.210	1.67	6090	0.686	0.000	80.1	2136
	8	0.214	1.78	7711	0.783	0.000	104	2937

Figura A-1. Valor de los coeficientes de la fórmula mágica de Pacejka, de la referencia [11], Neumáticos. Interacción con la carretera, de Johan Wideberg

#### Cálculo de los coeficientes mediante métodos analíticos

Si se prefiere evitar la interpolación, de cara a evitar posibles errores que se introducen en las aproximaciones, se puede recurrir a un método analítico, que tiene la desventaja de que puede ser algo más laborioso. Las expresiones para determinar los coeficientes, que varían con la carga normal  $F_z$ , son las siguientes:

- $C=1.3$  (para el caso de fuerza lateral)

- $D=a_1 \cdot F_z^2 + a_2 \cdot F_z$

- $BCD=a_3 \cdot \text{sen}(a_4 \cdot \text{atan}(a_5 \cdot F_z))$  (para el caso de fuerza lateral)

- $E=a_6 \cdot F_z^2 + a_7 \cdot F_z + a_8$

Los valores de los coeficientes  $a_1 \dots a_8$  se recogen en la siguiente tabla:

	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$
$F_y$	-22.1	1011	1078	1.82	0.208	0.000	-0.354	0.707
$M_z$	-2.72	-2.28	-1.86	-2.73	0.110	-0.070	0.643	-4.04
$F_x$	-21.3	1144	49.6	226	0.069	-0.006	0.056	0.486

Figura A-2. Valor de los coeficientes  $a_1 \dots a_8$  en la fórmula mágica de Pacejka, de la referencia [11], Neumáticos. Interacción con la carretera, de Johan Wideberg

# Anexo B: Resultado completo de las simulaciones

---

A continuación se presentan el resultado de las simulaciones realizadas conforme a lo ya expuesto en este documento. En este anexo se presentan todos los resultados de todas las simulaciones realizadas, y no solo una parte con los resultados más importantes como se vio anteriormente. Las maniobras se presentarán en orden creciente de giros de volante, ya que como se comprobará esto será clave en el rango de validez de los modelos. Además de esto, los resultados de cada vehículo se presentará en orden creciente de tamaño, ya que al igual que el giro de volante, el cambio en las características geométricas del automóvil, irá generando conflictos en las simulaciones.

## RRT

### Vehículos pequeños

#### Baja Velocidad

#### Trayectoria

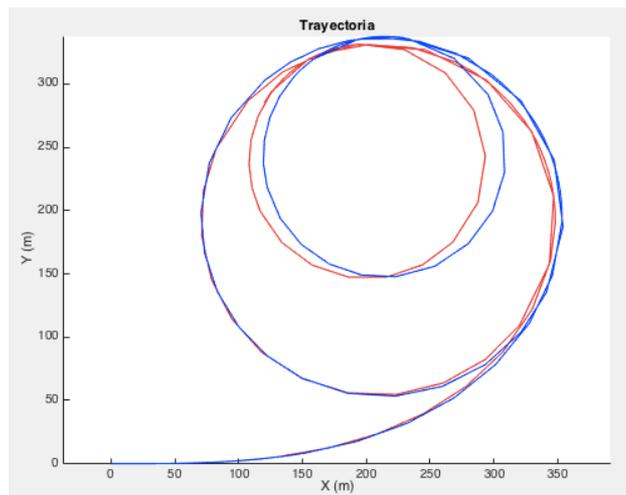


Figura B-1. Trayectoria en RRT de vehículos pequeños a baja velocidad

Ángulo de deriva frente a tiempo:

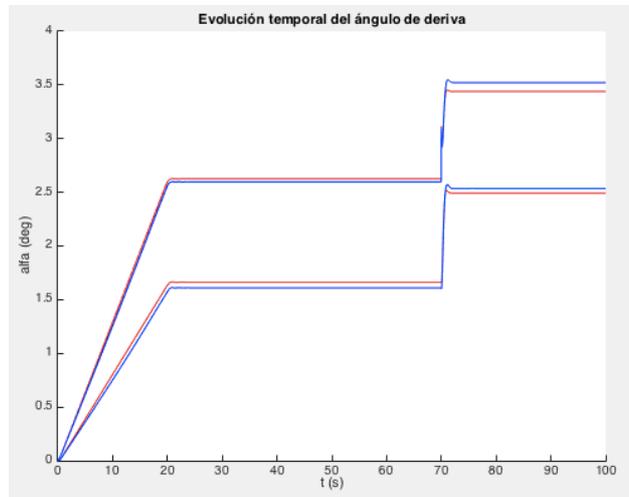


Figura B-2. Ángulo de deriva en RRT de vehículos pequeños a baja velocidad

Fuerza Lateral frente a Tiempo:

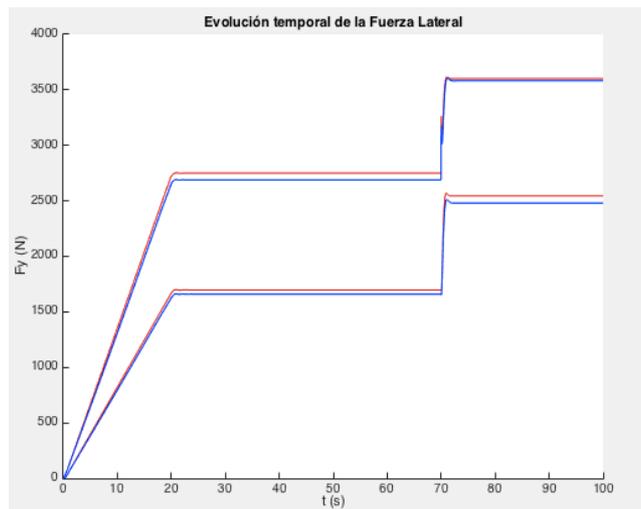


Figura B-3. Fuerza lateral en RRT de vehículos pequeños a baja velocidad

Aceleración Lateral frente a Tiempo

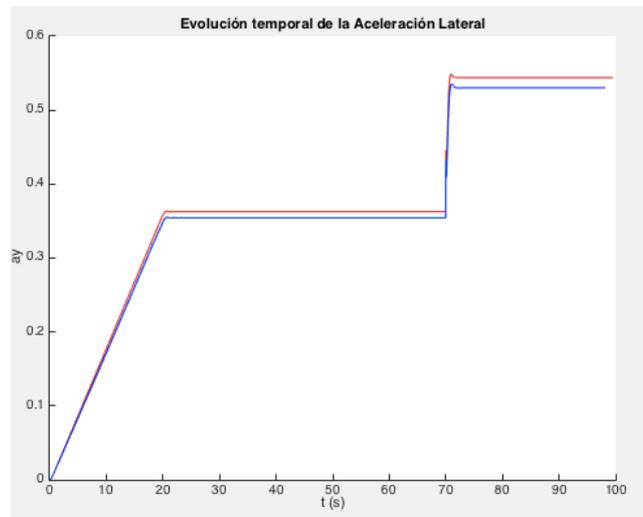


Figura B-4. Fuerza lateral en RRT de vehículos pequeños a baja velocidad

Velocidad alta:

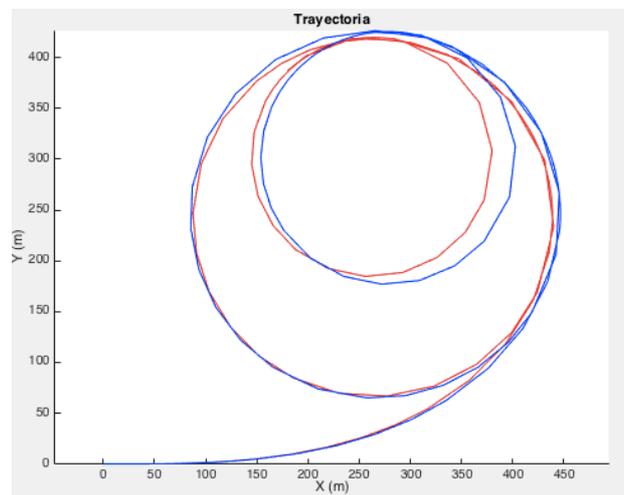


Figura B-5. Trayectoria en RRT de vehículos pequeños a alta velocidad

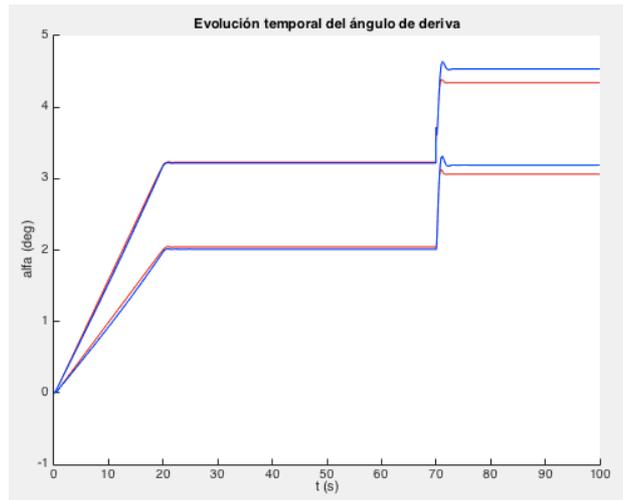


Figura B-6. Ángulo de deriva en RRT de vehículos pequeños a alta velocidad

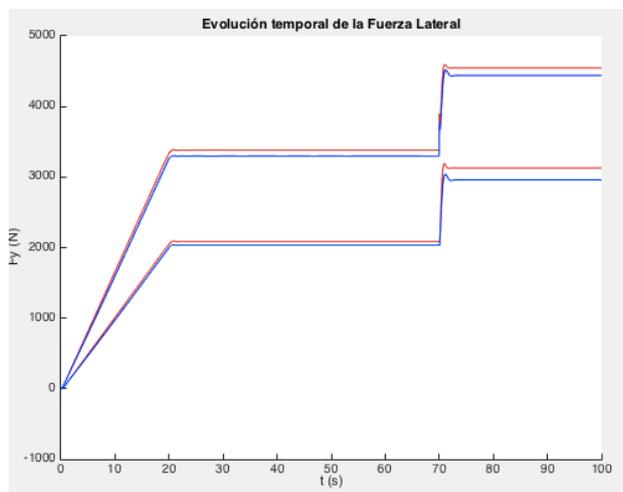


Figura B-7. Fuerza Lateral en RRT de vehículos pequeños a alta velocidad

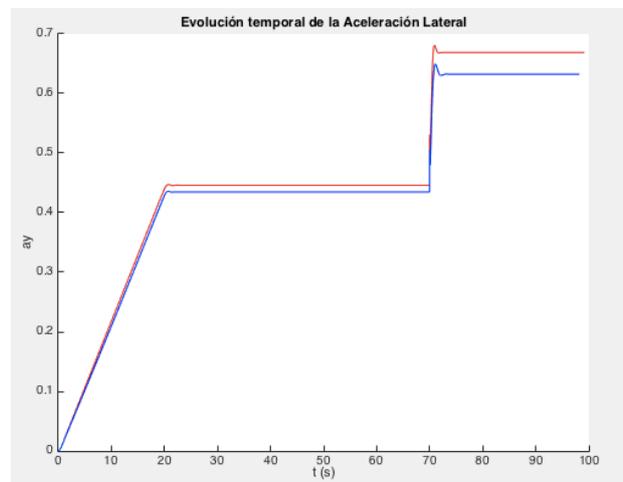


Figura B-8. Aceleración lateral en RRT de vehículos pequeños a alta velocidad

**Vehículo Mediano**

Velocidad baja

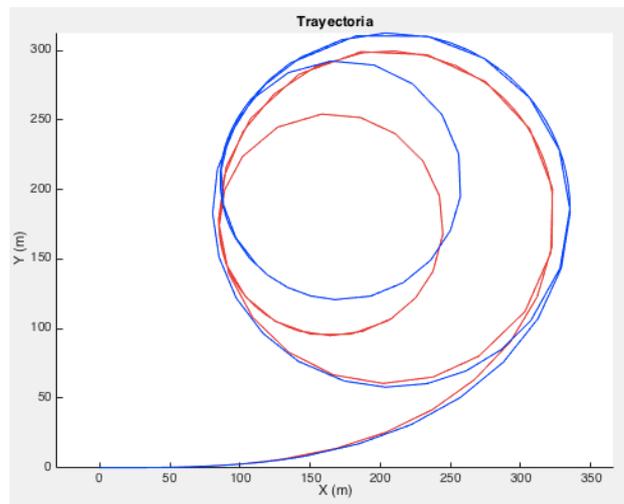


Figura B-9. Trayectoria en RRT para vehículos medianos a baja velocidad

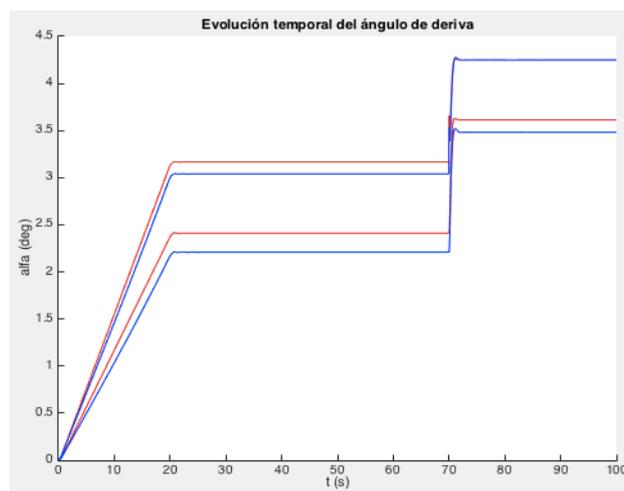


Figura B-10. Ángulo de deriva en RRT para vehículos medianos a baja velocidad

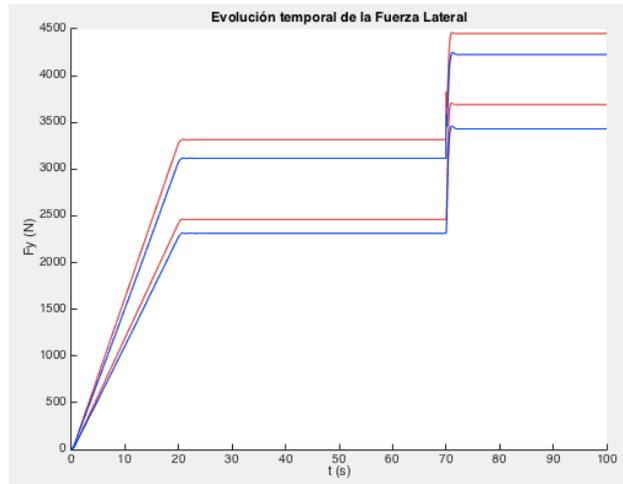


Figura B-11. Fuerza lateral en RRT para vehículos medianos a baja velocidad

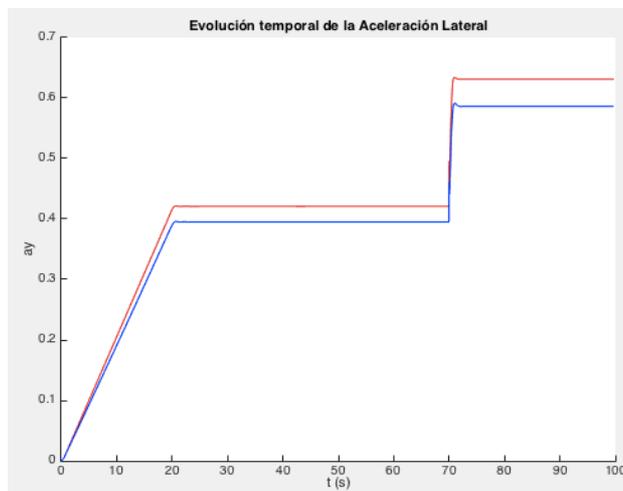


Figura B-12. Aceleración lateral en RRT para vehículos medianos a baja velocidad

Velocidad alta

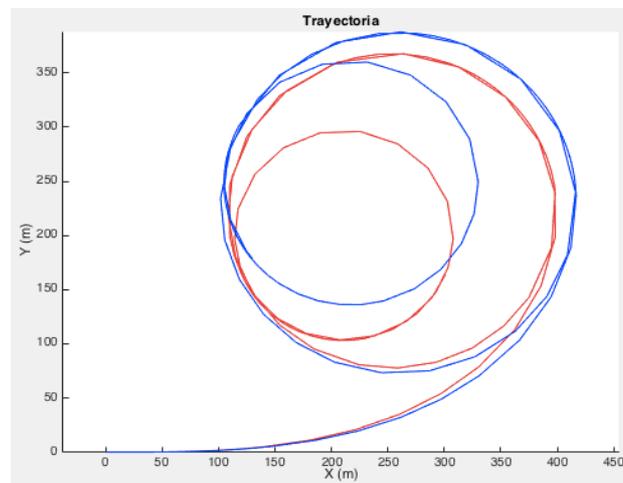


Figura B-13. Trayectoria en RRT para vehículos medianos a alta velocidad

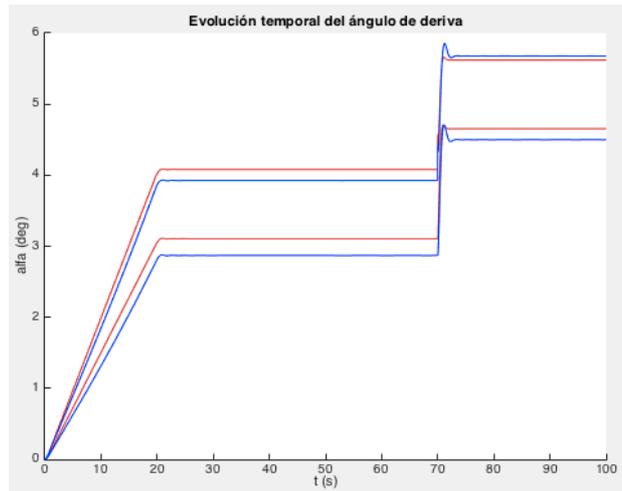


Figura B-14. Ángulo de deriva en RRT para vehículos medianos a alta velocidad

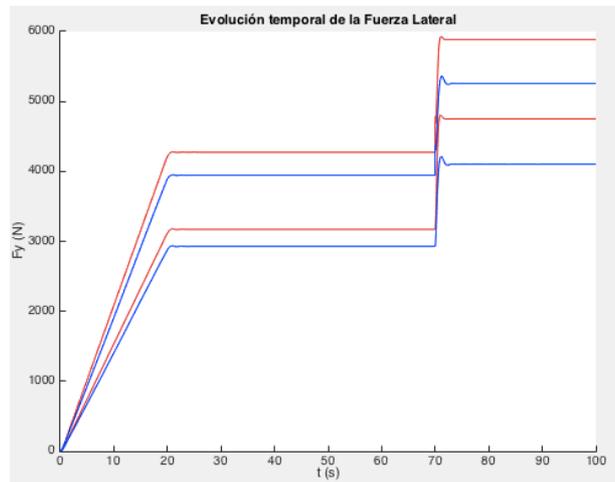


Figura B-15. Fuerza lateral en RRT para vehículos medianos a alta velocidad

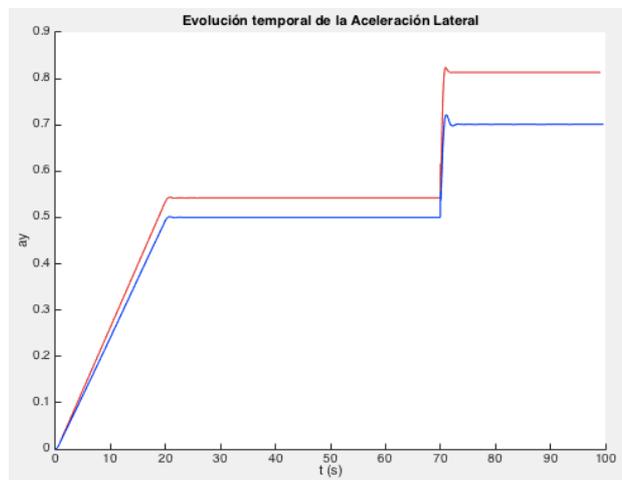


Figura B-16. Aceleración lateral en RRT para vehículos medianos a alta velocidad

### Vehículos deportivos

Velocidad baja

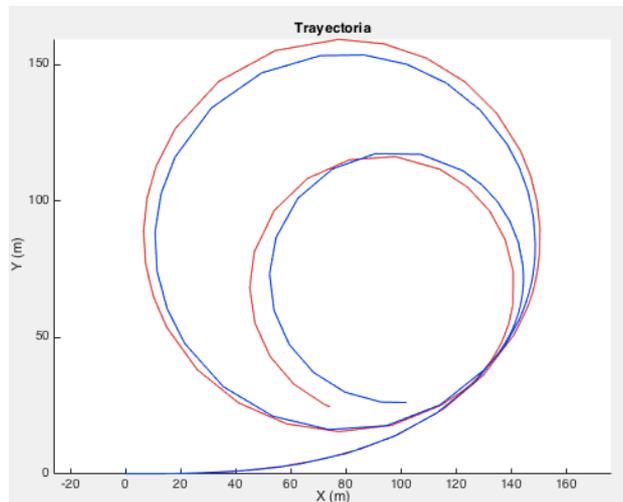


Figura B-17. Trayectoria en RRT para vehículos deportivos a baja velocidad

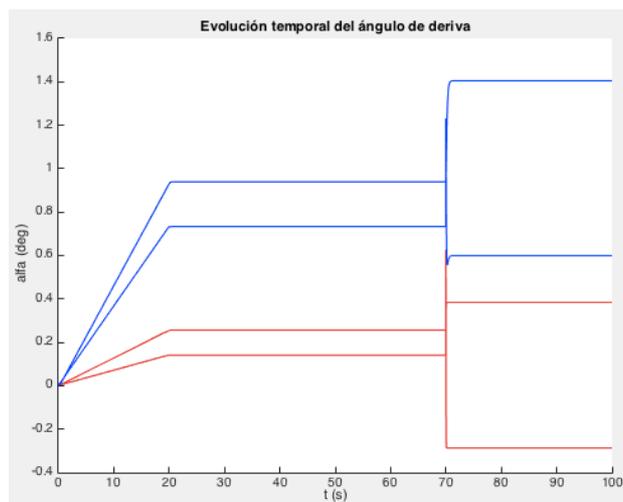


Figura B-18. Ángulo de deriva en RRT para vehículos deportivos a baja velocidad

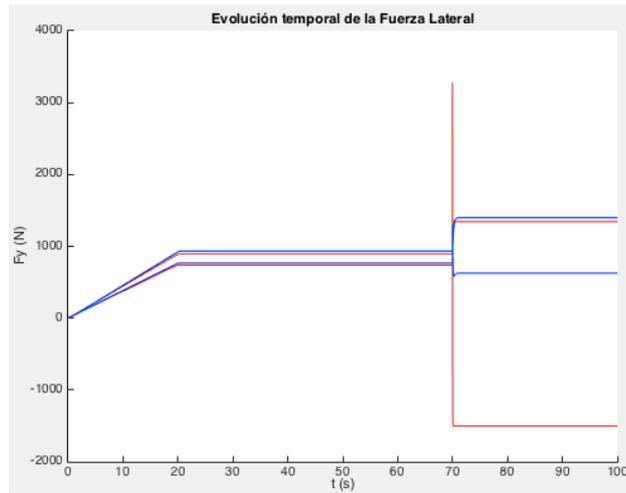


Figura B-19. Fuerza lateral en RRT para vehículos deportivos a baja velocidad

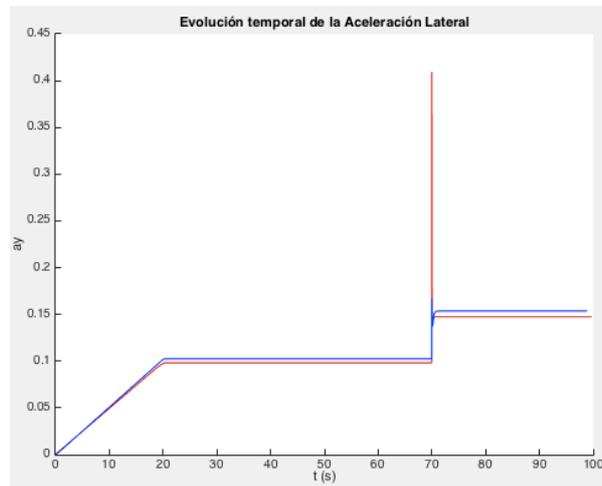


Figura B-20. Aceleración lateral en RRT para vehículos deportivos a baja velocidad

Velocidad alta

Inestabilidad a partir de 50 km/h aproximadamente

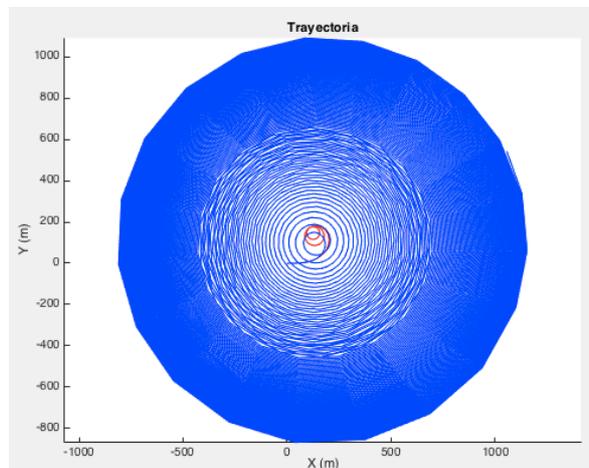


Figura B-21. Trayectoria en RRT para vehículos deportivos a alta velocidad (50km/h)

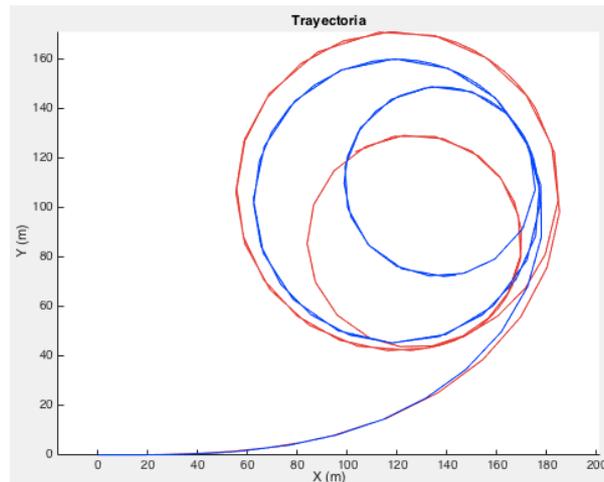


Figura B-22. Trayectoria en RRT para vehículos deportivos a alta velocidad

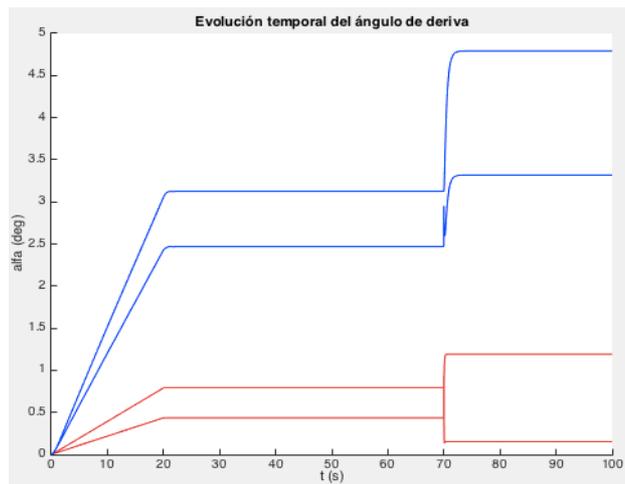


Figura B-23. Ángulo de deriva en RRT para vehículos deportivos a alta velocidad

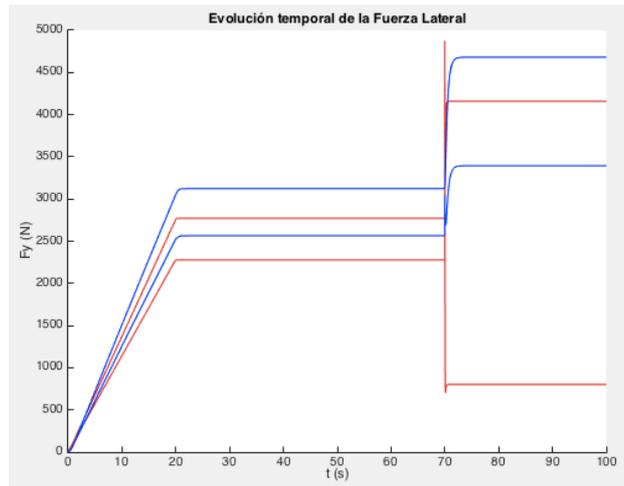


Figura B.24. Fuerza lateral en RRT para vehículos deportivos a alta velocidad

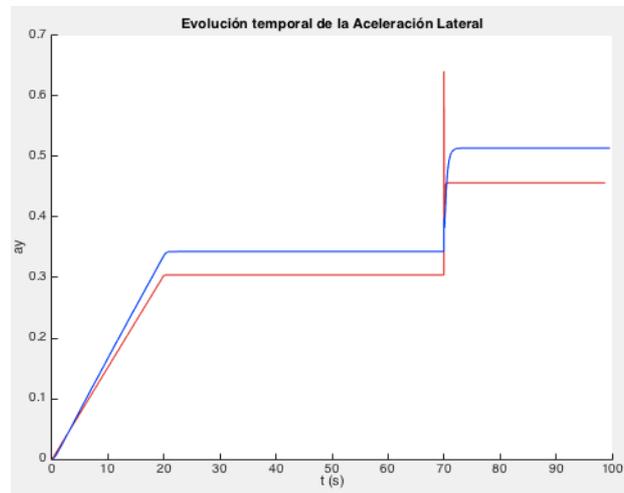


Figura B-25. Aceleración lateral en RRT para vehículos deportivos a alta velocidad

## Furgoneta

Velocidad baja

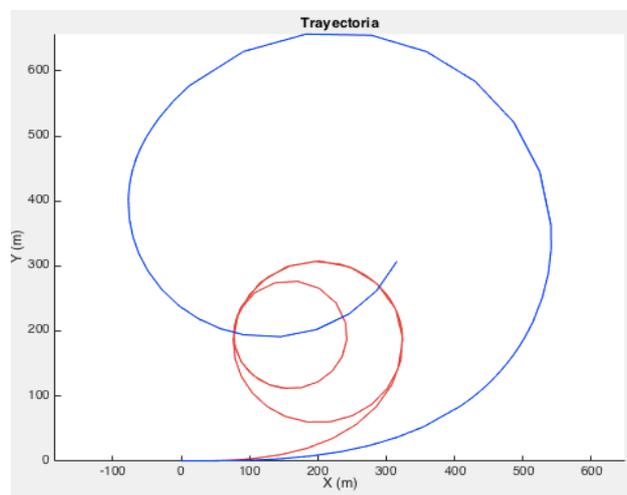


Figura B-26. Trayectoria en RRT para furgonetas a velocidad baja

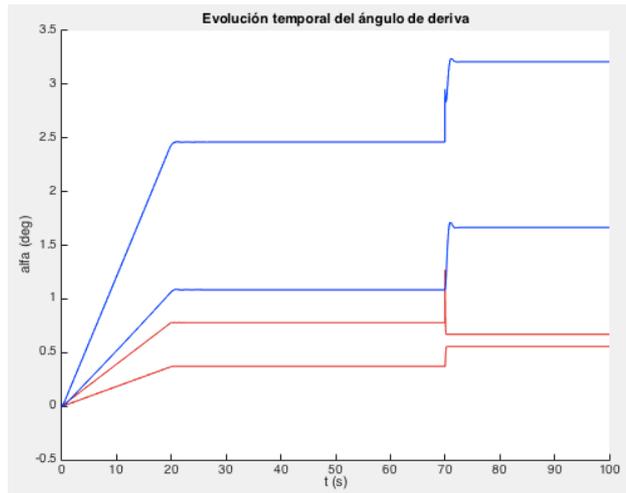


Figura B-27. Ángulo de deriva en RRT para furgonetas a velocidad baja

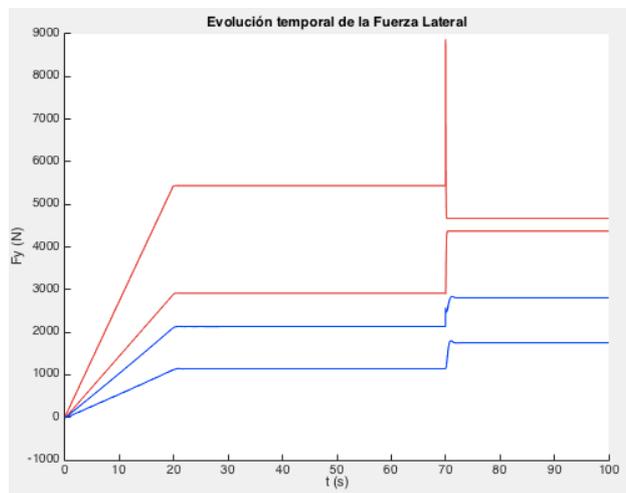


Figura B-28. Fuerza lateral en RRT para furgonetas a velocidad baja

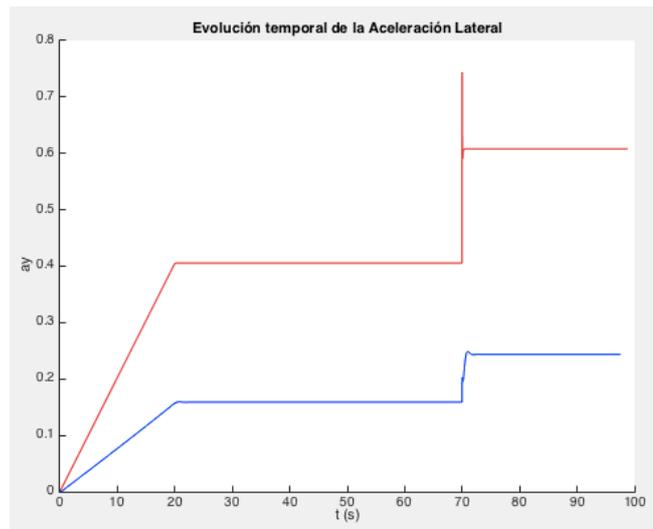


Figura B-29. Aceleración lateral en RRT para furgonetas a velocidad baja

Velocidad alta

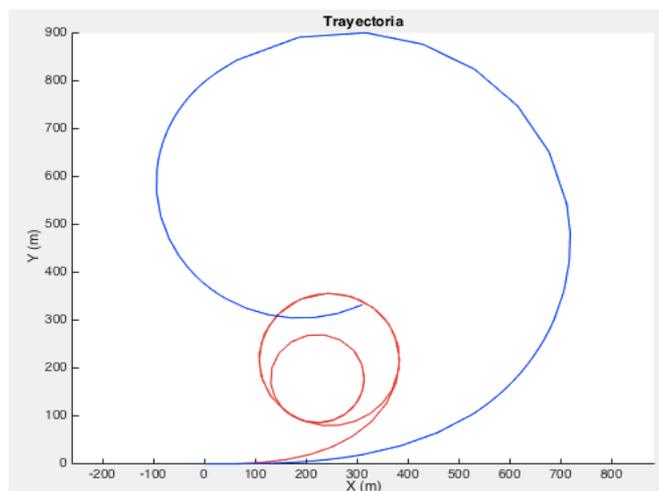


Figura B-30. Trayectoria en RRT para furgonetas a velocidad alta

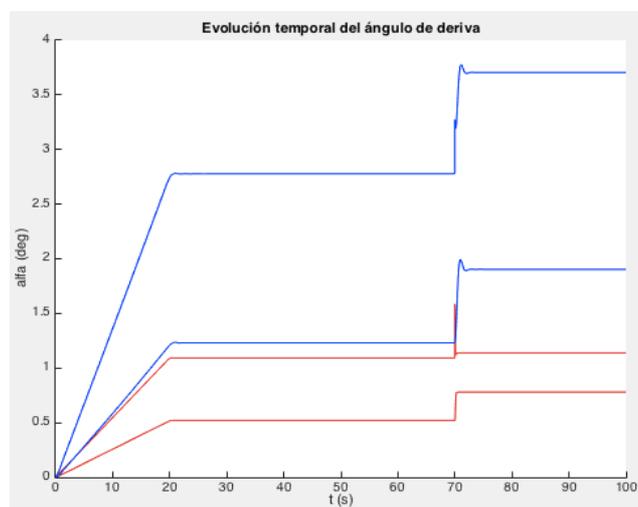


Figura B-31. Ángulo de deriva en RRT para furgonetas a velocidad alta

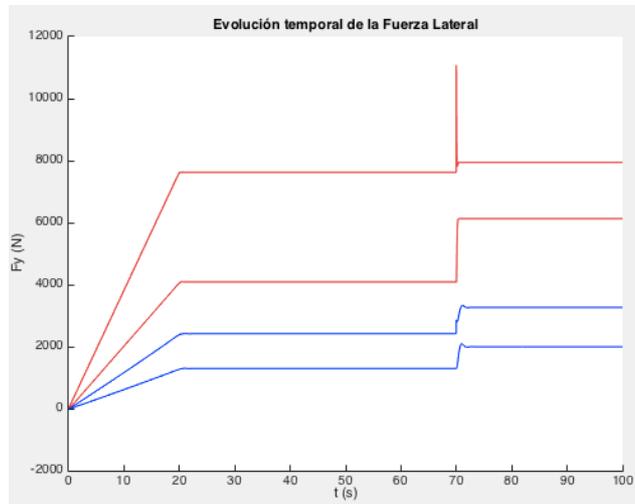


Figura B-32. Fuerza lateral en RRT para furgonetas a velocidad alta

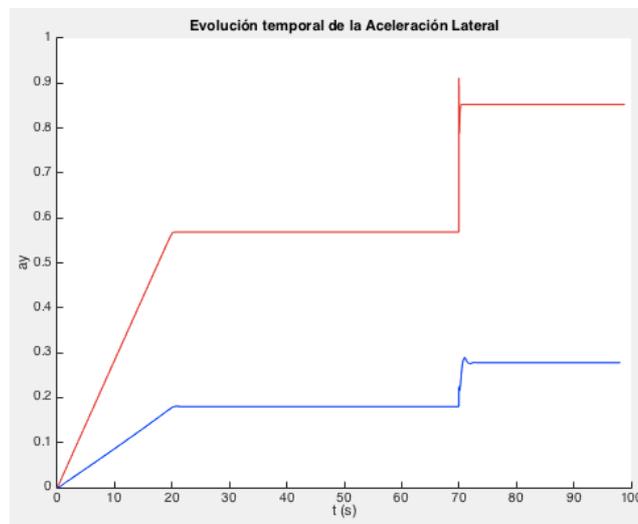


Figura B-33. Aceleración lateral en RRT para furgonetas a velocidad alta

## Escalón

### Vehículo pequeño

Velocidad baja

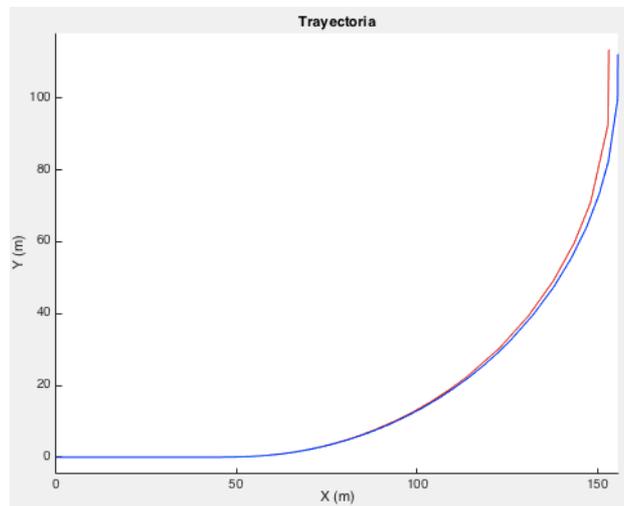


Figura B-34. Trayectorias en la maniobra escalón para vehículos pequeños a baja velocidad

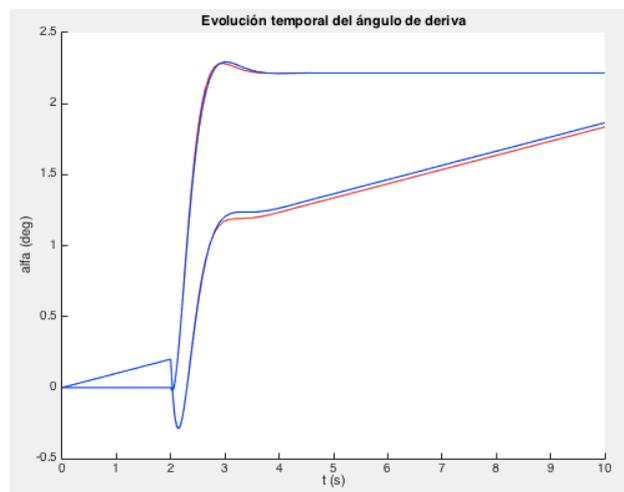


Figura B-35. Ángulo de deriva en la maniobra escalón para vehículos pequeños a baja velocidad

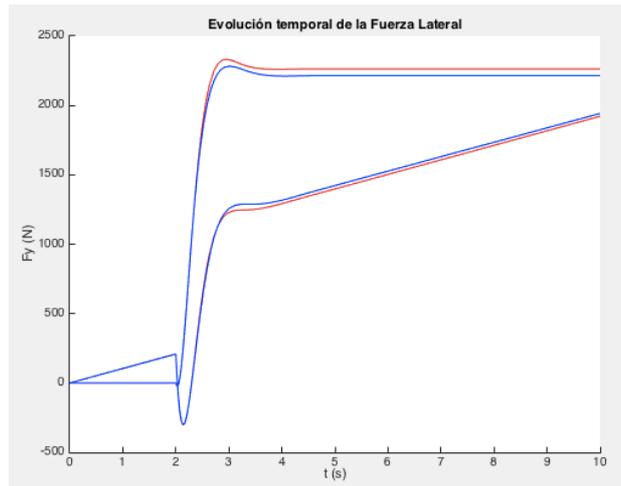


Figura B-36. Fuerza lateral en la maniobra escalón para vehículos pequeños a baja velocidad

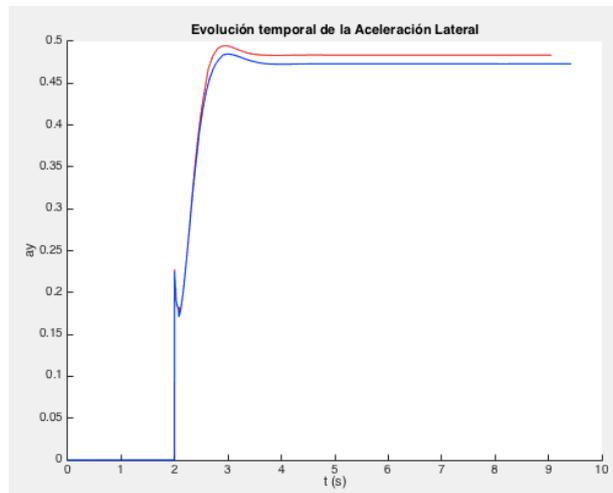


Figura B-37. Aceleración lateral en la maniobra escalón para vehículos pequeños a baja velocidad

Velocidad alta

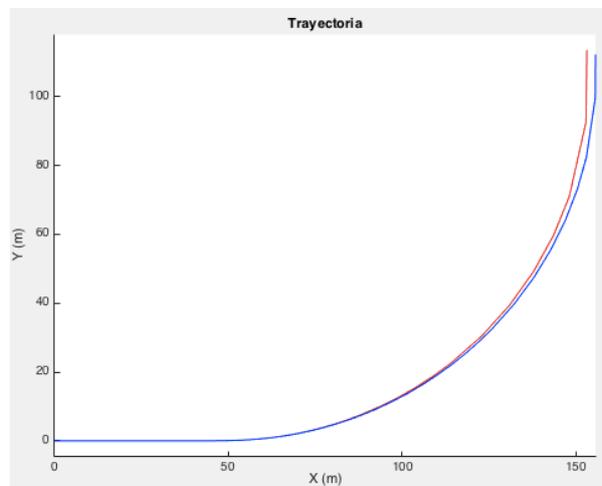


Figura B-38. Trayectorias en la maniobra escalón para vehículos pequeños a alta velocidad

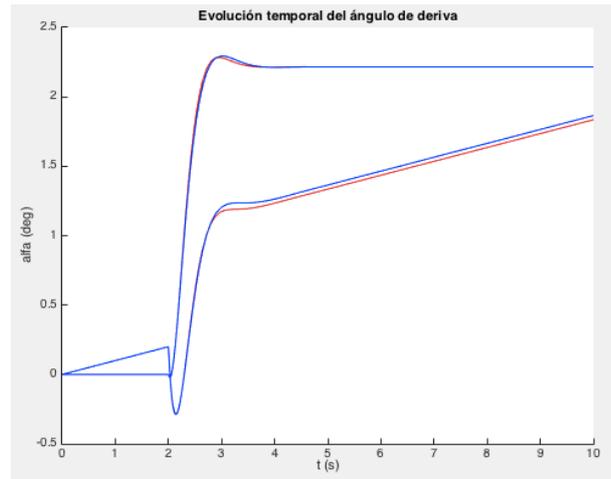


Figura B-39. Ángulo de deriva en la maniobra escalón para vehículos pequeños a alta velocidad

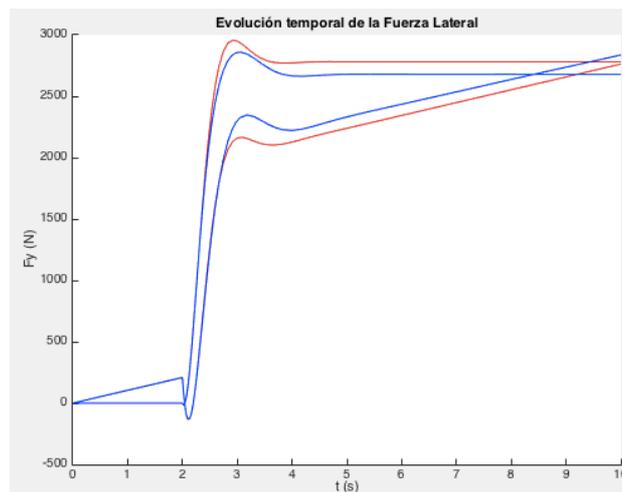


Figura B-40. Fuerza lateral en la maniobra escalón para vehículos pequeños a alta velocidad

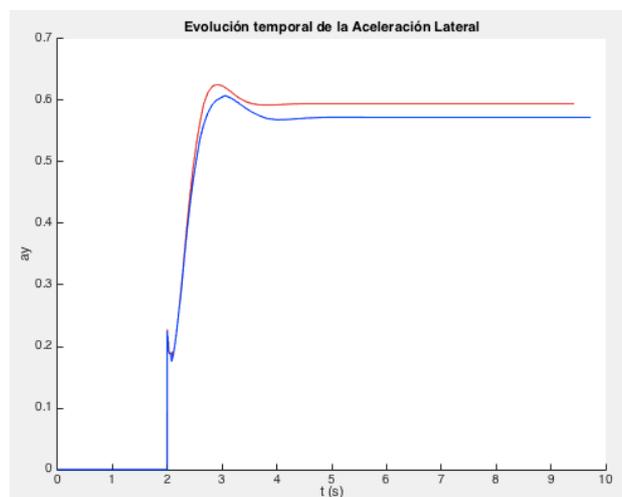


Figura B-41. Aceleración lateral en la maniobra escalón para vehículos pequeños a alta velocidad

**Vehículos medianos**

Velocidad baja

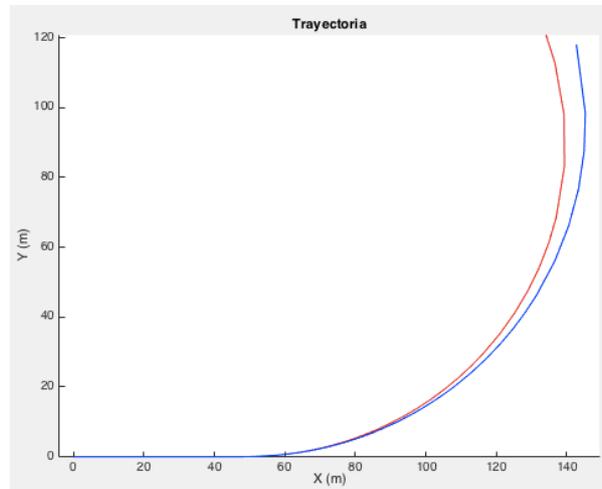


Figura B-42. Trayectoria en la maniobra escalón para vehículos medianos a baja velocidad

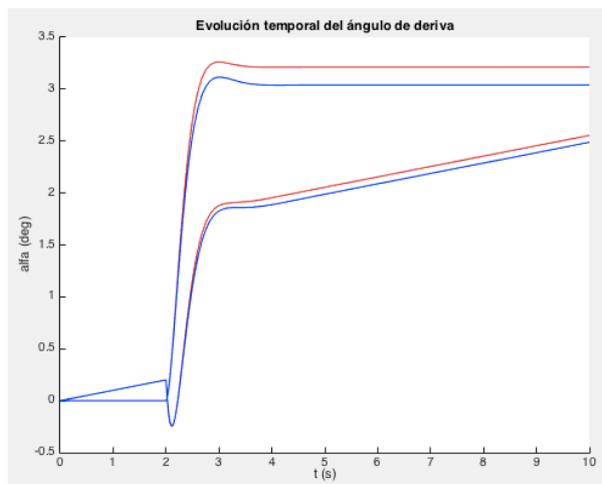


Figura B-43. Ángulo de deriva en la maniobra escalón para vehículos medianos a baja velocidad

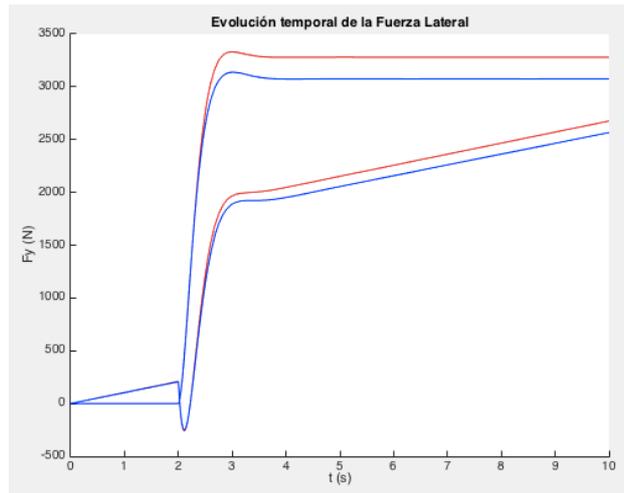


Figura B-44. Fuerza lateral en la maniobra escalón para vehículos medianos a baja velocidad

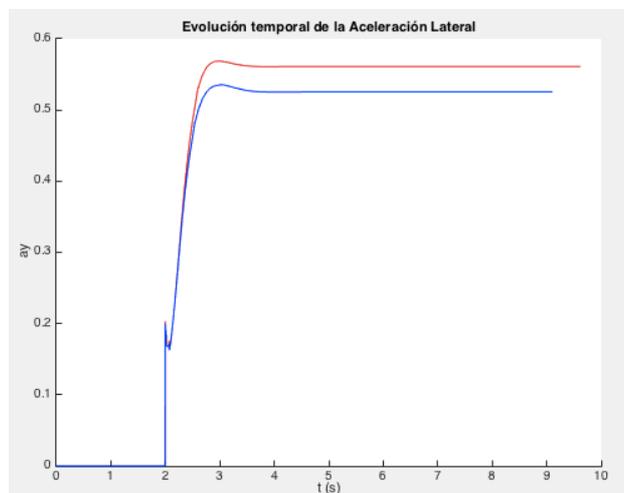


Figura B-45. Aceleración lateral en la maniobra escalón para vehículos medianos a baja velocidad

Velocidad alta

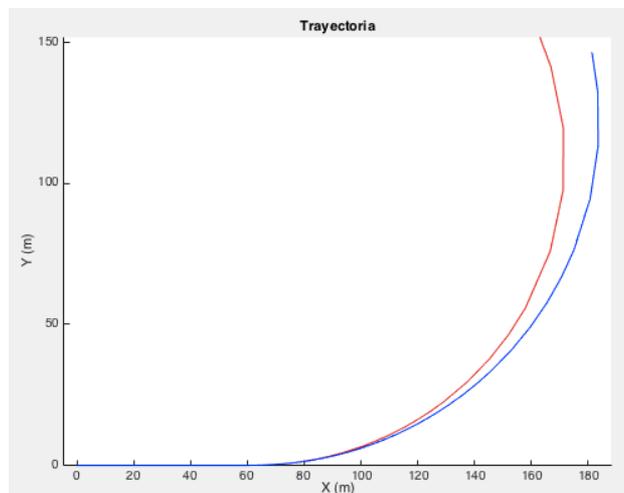


Figura B-46. Trayectoria en la maniobra escalón para vehículos medianos a alta velocidad

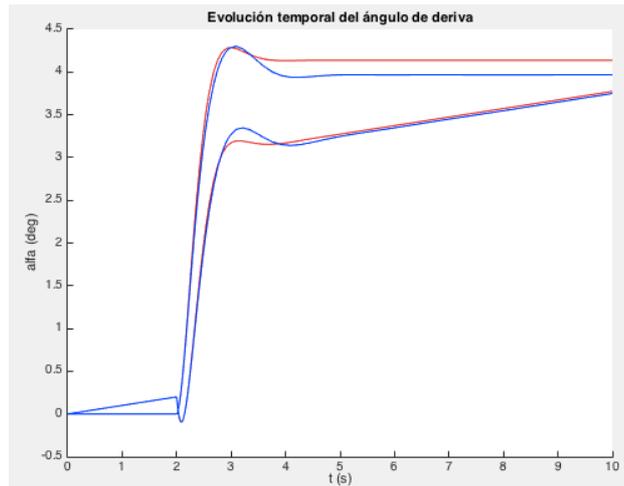


Figura B-47. Ángulo de deriva en la maniobra escalón para vehículos medianos a alta velocidad

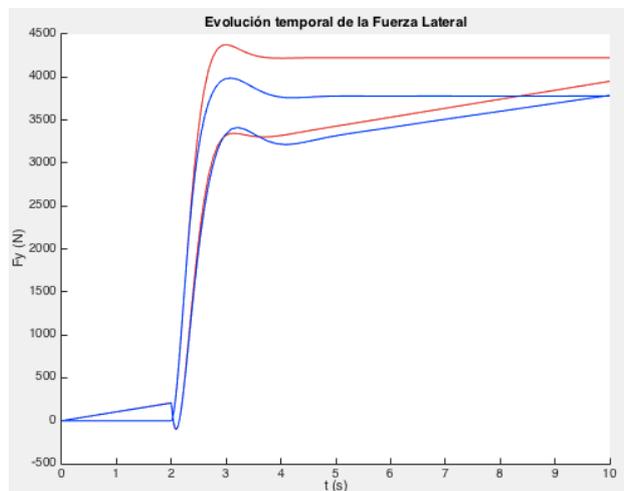


Figura B-48. Fuerza lateral en la maniobra escalón para vehículos medianos a alta velocidad

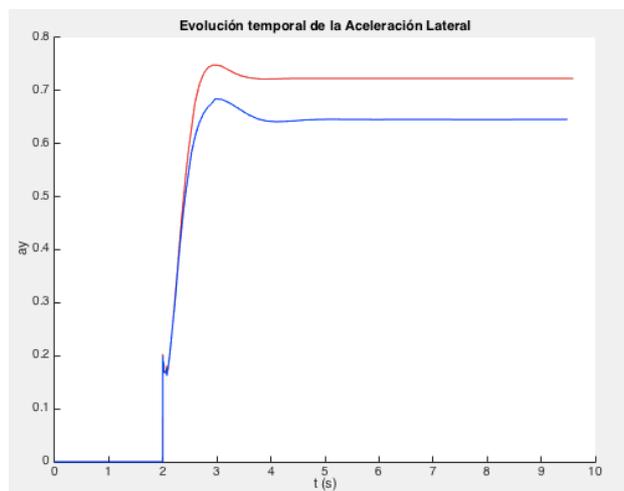


Figura B-49. Aceleración lateral en la maniobra escalón para vehículos medianos a alta velocidad

**Vehículos deportivos**

Velocidad baja

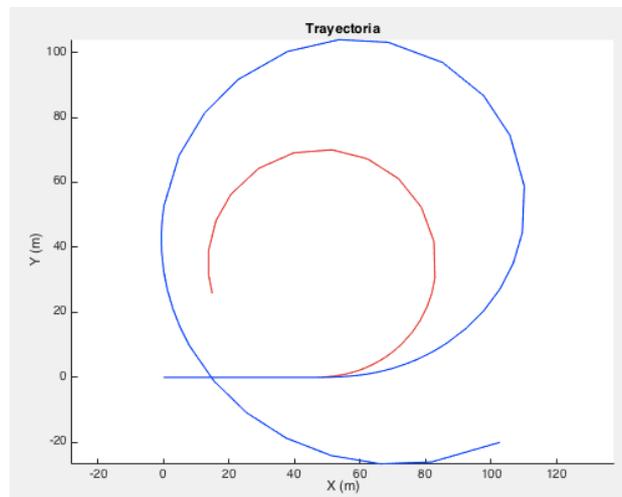


Figura B-50. Trayectoria en maniobra escalón para vehículos deportivos a baja velocidad

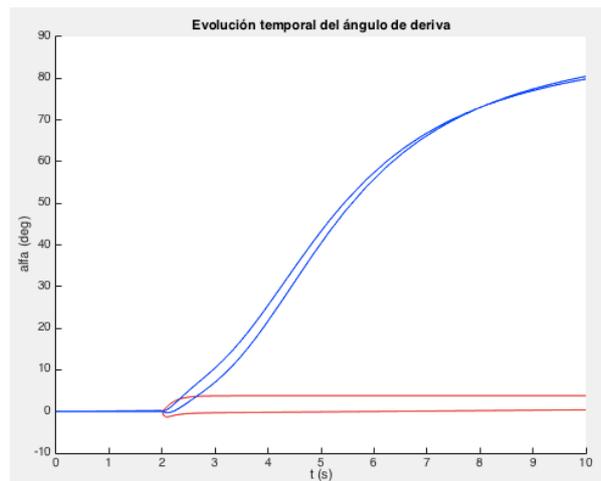


Figura B-51. Ángulo de deriva en maniobra escalón para vehículos deportivos a baja velocidad

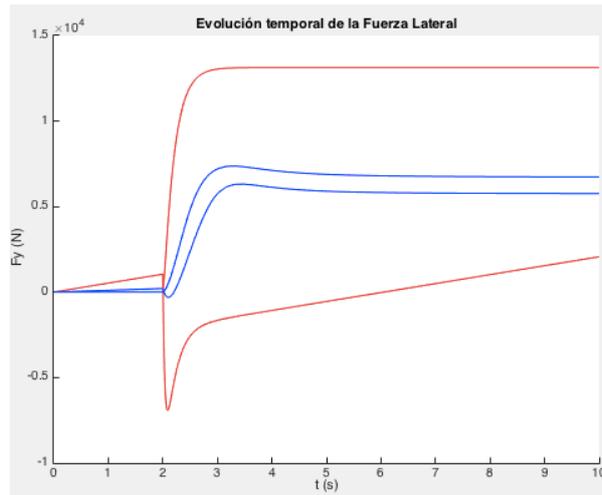


Figura B-52. Fuerza lateral en maniobra escalón para vehículos deportivos a baja velocidad

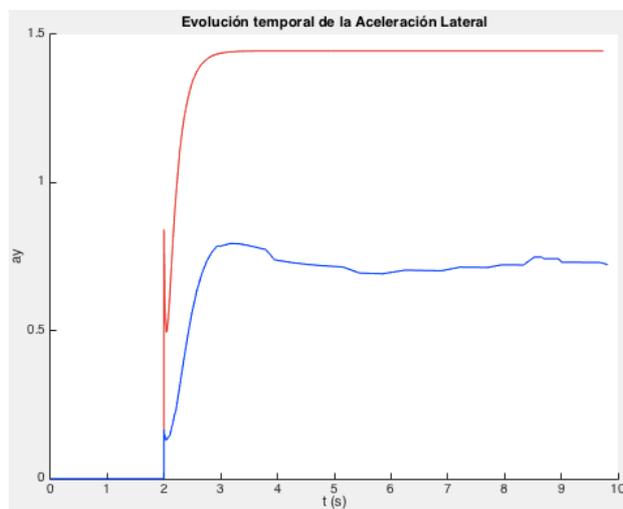


Figura B-53. Aceleración lateral en maniobra escalón para vehículos deportivos a baja velocidad

Velocidad alta

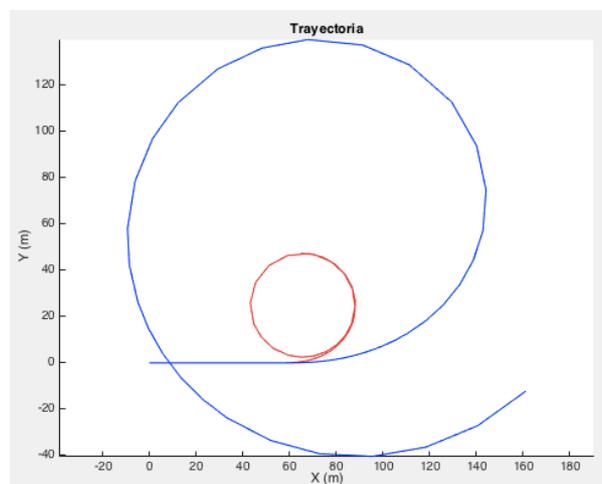


Figura B- 54. Trayectoria en maniobra escalón para vehículos deportivos a alta velocidad

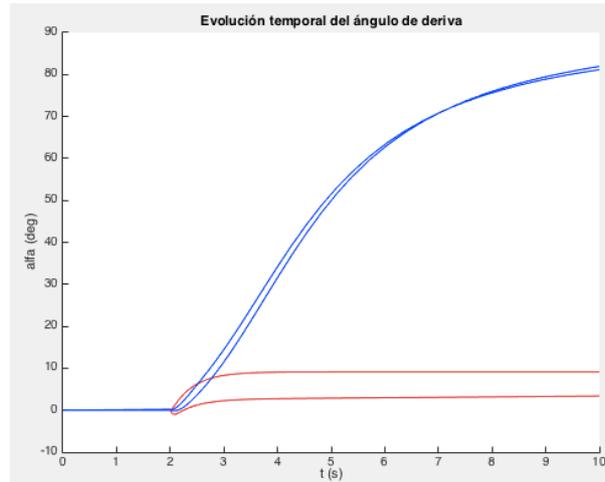


Figura B-55. Ángulo de deriva en maniobra escalón para vehículos deportivos a alta velocidad

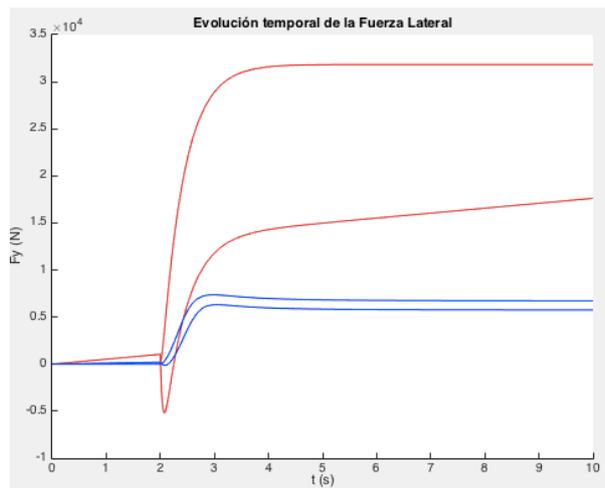


Figura B-56. Fuerza lateral en maniobra escalón para vehículos deportivos a alta velocidad

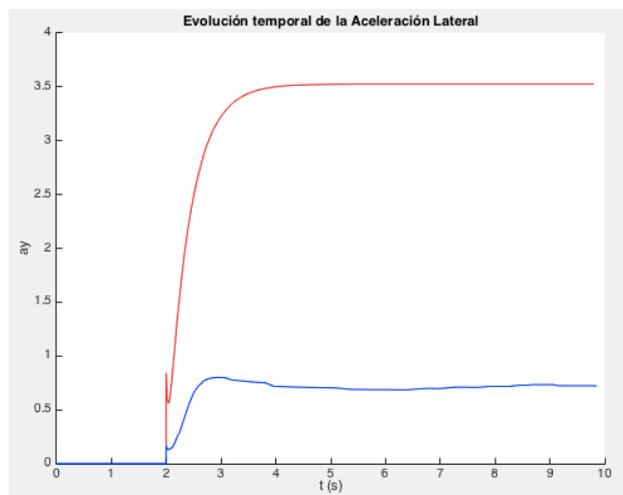


Figura B-57. Aceleración lateral en maniobra escalón para vehículos deportivos a alta velocidad

**Furgonetas**

Velocidad baja

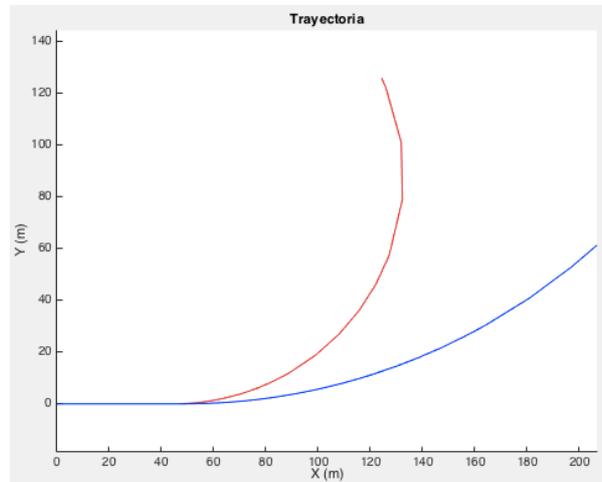


Figura B-58. Trayectoria en maniobra escalón para furgonetas a baja velocidad

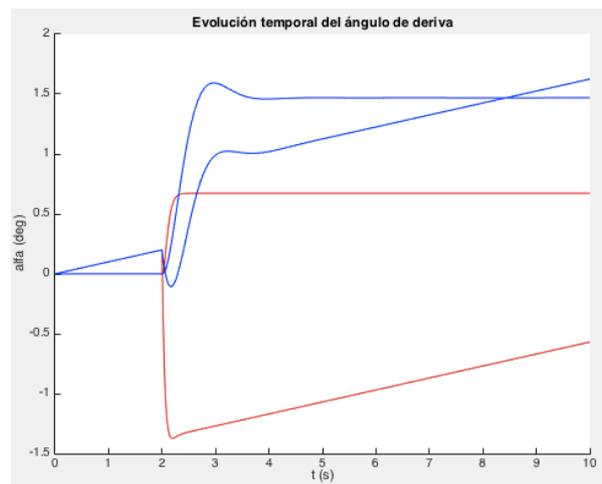


Figura B-59. Ángulo de deriva en maniobra escalón para furgonetas a baja velocidad

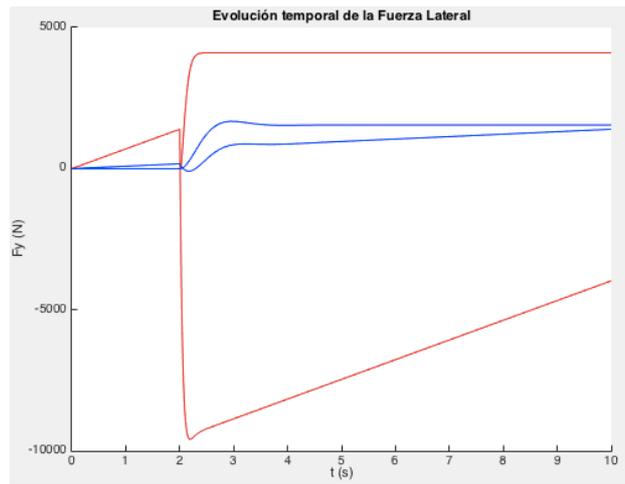


Figura B-60. Fuerza lateral en maniobra escalón para furgonetas a baja velocidad

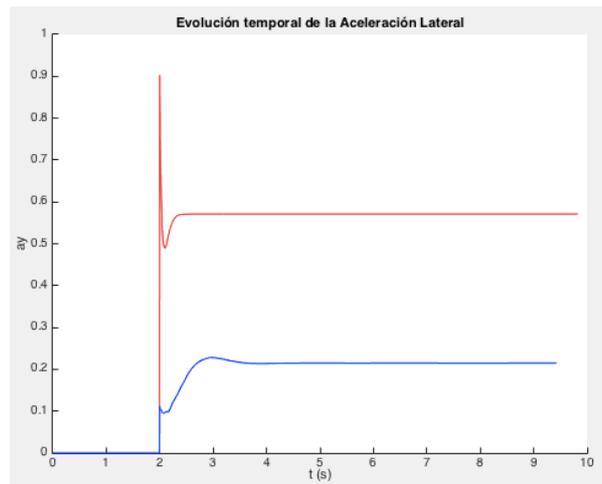


Figura B-61. Aceleración lateral en maniobra escalón para furgonetas a baja velocidad

Velocidad alta

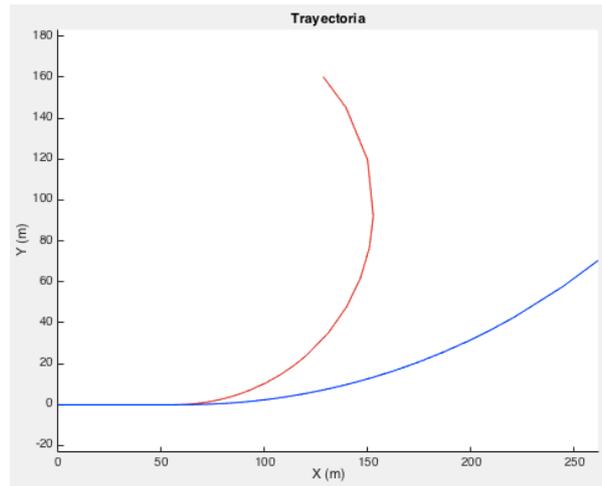


Figura B-62. Trayectoria en maniobra escalón para furgonetas a alta velocidad

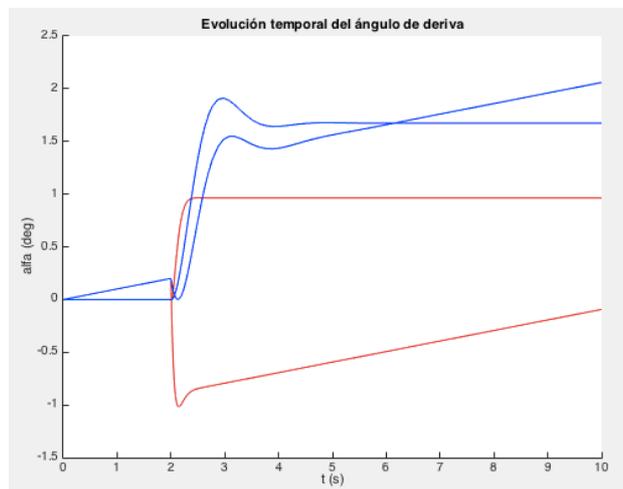


Figura B-63. Ángulo de deriva en maniobra escalón para furgonetas a alta velocidad

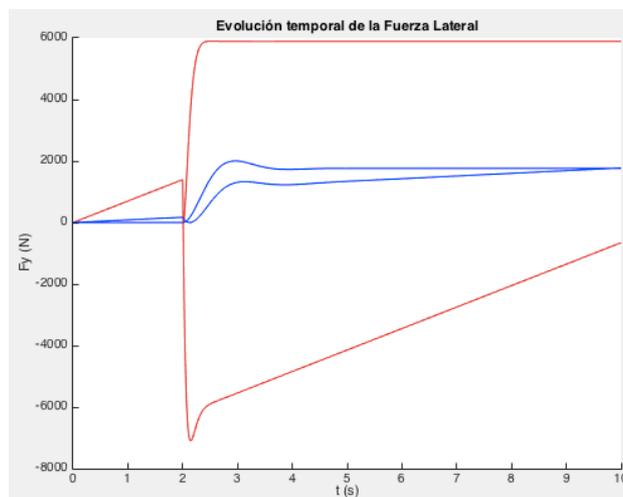


Figura B-64. Fuerza lateral en maniobra escalón para furgonetas a alta velocidad

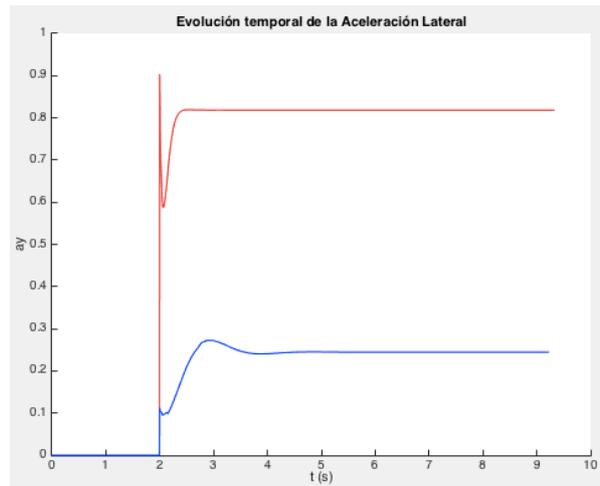


Figura B-65. Aceleración lateral en maniobra escalón para furgonetas a alta velocidad

## Sine with Dwell

### Vehículos pequeños

Velocidad baja

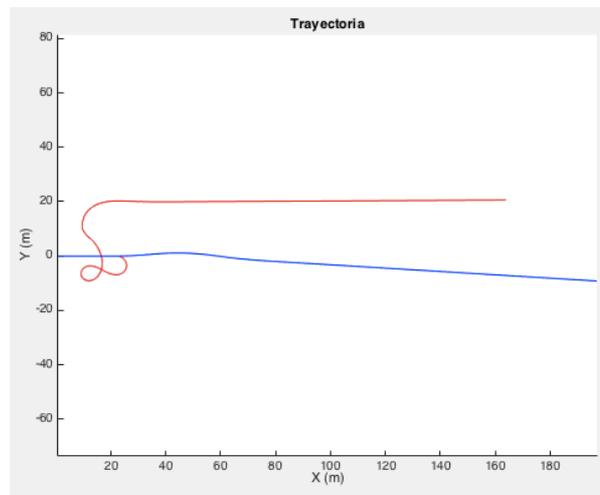


Figura B-66. Trayectoria en SwD para vehículos pequeños a baja velocidad

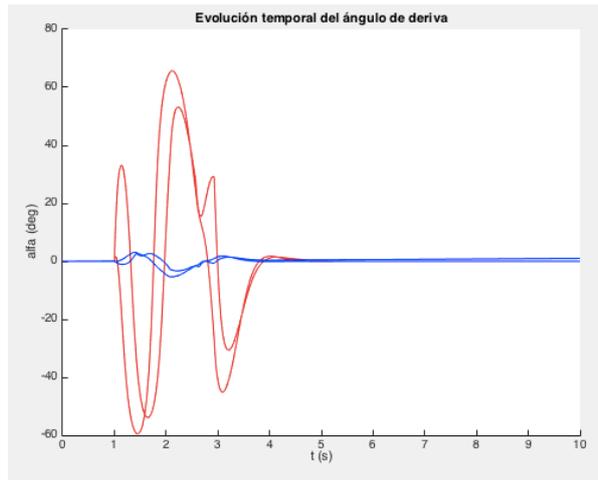


Figura B-67. Ángulo de deriva en SwD para vehículos pequeños a baja velocidad

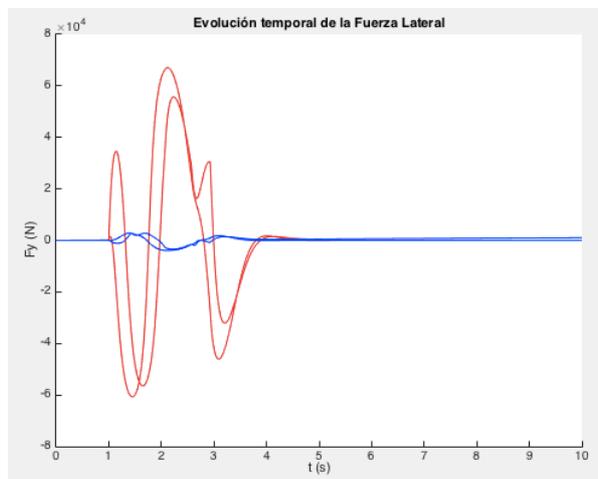


Figura B-68. Fuerza lateral en SwD para vehículos pequeños a baja velocidad

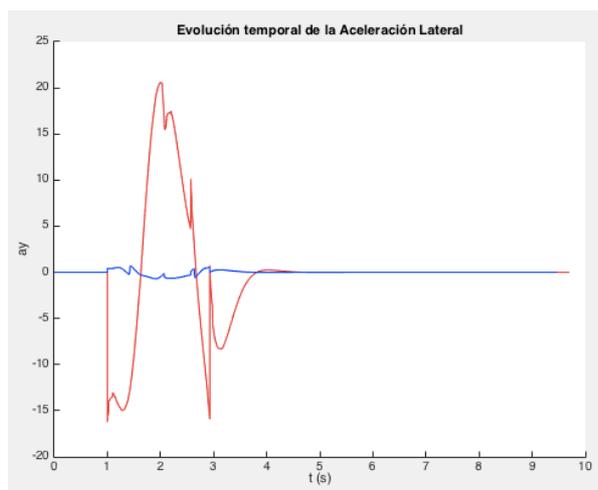


Figura B-69. Aceleración lateral en SwD para vehículos pequeños a baja velocidad

## Velocidad alta

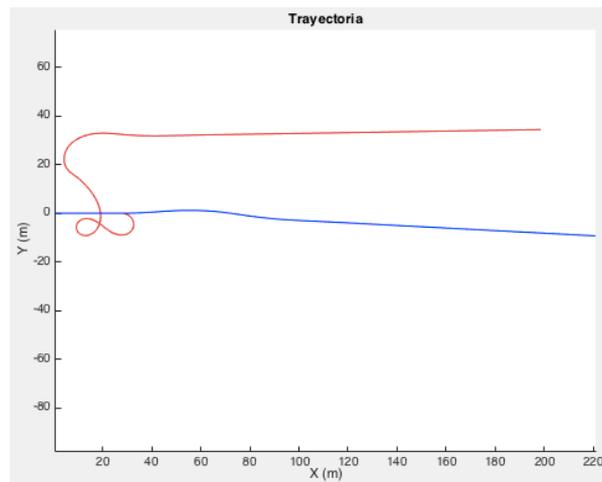


Figura B-70. Trayectoria en SwD para vehículos pequeños a alta velocidad

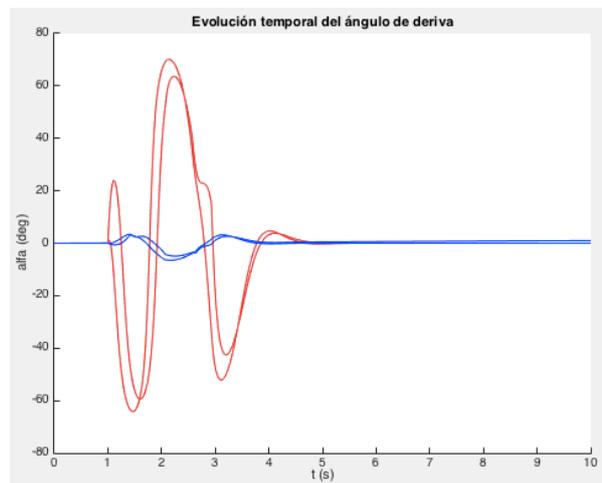


Figura B-71. Ángulo de deriva en SwD para vehículos pequeños a alta velocidad

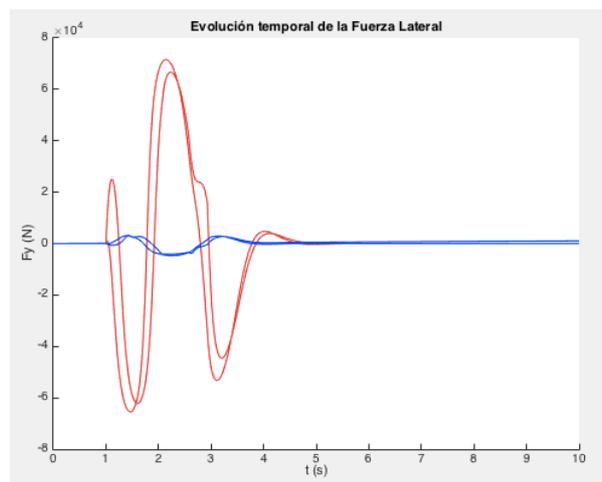


Figura B-72. Trayectoria en SwD para vehículos pequeños a alta velocidad

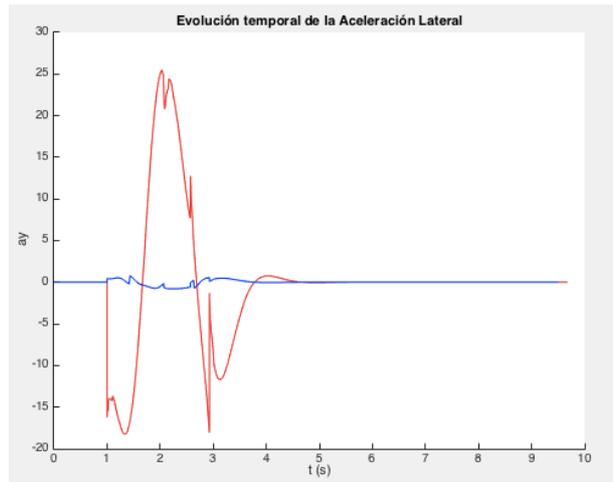


Figura B-73. Aceleración lateral en SwD para vehículos pequeños a alta velocidad

**Vehículos medianos**

Velocidad baja

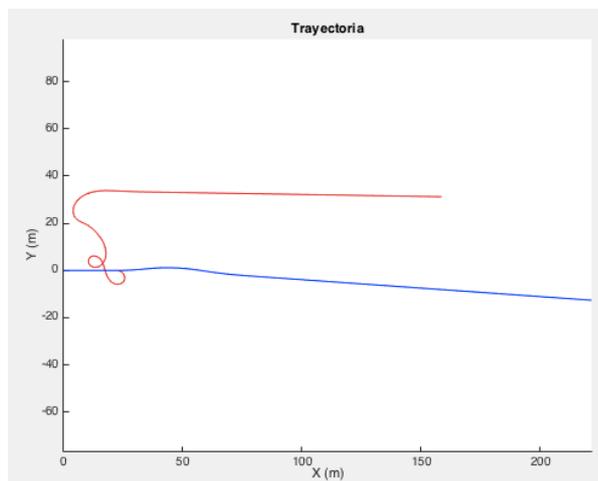


Figura B-74. Trayectoria en SwD para vehículos medianos a baja velocidad

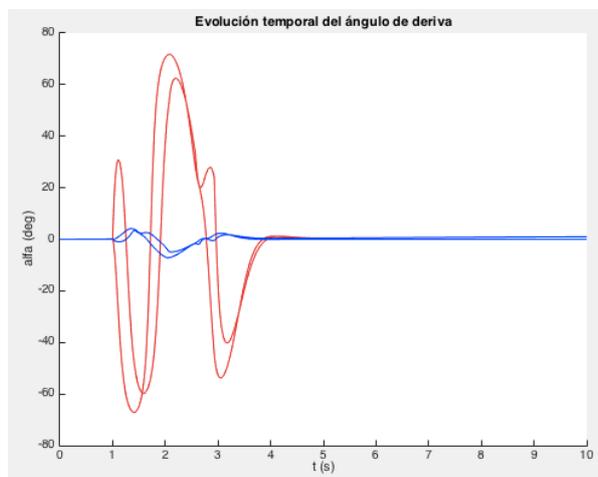


Figura B-75. Ángulo de deriva en SwD para vehículos medianos a baja velocidad

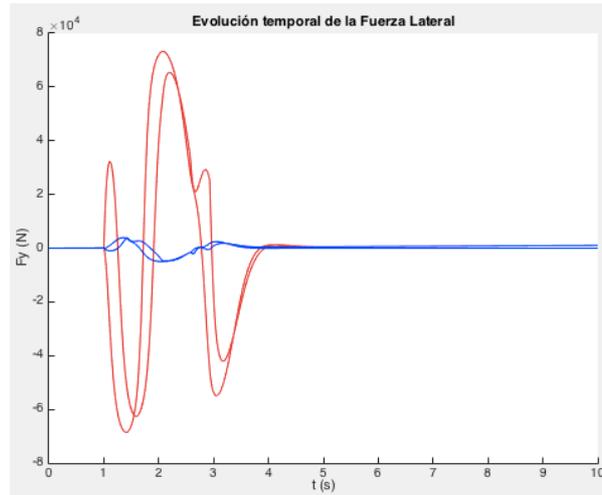


Figura B-76. Fuerza lateral en SwD para vehículos medianos a baja velocidad

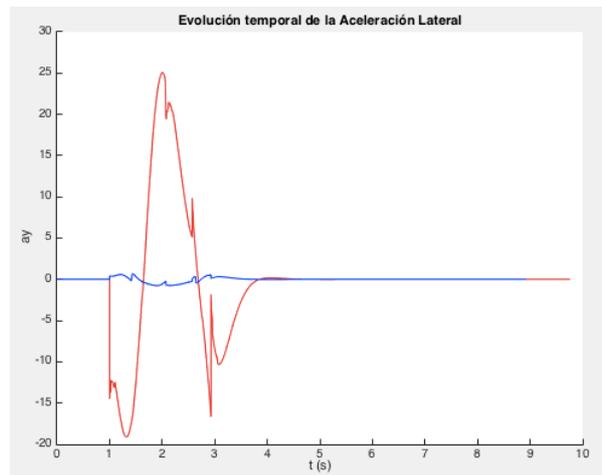


Figura B-77. Aceleración lateral en SwD para vehículos medianos a baja velocidad

Velocidad alta

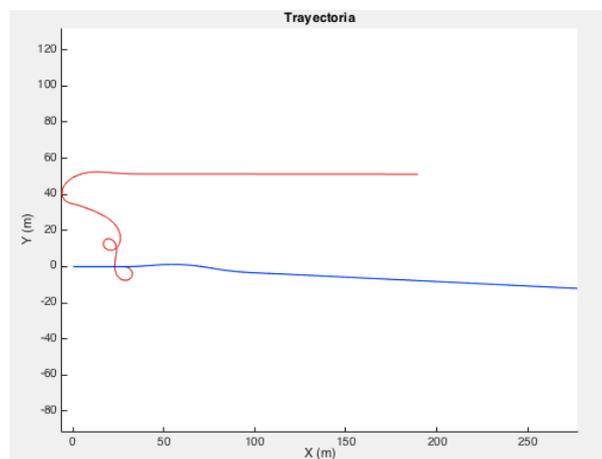


Figura B-78. Trayectoria en SwD para vehículos medianos a alta velocidad

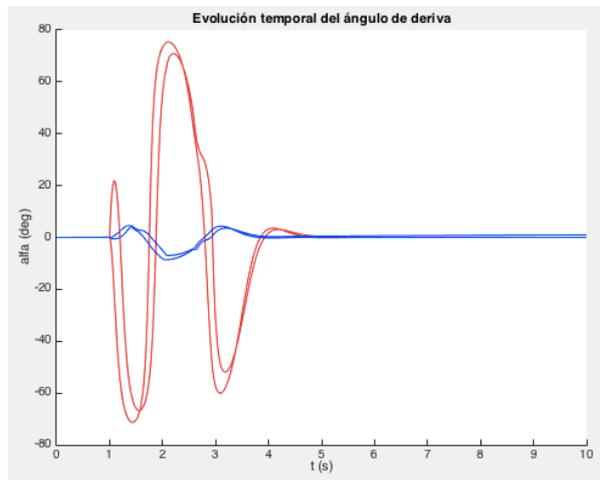


Figura B-79. Ángulo de deriva en SwD para vehículos medianos a alta velocidad

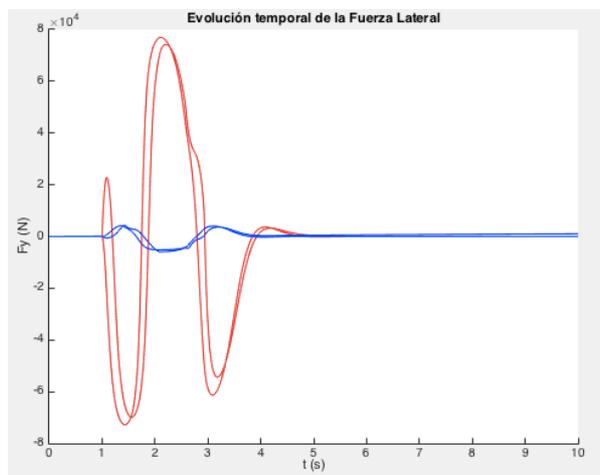


Figura B-80. Fuerza lateral en SwD para vehículos medianos a alta velocidad

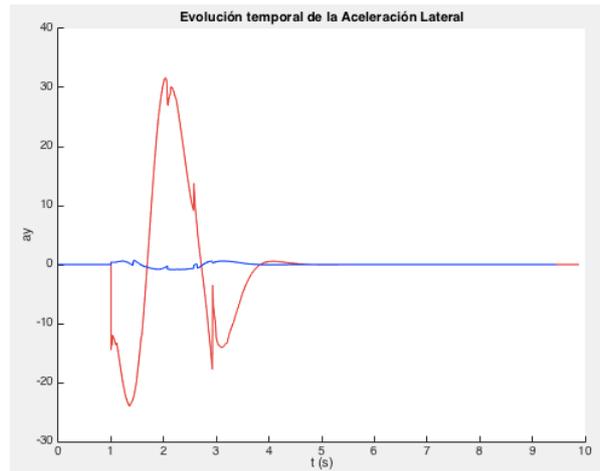


Figura B-81. Aceleración lateral en SwD para vehículos medianos a alta velocidad

## Vehículos deportivos

Velocidad baja

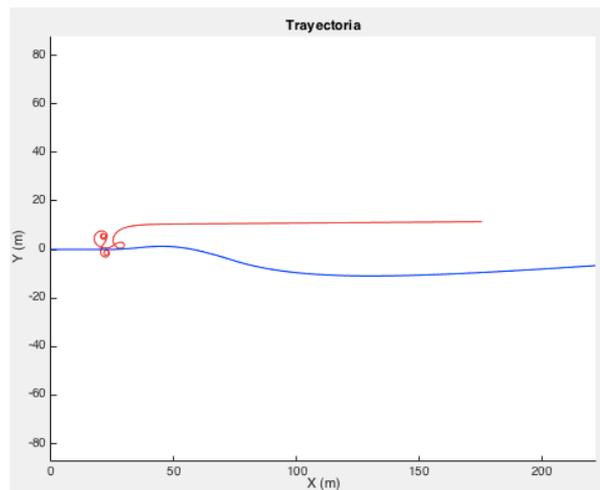


Figura B-82. Trayectoria en SwD para vehículos deportivos a baja velocidad

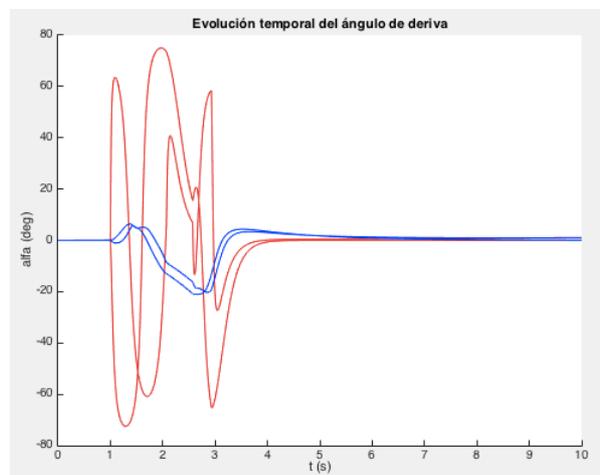


Figura B-83. Ángulo de deriva en SwD para vehículos deportivos a baja velocidad

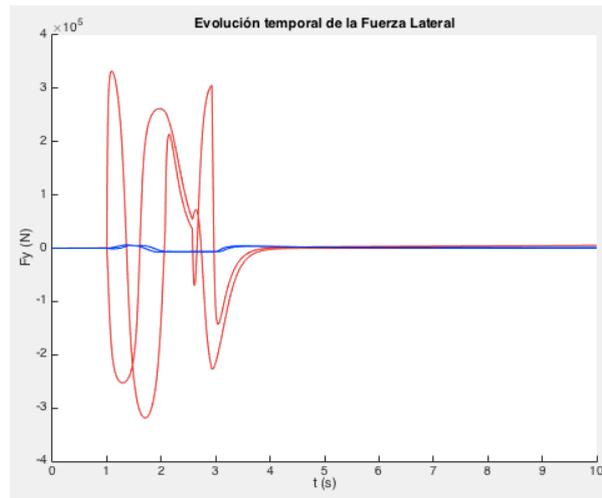


Figura B-84. Fuerza lateral en SwD para vehículos deportivos a baja velocidad

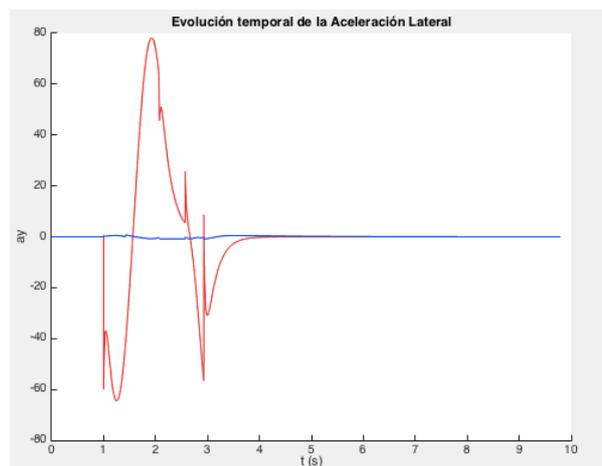


Figura B-85. Aceleración lateral en SwD para vehículos deportivos a baja velocidad

Velocidad alta

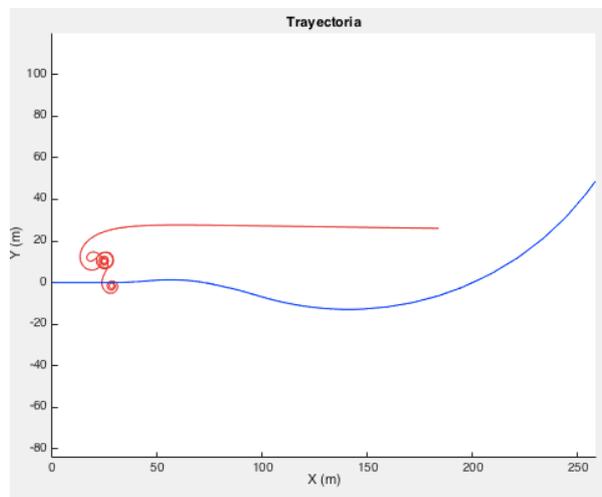


Figura B-86. Trayectoria en SwD para vehículos deportivos a alta velocidad

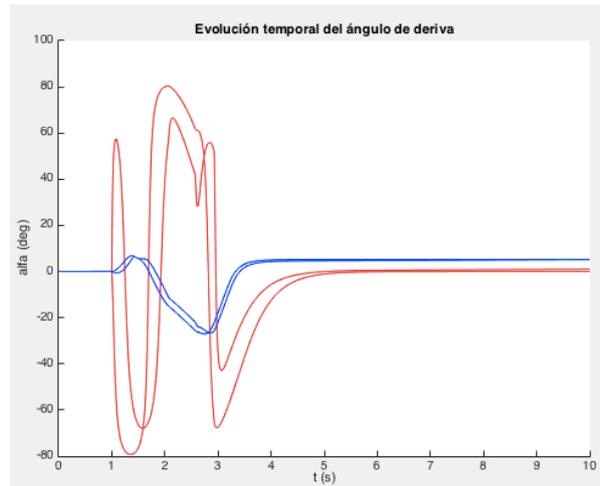


Figura B-87. Ángulo de deriva en SwD para vehículos deportivos a alta velocidad

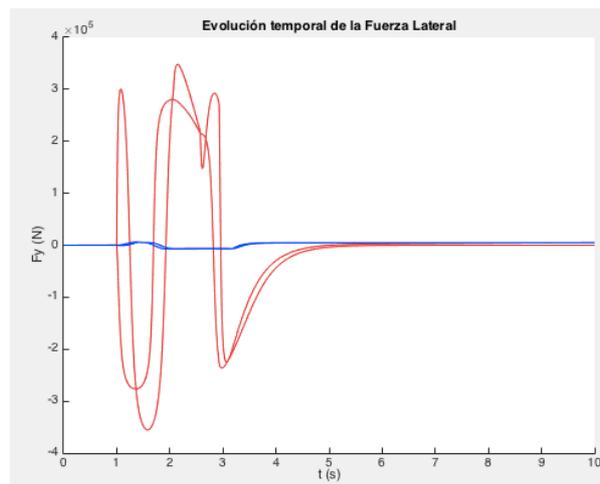


Figura B-88. Fuerza lateral en SwD para vehículos deportivos a alta velocidad

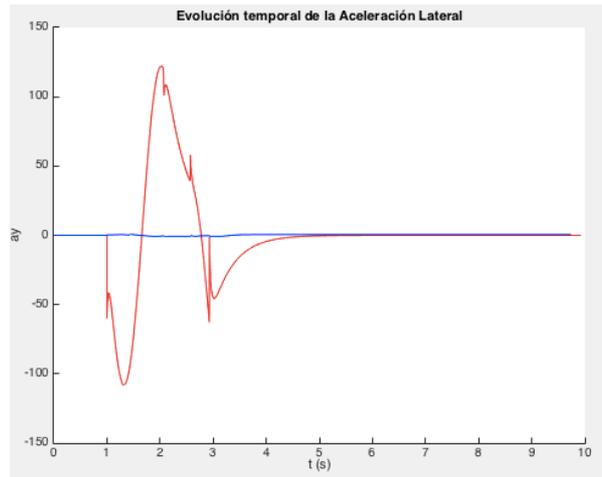


Figura B-89. Aceleración lateral en SwD para vehículos deportivos a alta velocidad

### Furgonetas

Velocidad baja

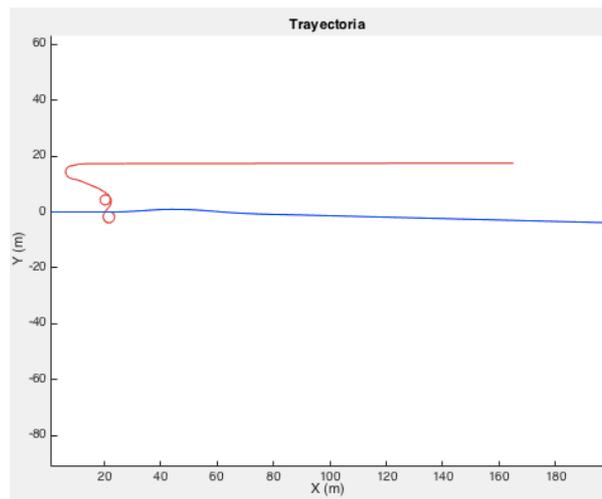


Figura B-90. Trayectoria en SwD para furgonetas a baja velocidad

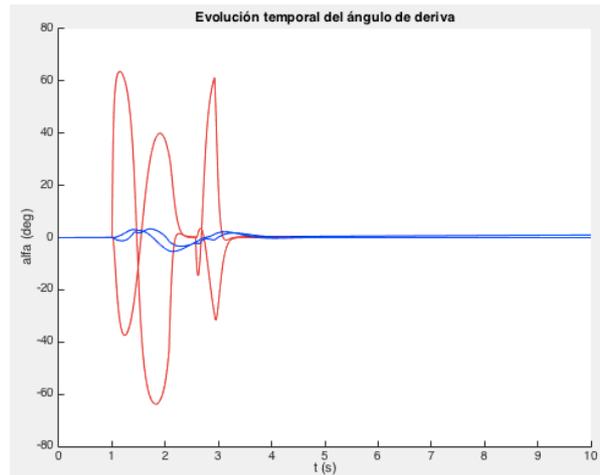


Figura B-91. Ángulo de deriva en SwD para furgonetas a baja velocidad

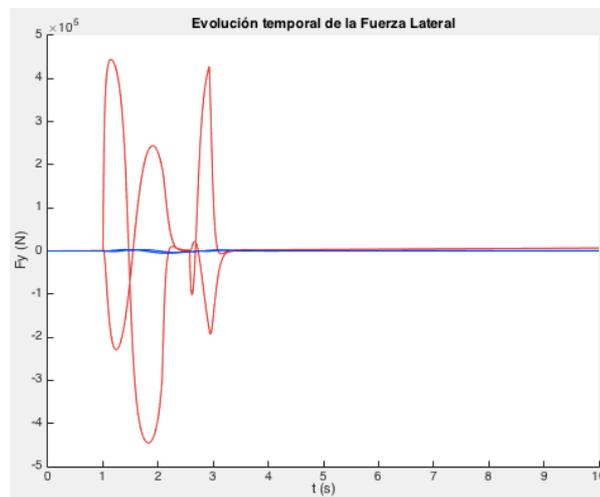


Figura B-92. Fuerza lateral en SwD para furgonetas a baja velocidad

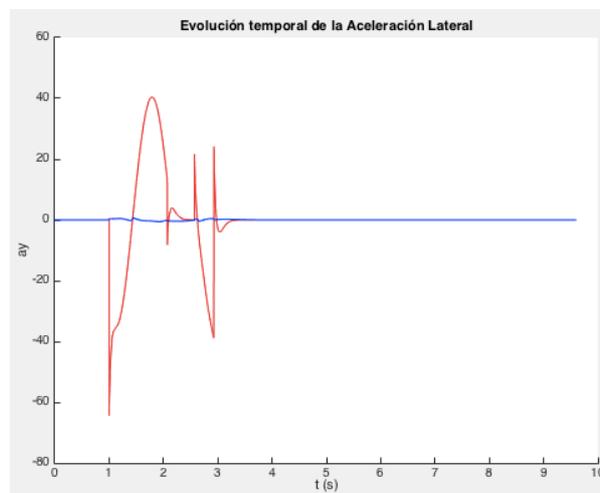


Figura B-93. Aceleración lateral en SwD para furgonetas a baja velocidad

Velocidad alta

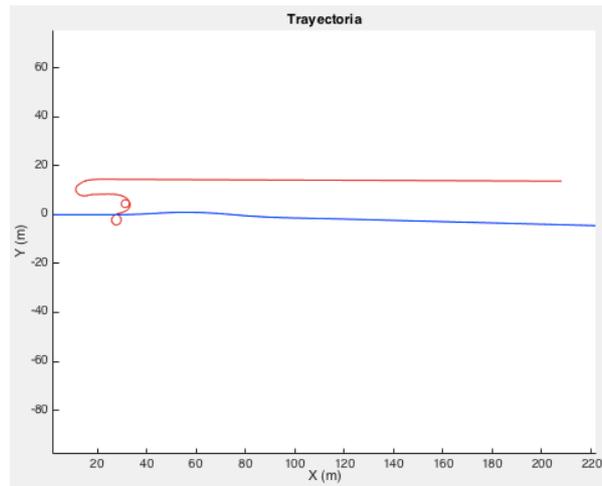


Figura B-94. Trayectoria en SwD para furgonetas a alta velocidad

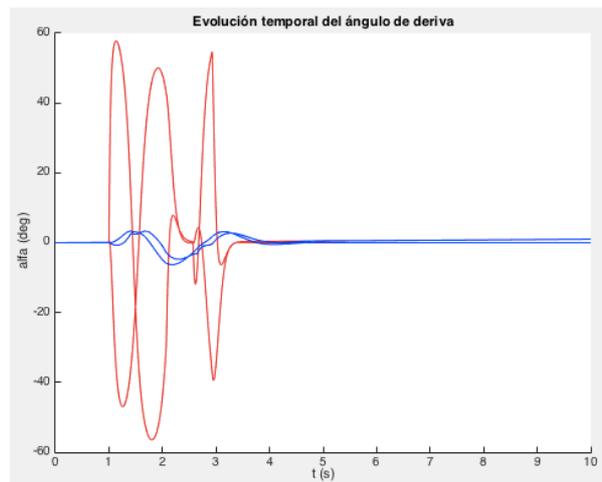


Figura B-95. Ángulo de deriva en SwD para furgonetas a alta velocidad

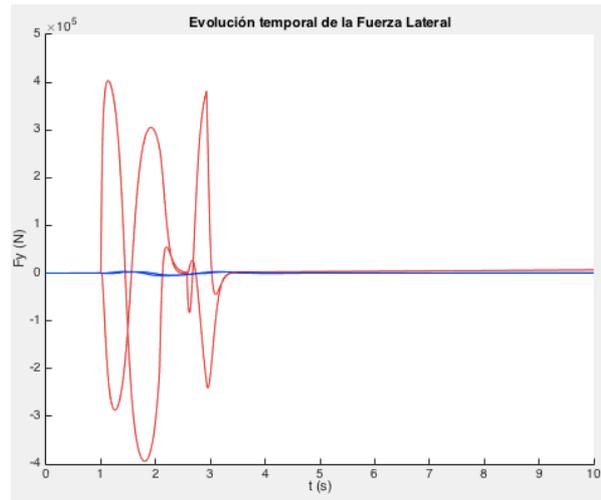


Figura B-96. Fuerza lateral en SwD para furgonetas a alta velocidad

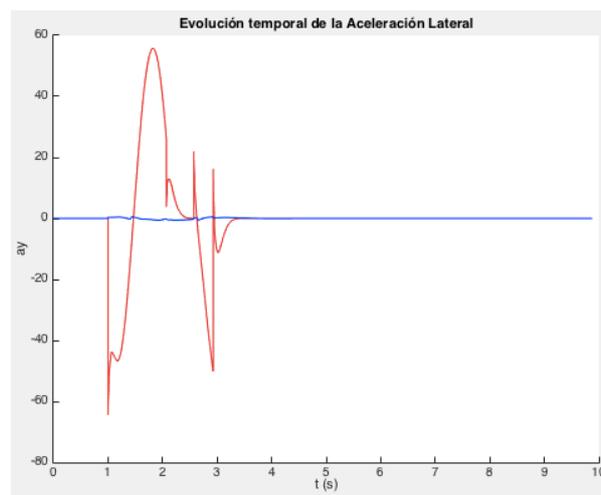


Figura B-97. Aceleración lateral en SwD para furgonetas a alta velocidad

## J Turn

### Vehículos pequeños

Velocidad baja

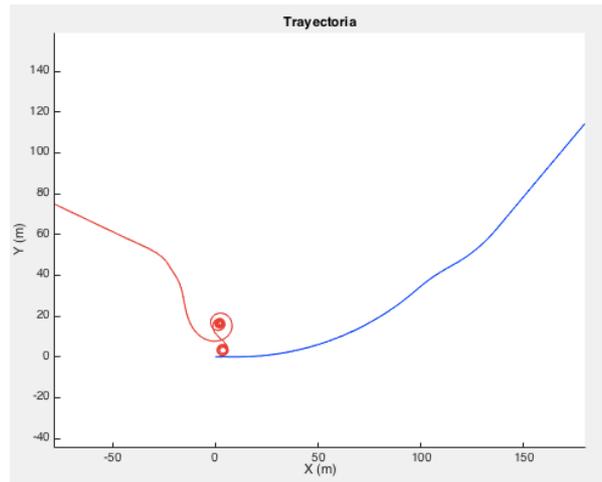


Figura B-98. Trayectoria en maniobra J Turn para vehículos pequeños a baja velocidad

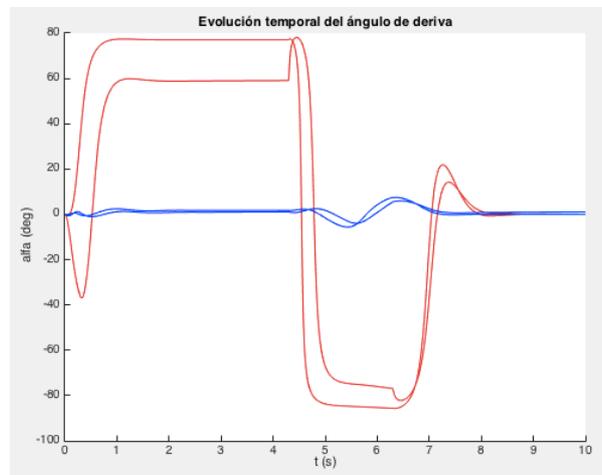


Figura B-99. Ángulo de deriva en maniobra J Turn para vehículos pequeños a baja velocidad

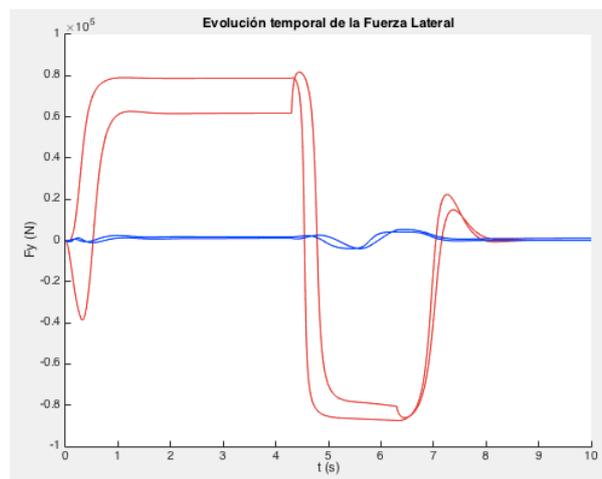


Figura B-100. Fuerza lateral en maniobra J Turn para vehículos pequeños a baja velocidad

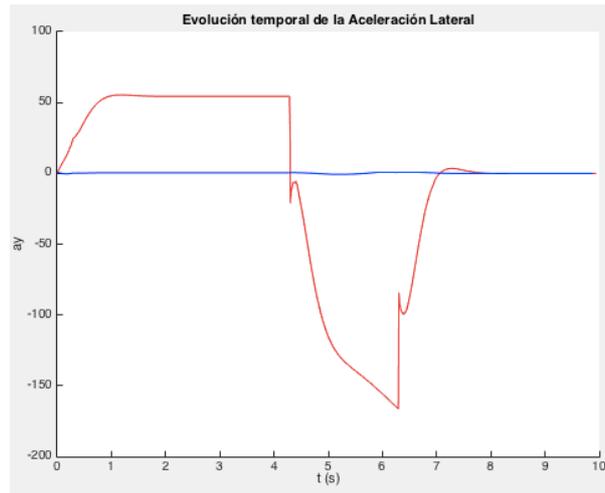


Figura B-101. Aceleración lateral en maniobra J Turn para vehículos pequeños a baja velocidad

Velocidad alta

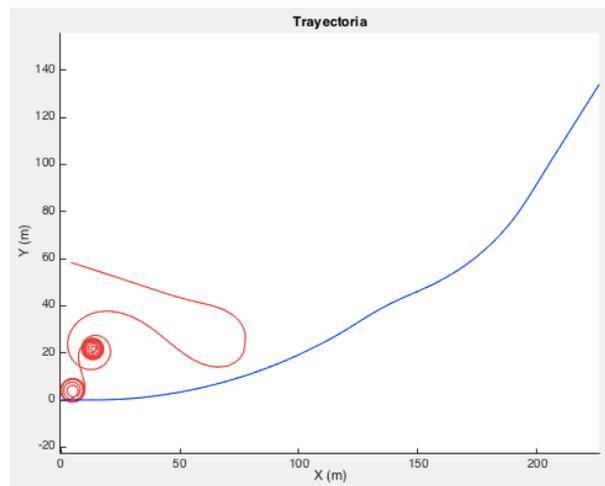


Figura B-102. Trayectoria en maniobra J Turn para vehículos pequeños a alta velocidad

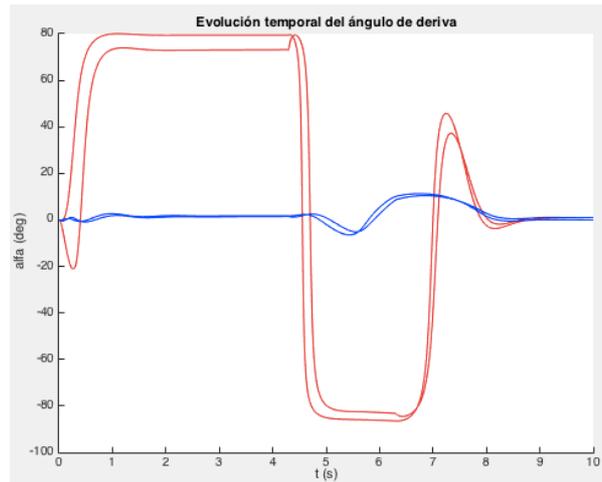


Figura B-103. Ángulo de deriva en maniobra J Turn para vehículos pequeños a alta velocidad

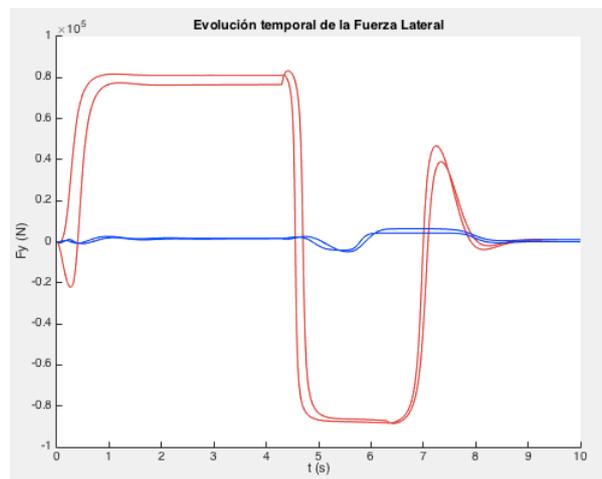


Figura B-104. . Fuerza lateral en maniobra J Turn para vehículos pequeños a alta velocidad

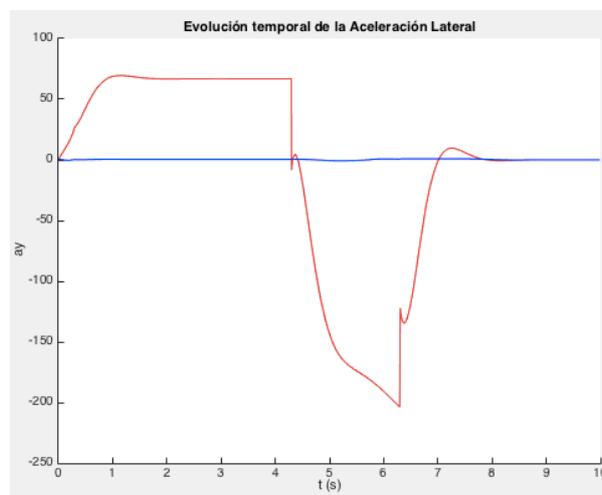


Figura B-105. Aceleración lateral en maniobra J Turn para vehículos pequeños a alta velocidad

**Vehículos medianos**

Velocidad baja

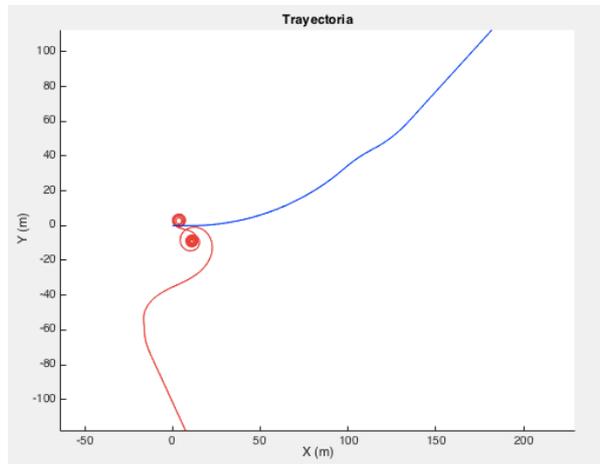


Figura B-106. Trayectoria para maniobra J Turn para vehículos medianos a baja velocidad

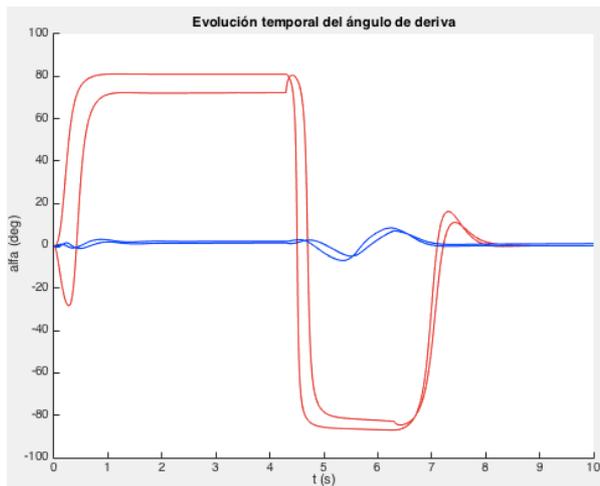


Figura B-107. Ángulo de deriva para maniobra J Turn para vehículos medianos a baja velocidad

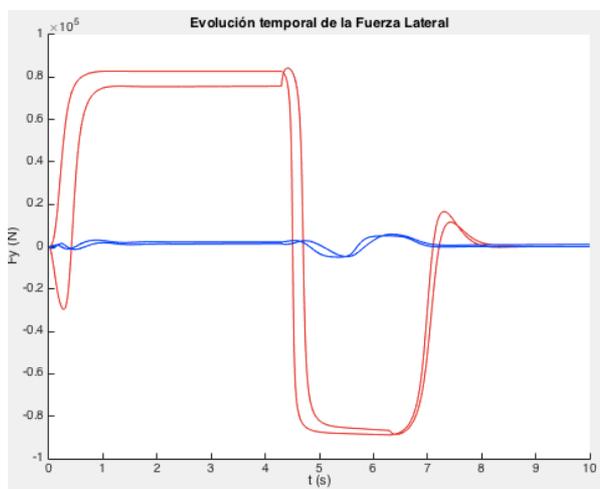


Figura B-108. Fuerza lateral para maniobra J Turn para vehículos medianos a baja velocidad

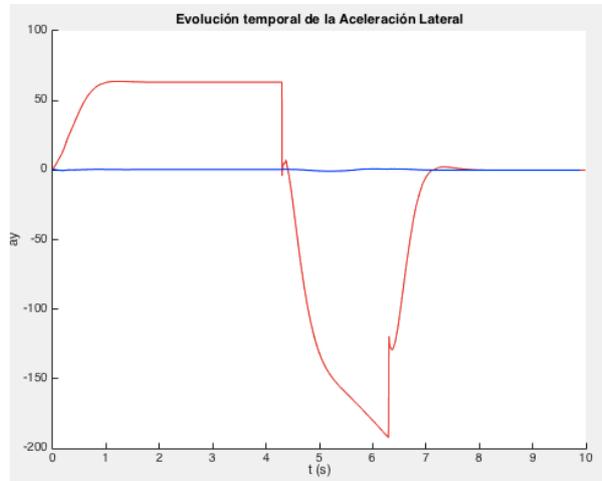


Figura B-109. Aceleración lateral para maniobra J Turn para vehículos medianos a baja velocidad

Velocidad alta

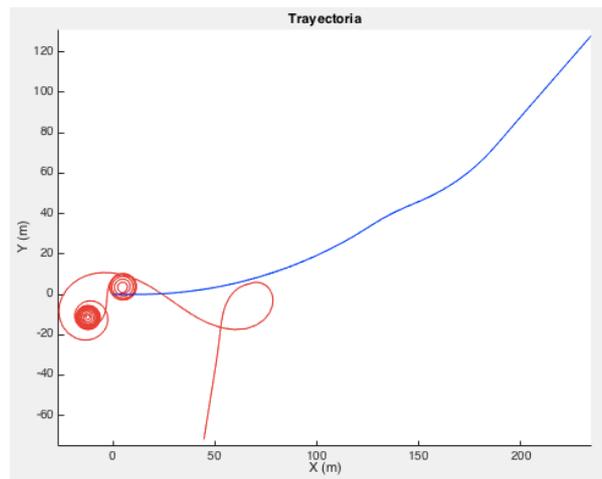


Figura B-110. Trayectoria para maniobra J Turn para vehículos medianos a alta velocidad

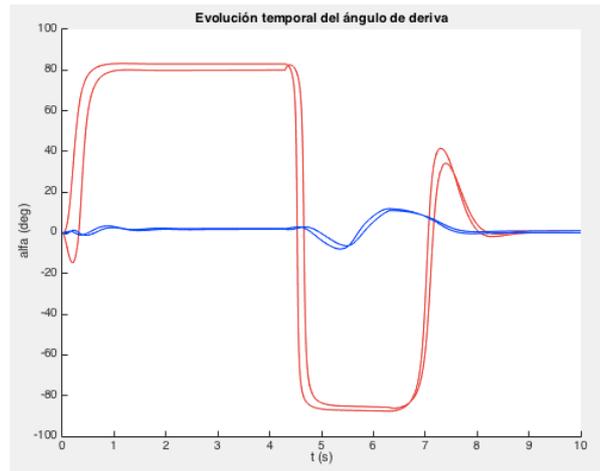


Figura B-111. Ángulo de deriva para maniobra J Turn para vehículos medianos a alta velocidad

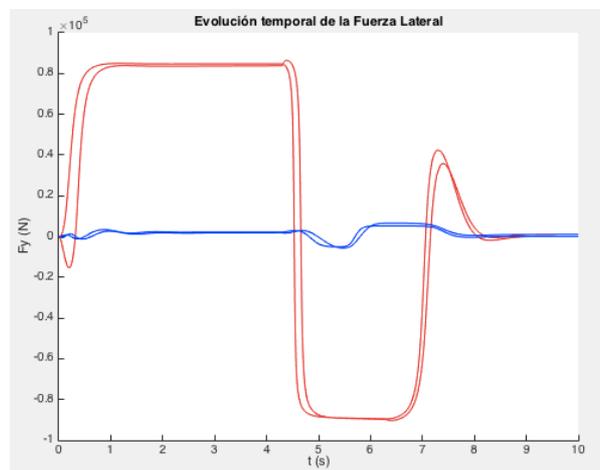


Figura B-112. Fuerza lateral para maniobra J Turn para vehículos medianos a alta velocidad

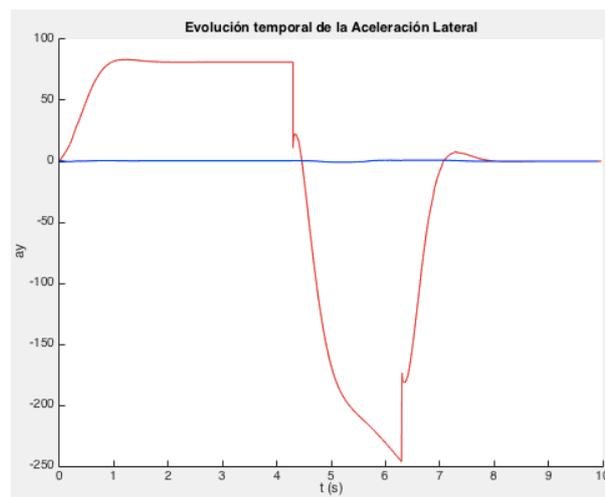


Figura B-113. Aceleración lateral para maniobra J Turn para vehículos medianos a alta velocidad

## Vehículos deportivos

Velocidad baja

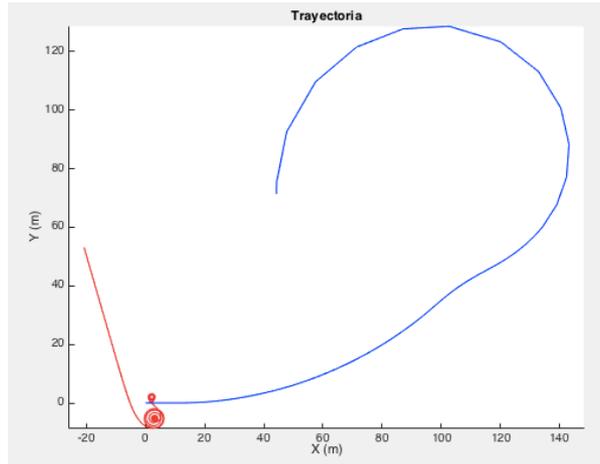


Figura B-114. Trayectoria en maniobra J Turn para vehículos deportivos a velocidad baja

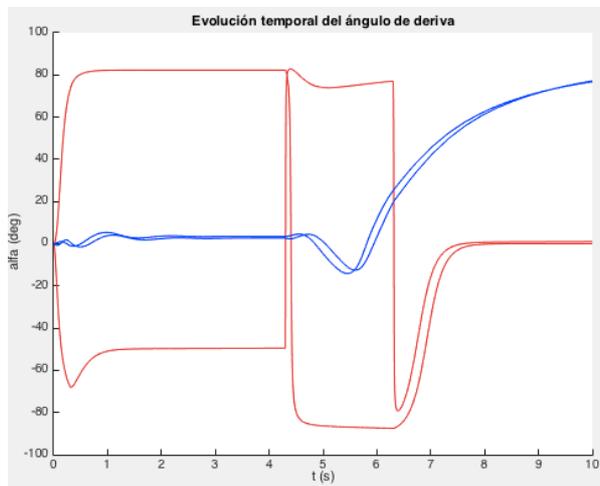


Figura B-115. Ángulo de deriva en maniobra J Turn para vehículos deportivos a velocidad baja

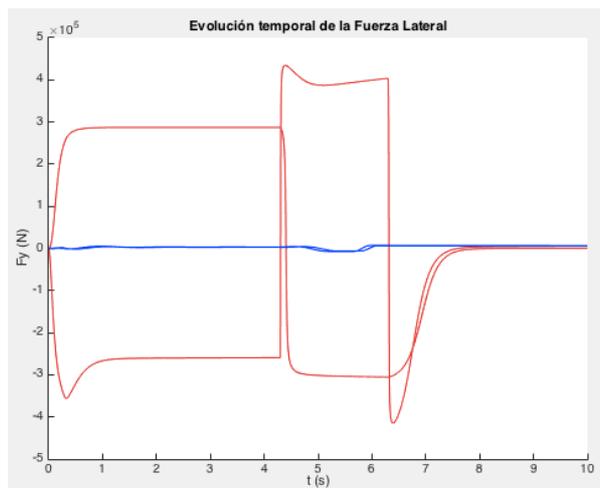


Figura B-116. Fuerza lateral en maniobra J Turn para vehículos deportivos a velocidad baja

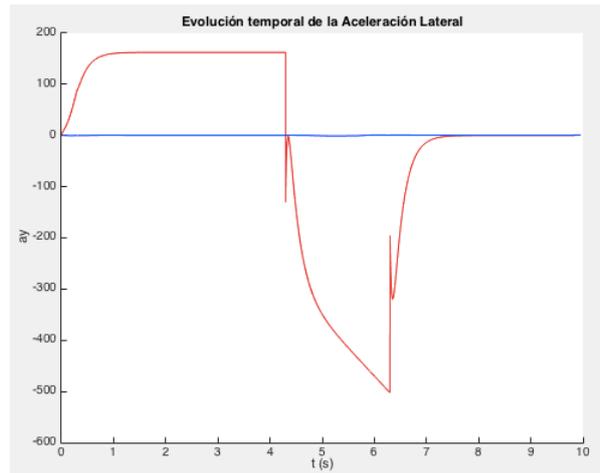


Figura B-117. Aceleración lateral en maniobra J Turn para vehículos deportivos a velocidad baja

Velocidad alta

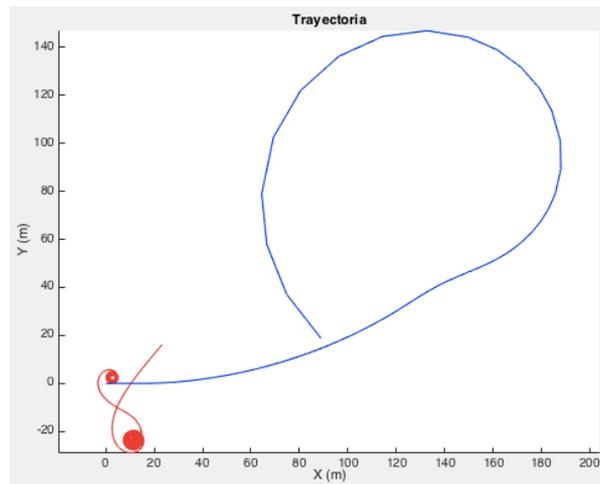


Figura B-118. Trayectoria en maniobra J Turn para vehículos deportivos a velocidad alta

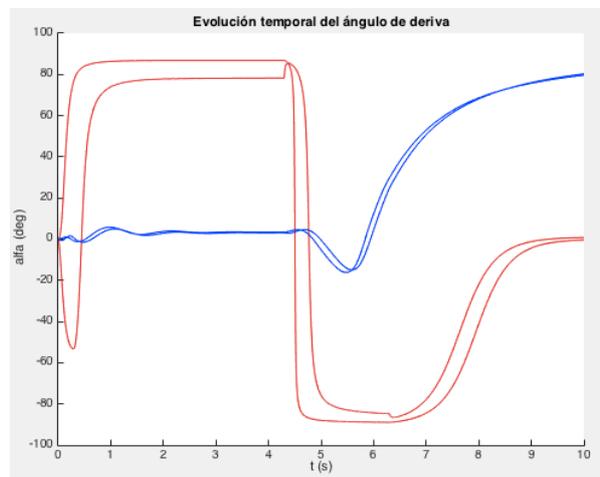


Figura B-119. Ángulo de deriva en maniobra J Turn para vehículos deportivos a velocidad alta

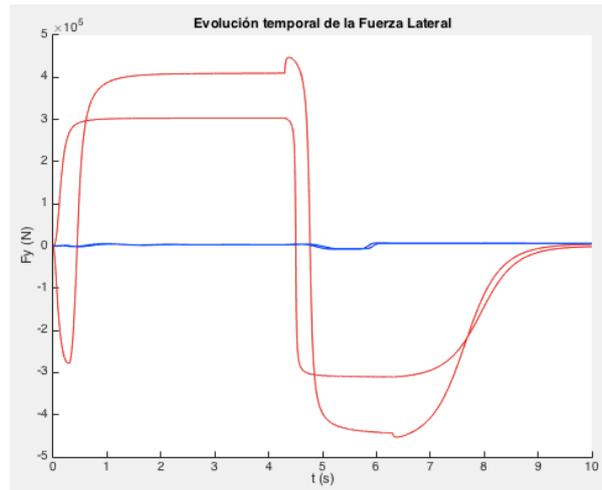


Figura B-120. Fuerza lateral en maniobra J Turn para vehículos deportivos a velocidad alta

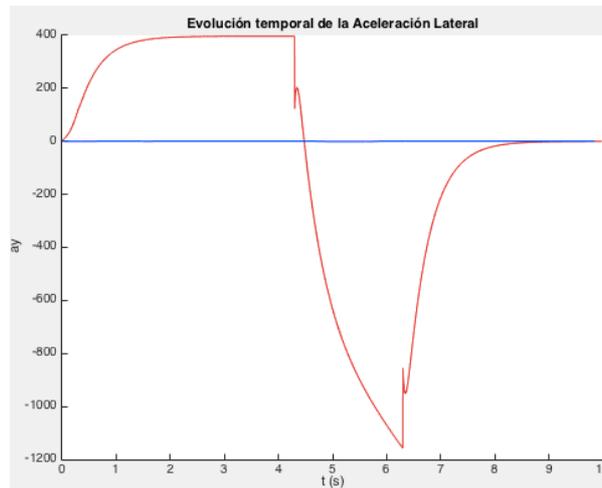


Figura B-121. Aceleración lateral en maniobra J Turn para vehículos deportivos a velocidad alta

**Furgonetas**

Velocidad baja

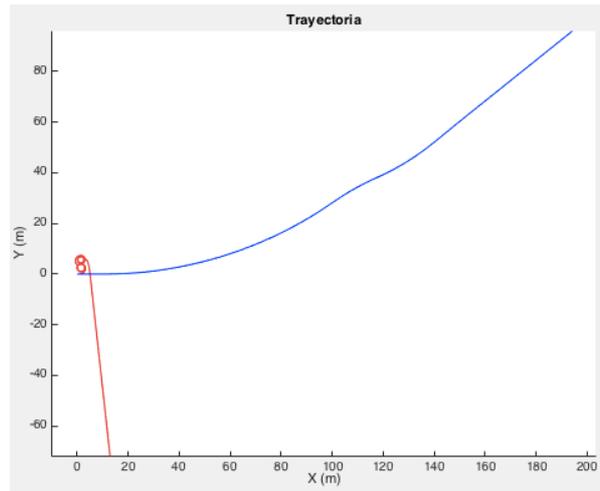


Figura B-122. Trayectoria en maniobra J Turn para furgonetas en baja velocidad

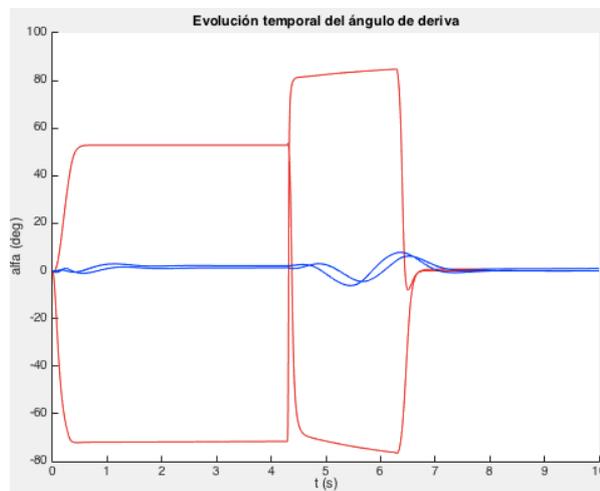


Figura B-123. . Ángulo de deriva en maniobra J Turn para furgonetas en baja velocidad

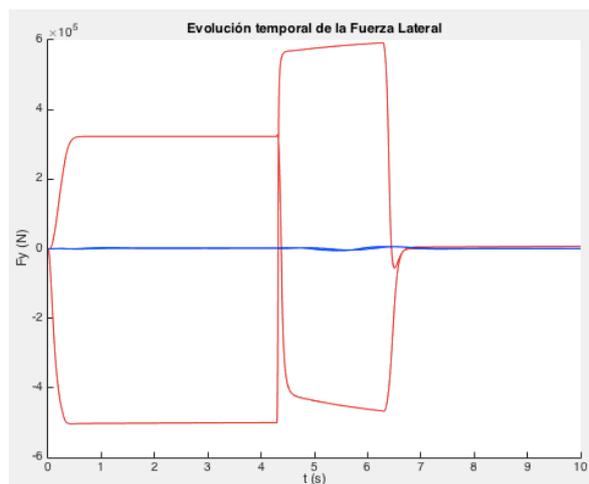


Figura B-124. Fuerza lateral en maniobra J Turn para furgonetas en baja velocidad

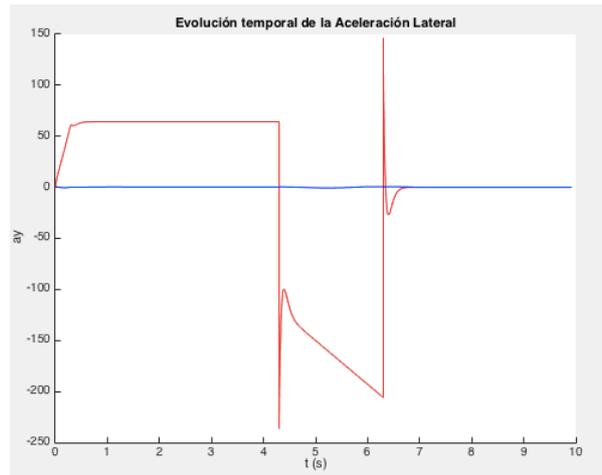


Figura B-125. Aceleración lateral en maniobra J Turn para furgonetas en baja velocidad

Velocidad alta

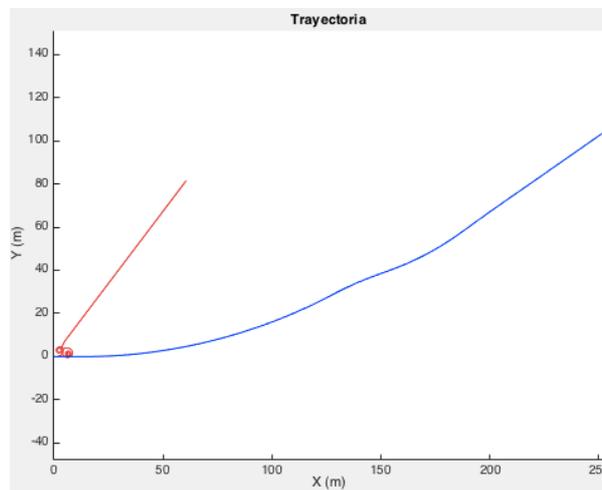


Figura B-126. Trayectoria en maniobra J Turn para furgonetas en alta velocidad

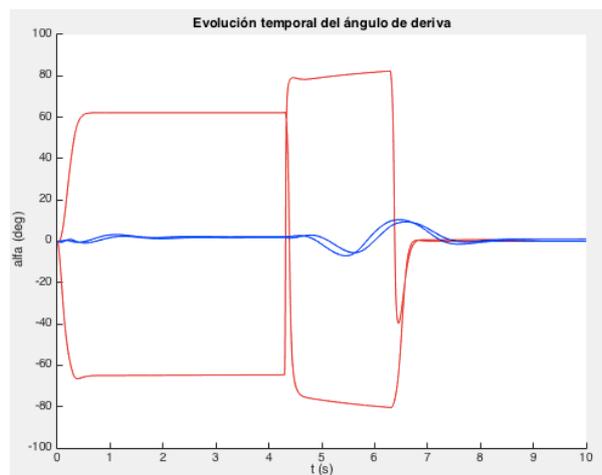


Figura B-127. Ángulo de deriva en maniobra J Turn para furgonetas en alta velocidad

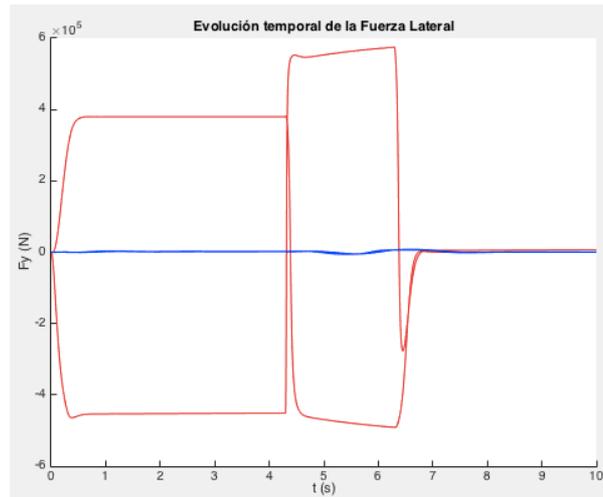


Figura B-128. Fuerza lateral en maniobra J Turn para furgonetas en alta velocidad

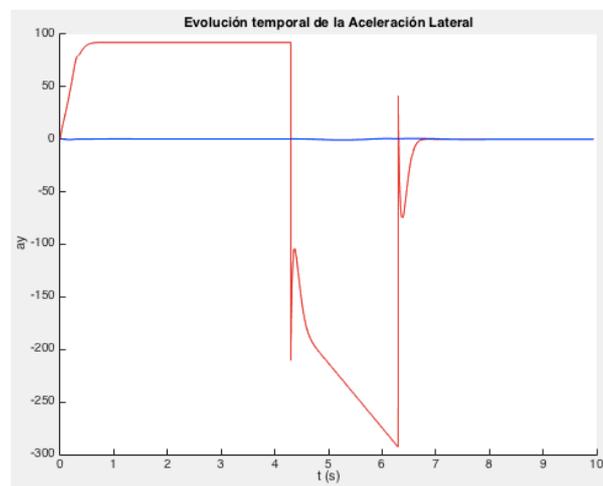


Figura B-129. Aceleración lateral en maniobra J Turn para furgonetas en alta velocidad

## Fishhook

### Vehículos pequeños

Velocidad baja

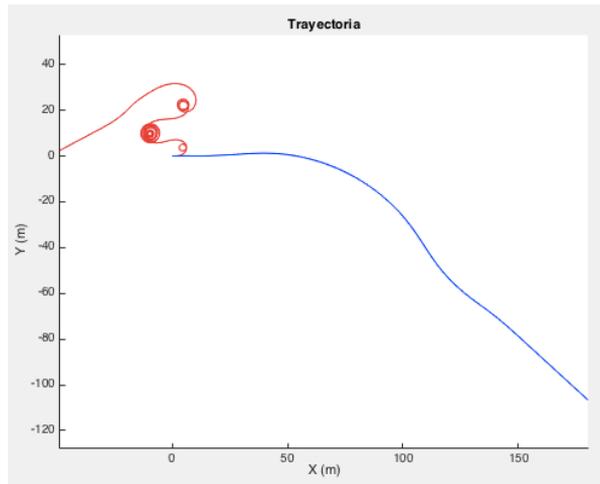


Figura B-130. Trayectoria en maniobra Fishhook para vehículos pequeños en baja velocidad

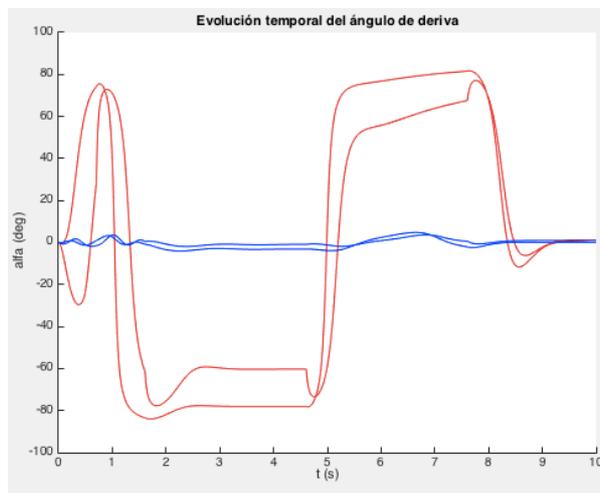


Figura B-131. Ángulo de deriva en maniobra Fishhook para vehículos pequeños en baja velocidad

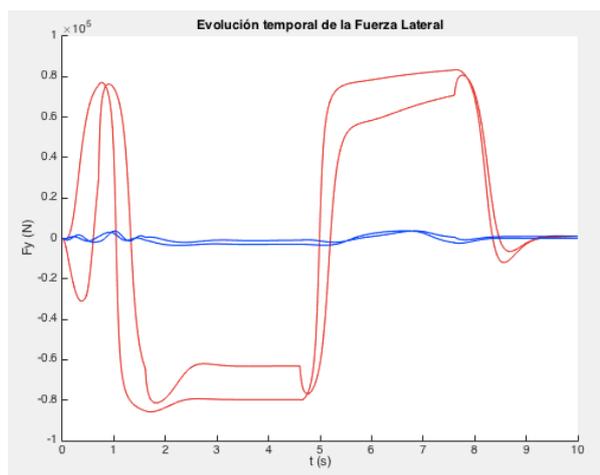


Figura B-132. Fuerza lateral en maniobra Fishhook para vehículos pequeños en baja velocidad

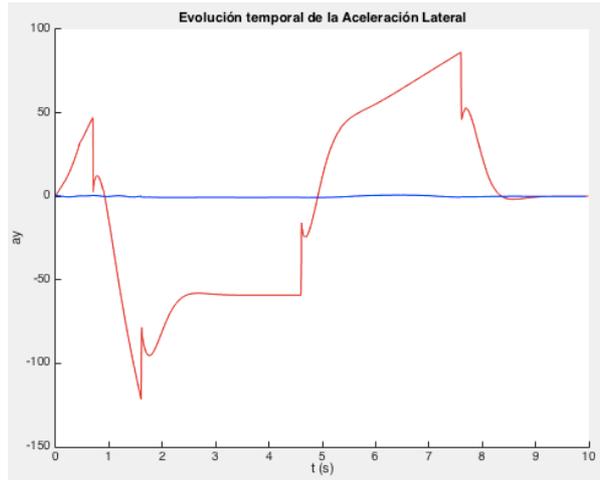


Figura B-133. Aceleración lateral en maniobra Fishhook para vehículos pequeños en baja velocidad

Velocidad alta

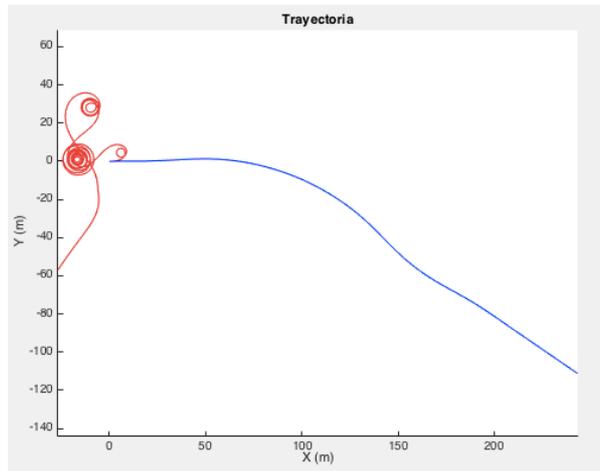


Figura B-134. Trayectoria en maniobra Fishhook para vehículos pequeños en alta velocidad

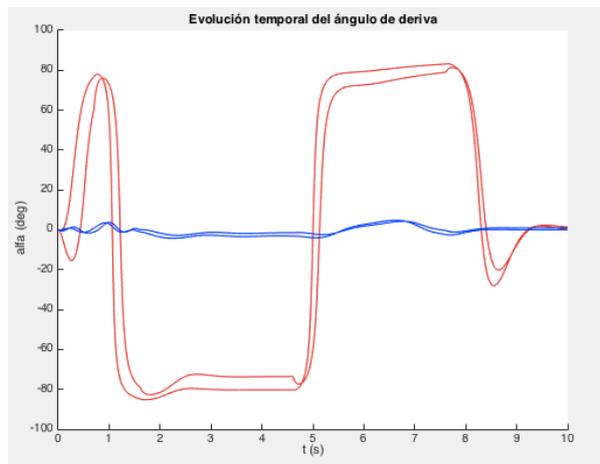


Figura B-135. Ángulo de deriva en maniobra Fishhook para vehículos pequeños en alta velocidad

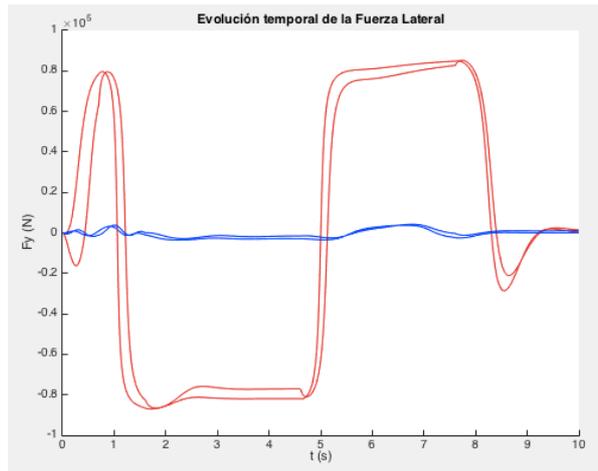


Figura B-136. Fuerza lateral en maniobra Fishhook para vehículos pequeños en alta velocidad

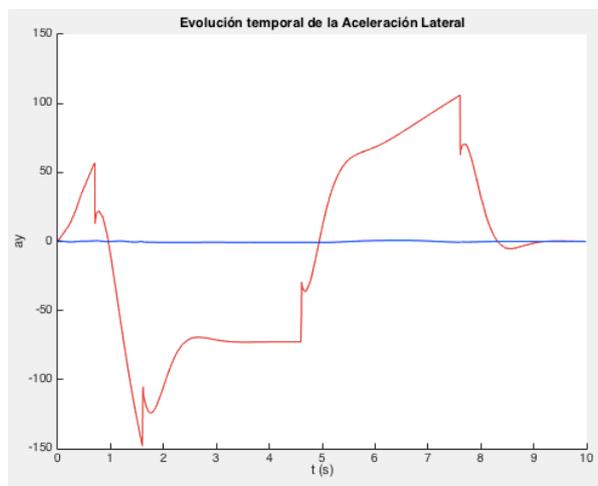


Figura B-137. Aceleración lateral en maniobra Fishhook para vehículos pequeños en alta velocidad

**Vehículos medianos**

Velocidad baja

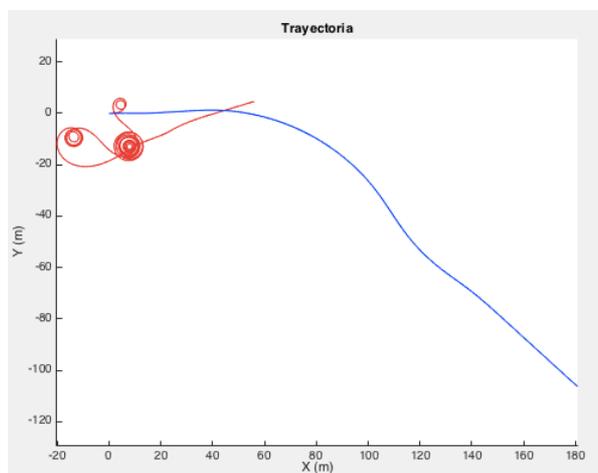


Figura B-138. Trayectoria en maniobra Fishhook para vehículos medianos en baja velocidad

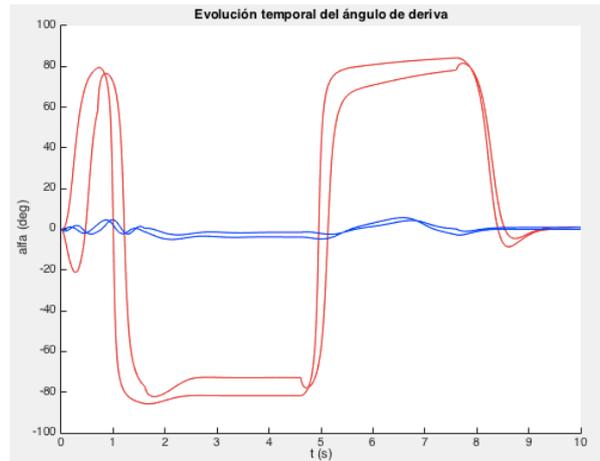


Figura B-139. Ángulo de deriva en maniobra Fishhook para vehículos medianos en baja velocidad

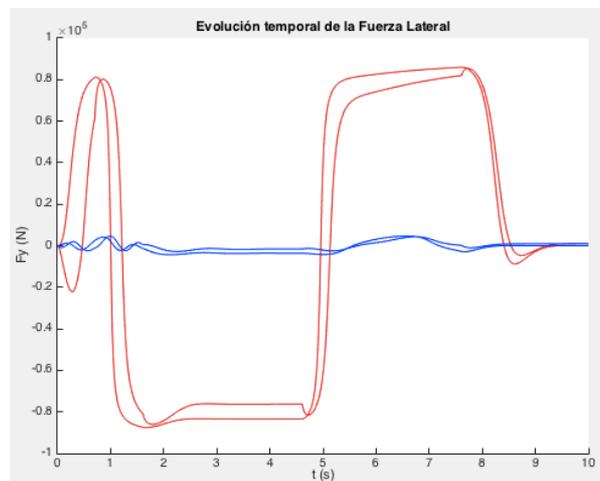


Figura B-140. Fuerza lateral en maniobra Fishhook para vehículos medianos en baja velocidad

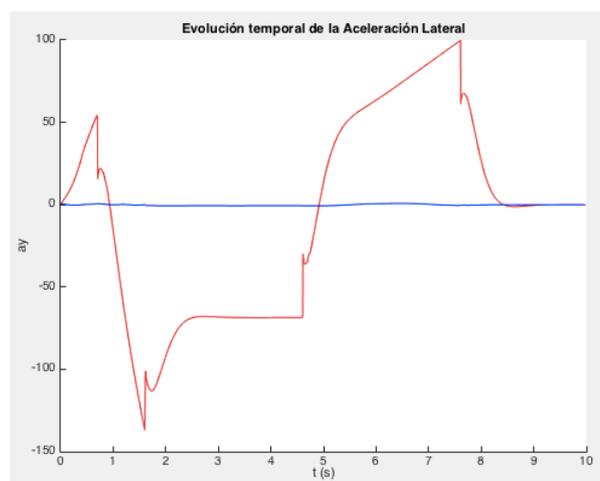


Figura B-141. Aceleración lateral en maniobra Fishhook para vehículos medianos en baja velocidad

Velocidad alta

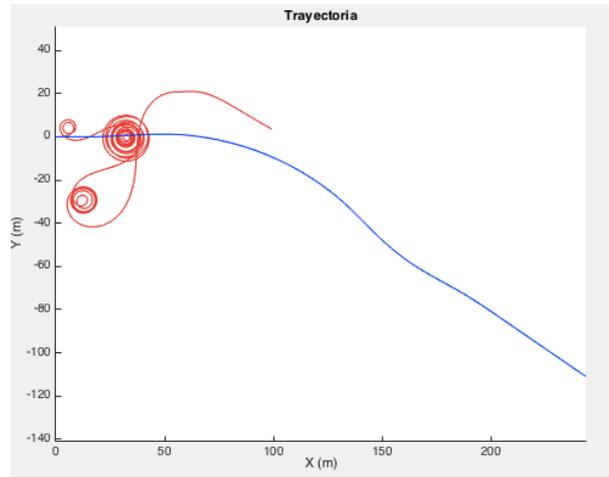


Figura B-142. Trayectoria en maniobra Fishhook para vehículos medianos en alta velocidad

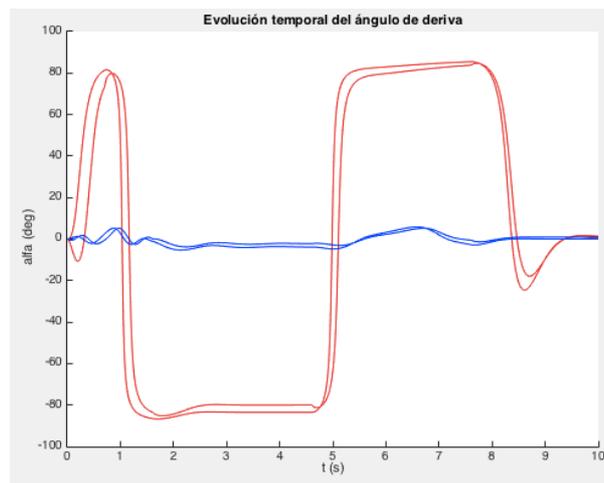


Figura B-143. Ángulo de deriva en maniobra Fishhook para vehículos medianos en alta velocidad

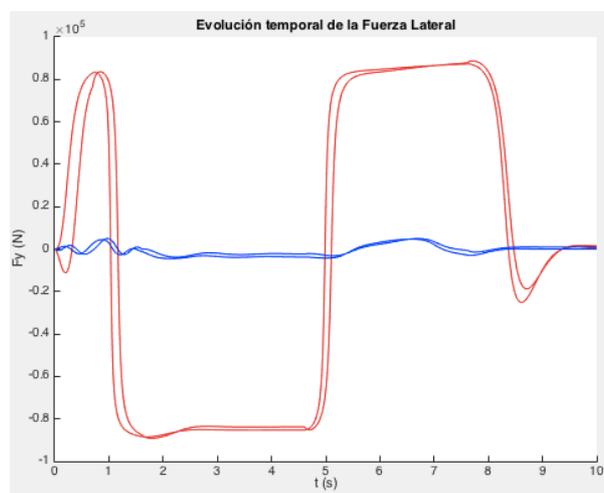


Figura B-144. Fuerza lateral en maniobra Fishhook para vehículos medianos en alta velocidad

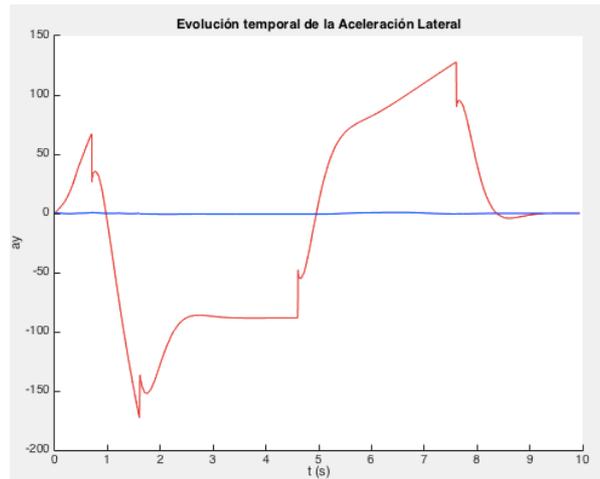


Figura B-145. Aceleración lateral en maniobra Fishhook para vehículos medianos en alta velocidad

### Vehículos deportivos

Velocidad baja

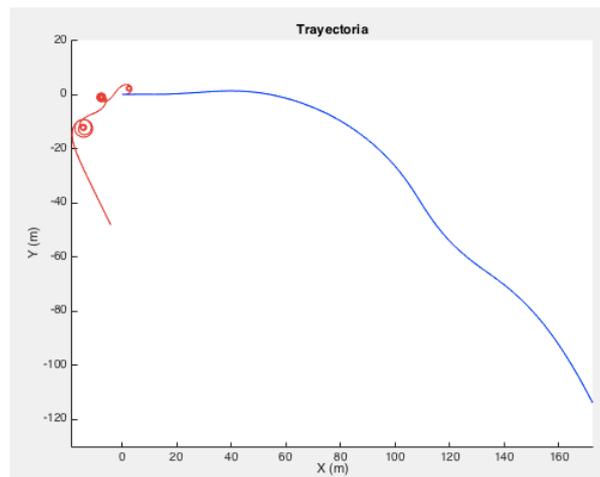


Figura B-146. Trayectoria en maniobra Fishhook para vehículos deportivos en baja velocidad

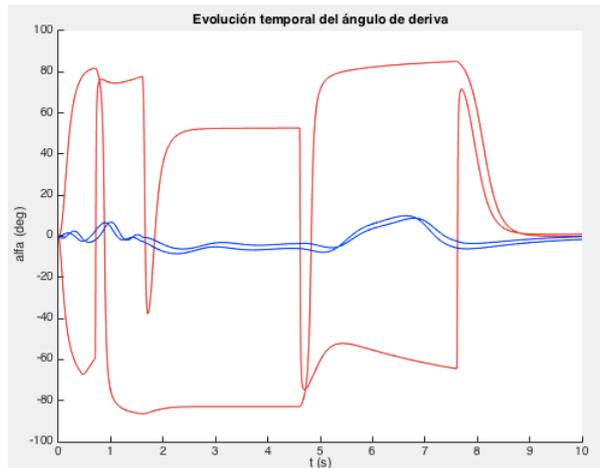


Figura B-147. Trayectoria en maniobra Fishhook para vehículos deportivos en baja velocidad

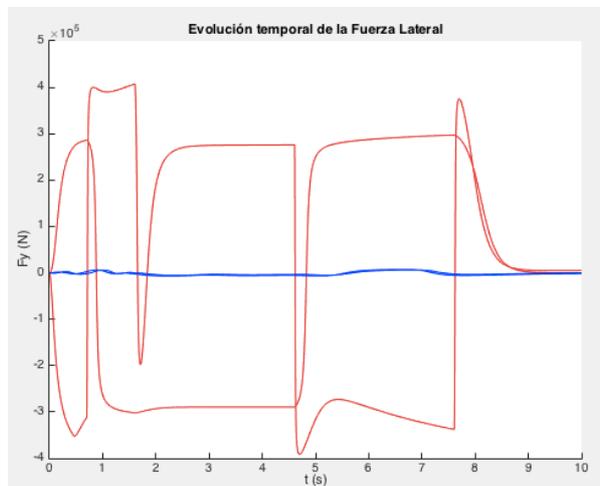


Figura B-148. Trayectoria en maniobra Fishhook para vehículos deportivos en baja velocidad

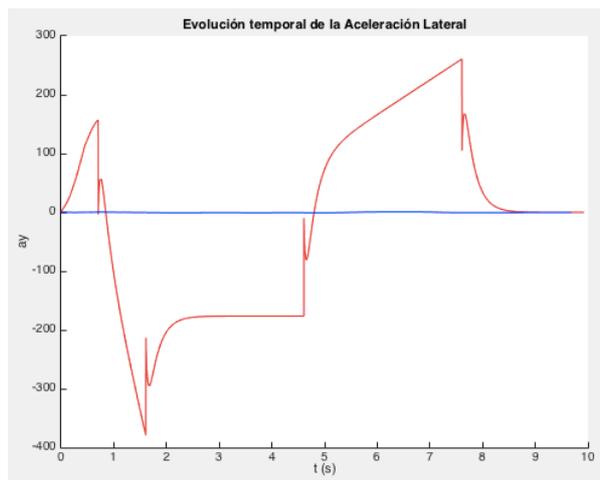


Figura B-149. Trayectoria en maniobra Fishhook para vehículos deportivos en baja velocidad

Velocidad alta

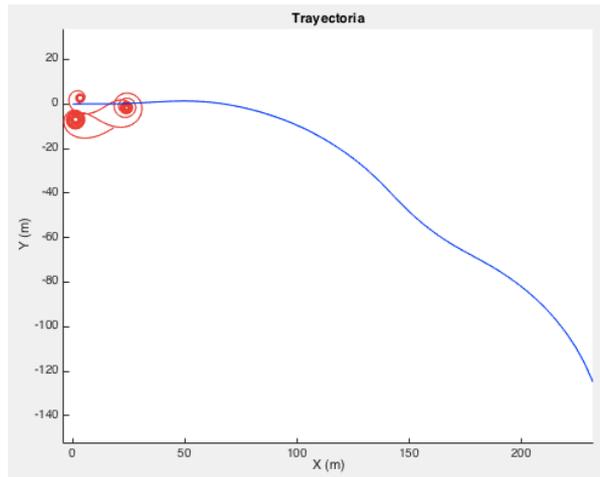


Figura B-150. Trayectoria en maniobra Fishhook para vehículos deportivos en alta velocidad

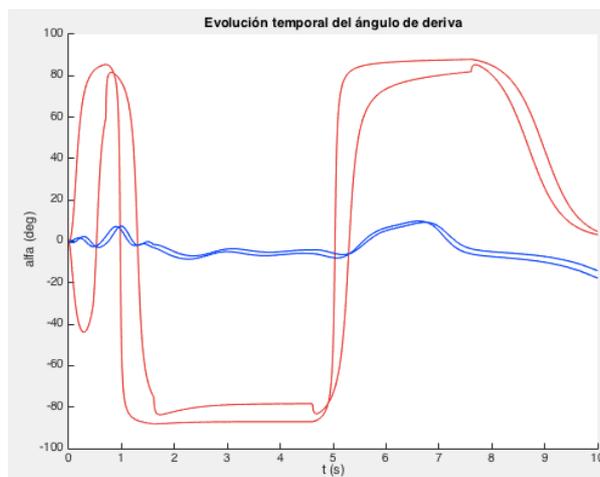


Figura B-151. Trayectoria en maniobra Fishhook para vehículos deportivos en alta velocidad

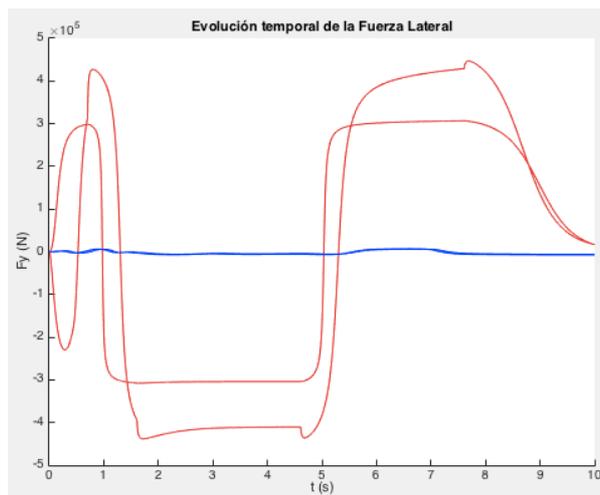


Figura B-152. Trayectoria en maniobra Fishhook para vehículos deportivos en alta velocidad

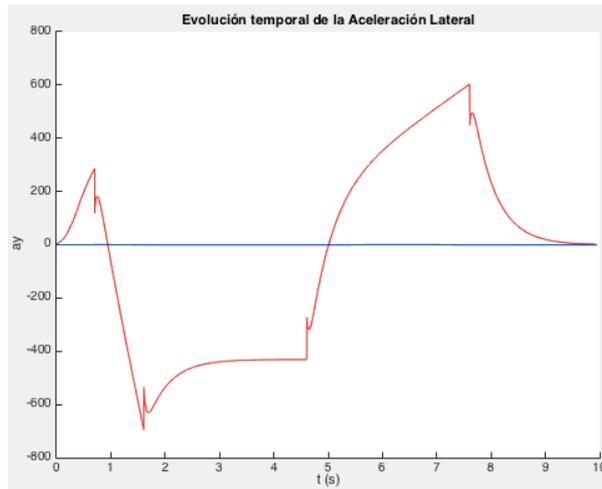


Figura B-153. Trayectoria en maniobra Fishhook para vehículos deportivos en alta velocidad

**Furgonetas**

Velocidad baja

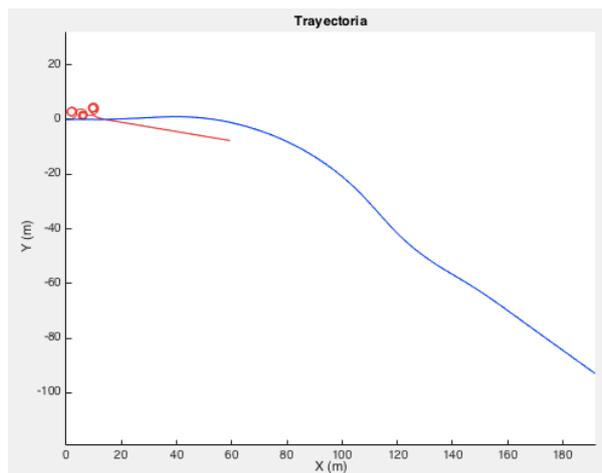


Figura B-154. Trayectoria en maniobra Fishhook en furgonetas en baja velocidad

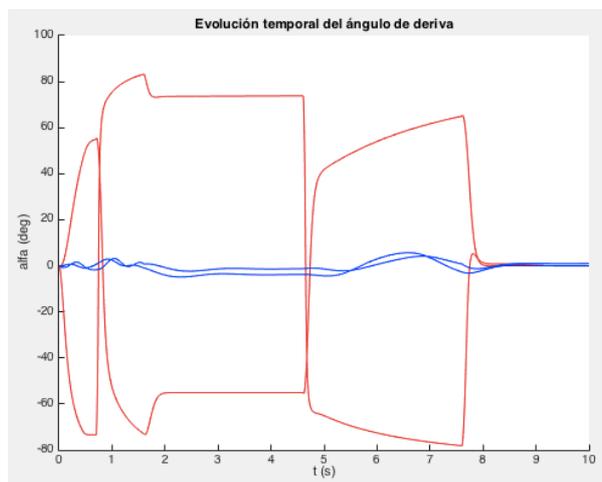


Figura B-155. Ángulo de deriva en maniobra Fishhook en furgonetas en baja velocidad

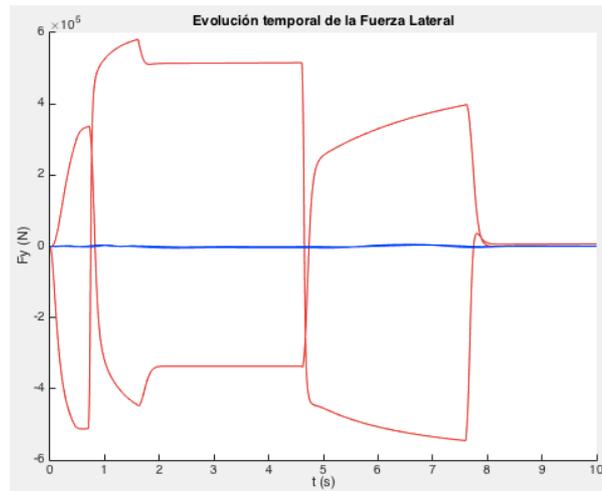


Figura B-156. Fuerza lateral en maniobra Fishhook en furgonetas en baja velocidad

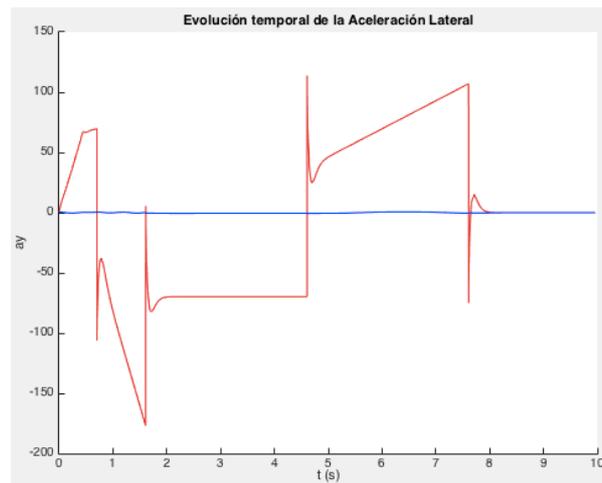


Figura B-157. Aceleración lateral en maniobra Fishhook en furgonetas en baja velocidad

Velocidad alta

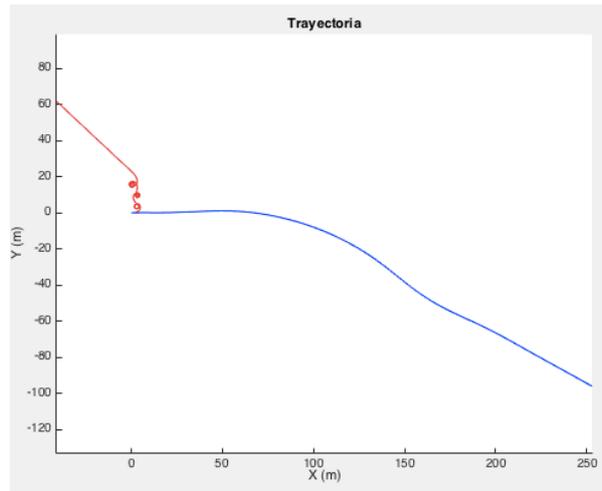


Figura B-158. Trayectoria en maniobra Fishhook en furgonetas en alta velocidad

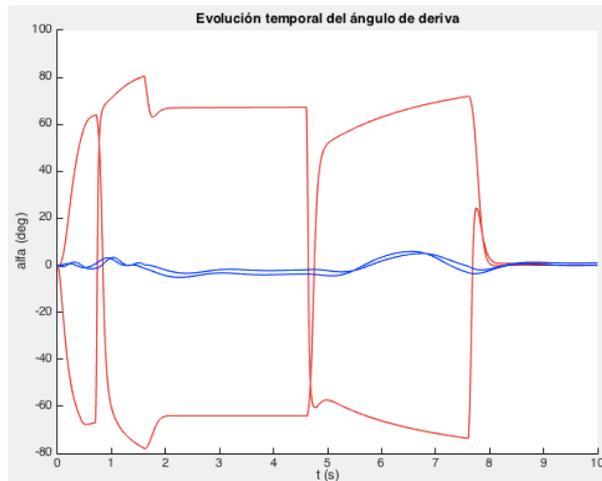


Figura B-159. Ángulo de deriva en maniobra Fishhook en furgonetas en alta velocidad

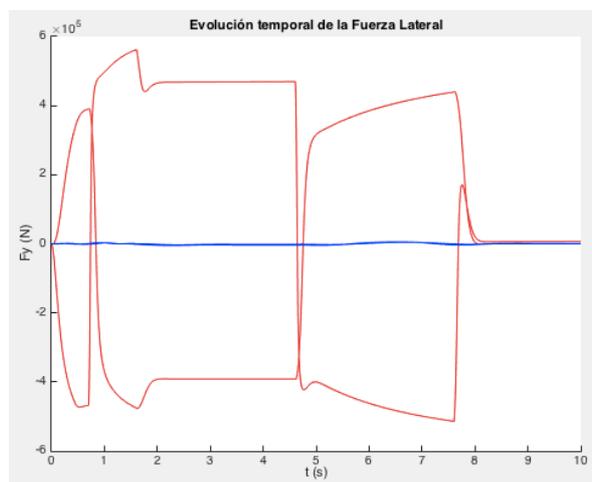


Figura B-160. Fuerza lateral en maniobra Fishhook en furgonetas en alta velocidad

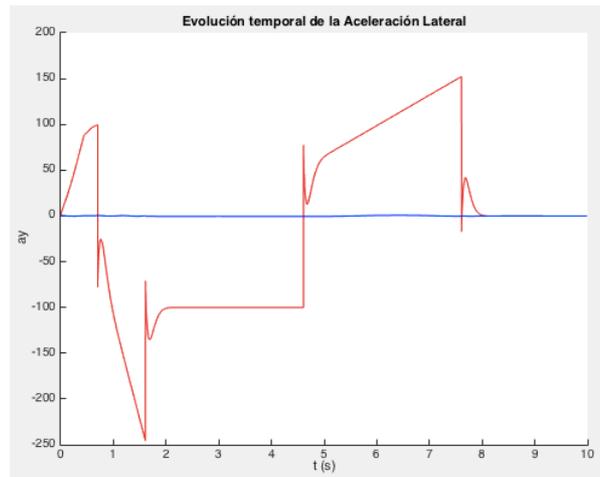


Figura B-161. Aceleración lateral en maniobra Fishhook en furgonetas en alta velocidad

# Referencias

---

- [1] Pintado, P. (1994). Un curso de Automoción. Sevilla.
- [2] Karlsson, A. (2014). Test Procedures and Evaluation Tools for Passenger Vehicle Dynamics [en línea] [consulta: 12 de marzo de 2018]. Disponible en: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/211557/211557.pdf>
- [3] Kraaijeveld, R., Wolff, K., Vockrodt T., (2010). New Test Procedures for Handling of Vehicles with Variable Ratio Steering Systems [en línea] [consulta: 20 de marzo de 2018]. Disponible en: [https://www.fev.com/fileadmin/user\\_upload/Media/TechnicalPublications/Chassis/atzw-008-0154-3\\_wwLenksysteme\\_FEV.pdf](https://www.fev.com/fileadmin/user_upload/Media/TechnicalPublications/Chassis/atzw-008-0154-3_wwLenksysteme_FEV.pdf)
- [4] Driveability Testing Alliance (2009). Driveability Test Maneuver: Step Steering Input [en línea] [consulta: 20 de marzo de 2018]. Disponible en: <http://www.driveability-testing-alliance.com/download/datasheets/DTA-Step-Steering-Input-DE-B090601e.pdf>
- [5] National Highway Traffic Safety Administration (2003) Experimental Examination of Test Maneuvers That May Induce On-Road, Untripped Light Vehicle Rollover. [en línea] [consulta: 25 de abril de 2018]. Disponible en: <http://www.nhtsa.dot.gov>
- [6] Mechanical Simulation (2011) The Sine with Dwell Test [en línea] [consulta: 24 de marzo de 2018]. Disponible en: <https://www.carsim.com/applications/fmvss126/index.php>
- [7] Comisariado Europeo del Automóvil (s.f.). Seguridad activa y pasiva en el vehículo [en línea] [consulta: 5 de mayo de 2018]. Disponible en: <https://www.cea-online.es/blog/128-seguridad-activa-y-pasiva-del-vehiculo>
- [8] Rajamani, R. (2012). Vehicle Dynamics and Control. Nueva York: Springer
- [9] Wideberg, J. (s.f.). Dinámica Lateral: Control y comportamiento direccional [Documento PDF]. Recuperado de: [https://ev5.us.es/bbcswebdav/pid-2505951-dt-content-rid-8276287\\_1/courses/201718-2030074-203-EC/dinamica\\_lateral\\_transitoria.pdf](https://ev5.us.es/bbcswebdav/pid-2505951-dt-content-rid-8276287_1/courses/201718-2030074-203-EC/dinamica_lateral_transitoria.pdf)
- [10] Wideberg, J. (s.f.). Dinámica Lateral: Modelo de la bicicleta [Documento PDF]. Recuperado de: [https://ev5.us.es/bbcswebdav/pid-2480239-dt-content-rid-8202652\\_1/courses/201718-2030074-203-EC/AUTO-003\\_dinamica\\_lateral\\_-\\_modelo\\_bicicleta.pdf](https://ev5.us.es/bbcswebdav/pid-2480239-dt-content-rid-8202652_1/courses/201718-2030074-203-EC/AUTO-003_dinamica_lateral_-_modelo_bicicleta.pdf)

- [11] Wideberg, J. (s.f.). Neumáticos. Interacción con la carretera [Documento PDF]. Recuperado de: [https://ev5.us.es/bbcswebdav/pid-2439875-dt-content-rid-8101547\\_1/courses/201718-2030074-203-EC/AUTO-1718-001 Neumaticos.pdf](https://ev5.us.es/bbcswebdav/pid-2439875-dt-content-rid-8101547_1/courses/201718-2030074-203-EC/AUTO-1718-001%20Neumaticos.pdf)
- [12] Dugoff, H., Ervin, R.D., Segel, L. (1970). Vehicle Handling Test Procedure. [Documento PDF Recuperado de: <https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/1379/15020.0001.001.pdf>
- [13] Schramm, D., Hiller M., Bardini R., (2018). Vehicle Dynamics. Modeling and Simulation. Berlin: Springer
- [14] National Highway Traffic Safety Administration. (2005). An Assessment of Human Driver Steering Capability (DOT HS 809 875). Recuperado de: [https://www.nhtsa.gov/DOT/NHTSA/NRD/Multimedia/PDFs/VRTC/ca/capubs/NHTSA\\_forke\\_nbrock\\_driversteeringcapabilityrpt.pdf](https://www.nhtsa.gov/DOT/NHTSA/NRD/Multimedia/PDFs/VRTC/ca/capubs/NHTSA_forke_nbrock_driversteeringcapabilityrpt.pdf)
- [15] VEHICO (s.f.). ISO Double Lane Change Test [en línea] [consulta: 18 de julio de 2018]. Disponible en: <http://www.vehico.com/index.php/en/applications/iso-lane-change-test>
- [16] National Highway Traffic Safety Administration. (2006). United States Rulemaking on Electronic Stability Control (ESC) on light Vehicles. [diapositivas de PowerPoint]. Recuperado de: <http://slideplayer.com/slide/6997443/>
- [17] Motorpasion (2016). ¿Cuáles son los tipos de coches que más triunfan en cada país del mundo? Recuperado de: <https://www.motorpasion.com/espaciotoyota/cuales-son-los-tipos-de-coches-que-mas-triunfan-en-cada-pais-del-mundo>
- [18] Driveability Testing Alliance (s.f.). Driveability Test Maneuver: Steady-State Circular Test [Documento PDF]. Recuperado de: <http://www.driveability-testing-alliance.com/download/datasheets/DTA-Steady-State-Circular-Test-DE-B090603e.pdf>
- [19] Hongjun Zhu, Liang Li, Maojing Jin, Hongzhi Li, Jian Song. (2013). Real Time Yaw rate prediction based on a non-linear model and feedback compensation for vehicle dynamics control. The Journal of Automobile Engineering 227(10):1431-1445
- [20] Tiana Roig, E., (2014). Anàlisi de la normativa i procediments d'assaig de sistemes ESC en vehicle industrial i disseny d'outriggers per a la realització dels assajos [Trabajo fin de carrera]. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, Barcelona.
- [21] SangDo Na, JinSeok Jang, KwangSuk Kim, WanSuk Yoo (2015). Dynamic vehicle model for handling performance using experimental data. Advances in Mechanical Engineering, Vol. 7(11), 1–12.
- [22] Xinbo Ma, Pak Kin Wong, Jing Zhao, Zhengchao Xie (2017). Multi-Objective Sliding Mode Control on Vehicle Cornering Stability with Variable Gear Ratio Actuator-Based Active Front Steering Systems. Sensors, 17(1), 49.
- [23] National Highway Traffic Safety Administration (2004). A Demonstration of the Dynamic Tests Developed for NHTSA's NCAP Rollover Rating System - Phase VIII of NHTSA's Light Vehicle Rollover Research Program (DOT HS 809 705). Recuperado de: [https://www.nhtsa.gov/DOT/NHTSA/NRD/Multimedia/PDFs/VRTC/ca/capubs/RolloverPhaseVIIIReport\\_NCAPdemo081104.pdf](https://www.nhtsa.gov/DOT/NHTSA/NRD/Multimedia/PDFs/VRTC/ca/capubs/RolloverPhaseVIIIReport_NCAPdemo081104.pdf)
- [24] Genta, G, Morello, L. (2009). The Automotive Chassis Volume 2: System Design. Springer Netherlands

- [25] International Organization for Standardization (2011). ISO 7401:2011 Road vehicle, Lateral transient response test method, open loop test methods. Ginebra: ISO
- [26] International Organization for Standardization (2011). ISO 3888-2:2011 Passenger cars. Test track for a severe lane-change manoeuvre. Part 2: Obstacle avoidance. Ginebra: ISO
- [27] Mesa-Mazo, Mónica, Valencia-Calvo, Johnny, & Olivar-Tost, Gerard. (2014). Model for a vehicle dynamics through a sequence of traffic lights. *DYNA*, 81(186), 138-145. <https://dx.doi.org/10.15446/dyna.v81n186.39767>
- [28] Naya, Miguel A. (2007) Aplicación de la dinámica multicuerpo en tiempo real a la simulación y el control de automóviles [Tesis doctoral]. Universidad de La Coruña, La Coruña



# ÍNDICE DE TABLAS

---

- Tabla 4–1 Datos de los vehículos pequeños
- Tabla 4–2 Datos de los vehículos medianos
- Tabla 4–3 Datos de los vehículos deportivos
- Tabla 4–4 Datos de las furgonetas

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

- Figura 2 1. Esquema del modelo teórico<sup>8</sup>
- Figura 3 1. Representación de la maniobra J Turn
- Figura 3-2. Representación de la maniobra Fishhook
- Figura 3-3. Representación de la maniobra Step Steering Angle
- Figura 3-4. Representación de la maniobra Sine with Dwell
- Figura 3-5. Representación de la maniobra Double Lane Change
- Figura 3-6. Representación de la maniobra Steady State Circular
- Figura 4-1. Representación par-velocidad angular en vehículos pequeños
- Figura 4-2. Representación par-velocidad angular en vehículos medianos
- Figura 4-3. Representación par-velocidad angular en vehículos deportivos
- Figura 4-4. Representación par-velocidad angular en furgonetas
- Figura 5-1. Trayectoria de vehículos deportivos en RRT a 25 km/h
- Figura 5-2. Trayectoria de vehículos deportivos en RRT a 25 km/h
- Figura 5-3. Trayectoria de vehículos deportivos en RRT a 25 km/h
- Figura 5-4. Trayectoria de vehículos deportivos en RRT a 25 km/h
- Figura 5-5. Ángulo de deriva en RRT en vehículos deportivos a 55km/h
- Figura 5-6. Fuerza lateral en RRT en vehículos deportivos a 55km/h
- Figura 5-7. Aceleración lateral en RRT en vehículos deportivos a 55km/h
- Figura 5-8. Ángulo de deriva en la maniobra escalón en vehículos deportivos
- Figura 5-9. Aceleración lateral en la maniobra escalón para vehículos medianos a baja velocidad
- Figura 5-10. Ángulo de deriva en SwD para vehículos medianos a baja velocidad
- Figura 6-1. Aceleración lateral en la maniobra Fishhook en vehículos medianos
- Figura 6-2. Aceleración lateral en la maniobra Fishhook en el experimento de comparación
- Figura 7-1. Aceleración lateral en la maniobra escalón para vehículos medianos a 60 km/h
- Figura 7-2. Aceleración lateral en la maniobra escalón en el modelo de comparación
- Figura 7-3. Ángulo de deriva en SwD en vehículos medianos
- Figura 7-4. Ángulo de deriva en SwD en el modelo de comparación
- Figura A-1. Valor de los coeficientes de la fórmula mágica de Pacejka
- Figura A-2. Valor de los coeficientes a1-a8 de la fórmula mágica de Pacejka
- Figura B-1. Trayectoria en RRT de vehículos pequeños a baja velocidad
- Figura B-2. Ángulo de deriva en RRT de vehículos pequeños a baja velocidad
- Figura B-3. Fuerza lateral en RRT de vehículos pequeños a baja velocidad
- Figura B-4. Aceleración lateral en RRT de vehículos pequeños a baja velocidad
- Figura B-5. Trayectoria en RRT de vehículos pequeños a alta velocidad
- Figura B-6. Ángulo de deriva en RRT de vehículos pequeños a alta velocidad
- Figura B-7. Fuerza lateral en RRT de vehículos pequeños a alta velocidad
- Figura B-8. Aceleración lateral en RRT de vehículos pequeños a alta velocidad
- Figura B-9. Trayectoria en RRT para vehículos medianos a baja velocidad
- Figura B-10. Ángulo de deriva en RRT para vehículos medianos a baja velocidad
- Figura B-11. Fuerza Lateral en RRT para vehículos medianos a baja velocidad
- Figura B-12. Aceleración lateral en RRT para vehículos medianos a baja velocidad
- Figura B-13. Trayectoria en RRT para vehículos medianos a alta velocidad

- Figura B-14. Ángulo de deriva en RRT para vehículos medianos a alta velocidad  
Figura B-15. Fuerza lateral en RRT para vehículos medianos a alta velocidad  
Figura B-16. Aceleración lateral en RRT para vehículos medianos a alta velocidad  
Figura B-17. Trayectoria en RRT para vehículos deportivos a baja velocidad  
Figura B-18. Ángulo de deriva en RRT para vehículos deportivos a baja velocidad  
Figura B-19. Fuerza lateral en RRT para vehículos deportivos a baja velocidad  
Figura B-20. Aceleración lateral en RRT para vehículos deportivos a baja velocidad  
Figura B-21. Trayectoria en RRT para vehículos deportivos a alta velocidad (50km/h)  
Figura B-22. Trayectoria en RRT para vehículos deportivos a alta velocidad  
Figura B-23. Ángulo de deriva en RRT para vehículos deportivos a alta velocidad  
Figura B-24. Fuerza lateral en RRT para vehículos deportivos a alta velocidad  
Figura B-25. Aceleración lateral en RRT para vehículos deportivos a alta velocidad  
Figura B-26. Trayectoria en RRT para furgonetas a velocidad baja  
Figura B-27. Ángulo de deriva en RRT para furgonetas a velocidad baja  
Figura B-28. Fuerza lateral en RRT para furgonetas a velocidad baja  
Figura B-29. Aceleración lateral en RRT para furgonetas a velocidad baja  
Figura B-30. Trayectoria en RRT para furgonetas a velocidad alta  
Figura B-31. Ángulo de deriva en RRT para furgonetas a velocidad alta  
Figura B-32. Fuerza lateral en RRT para furgonetas a velocidad alta  
Figura B-33. Aceleración lateral en RRT para furgonetas a velocidad alta  
Figura B-34. Trayectorias en la maniobra escalón para vehículos pequeños a baja velocidad  
Figura B-35. Ángulo de deriva en la maniobra escalón para vehículos pequeños a baja velocidad  
Figura B-36. Fuerza Lateral en la maniobra escalón para vehículos pequeños a baja velocidad  
Figura B-37. Aceleración lateral en la maniobra escalón para vehículos pequeños a baja velocidad  
Figura B-38. Trayectorias en la maniobra escalón para vehículos pequeños a alta velocidad  
Figura B-39. Ángulo de deriva en la maniobra escalón para vehículos pequeños a alta velocidad  
Figura B-40. Fuerza Lateral en la maniobra escalón para vehículos pequeños a alta velocidad  
Figura B-41. Aceleración lateral en la maniobra escalón para vehículos pequeños a alta velocidad  
Figura B-42. Trayectoria en la maniobra escalón para vehículos medianos a baja velocidad  
Figura B-43. Ángulo de deriva en la maniobra escalón para vehículos medianos a baja velocidad  
Figura B-44. Fuerza lateral en la maniobra escalón para vehículos medianos a baja velocidad  
Figura B-45. Aceleración lateral en la maniobra escalón para vehículos medianos a baja velocidad  
Figura B-46. Trayectoria en la maniobra escalón para vehículos medianos a alta velocidad  
Figura B-47. Ángulo de deriva en la maniobra escalón para vehículos medianos a alta velocidad  
Figura B-48. Fuerza lateral en la maniobra escalón para vehículos medianos a alta velocidad  
Figura B-49. Aceleración lateral en la maniobra escalón para vehículos medianos a alta velocidad  
Figura B-50. Trayectoria en maniobra escalón para vehículos deportivos a baja velocidad  
Figura B-51. Ángulo de deriva en maniobra escalón para vehículos deportivos a baja velocidad  
Figura B-52. Fuerza lateral en maniobra escalón para vehículos deportivos a baja velocidad  
Figura B-53. Aceleración lateral en maniobra escalón para vehículos deportivos a baja velocidad  
Figura B-54. Trayectoria en maniobra escalón para vehículos deportivos a alta velocidad  
Figura B-55. Ángulo de deriva en maniobra escalón para vehículos deportivos a alta velocidad  
Figura B-56. Fuerza lateral en maniobra escalón para vehículos deportivos a alta velocidad  
Figura B-57. Aceleración lateral en maniobra escalón para vehículos deportivos a alta velocidad  
Figura B-58. Trayectoria en maniobra escalón para furgonetas a baja velocidad  
Figura B-59. Ángulo de deriva en maniobra escalón para furgonetas a baja velocidad  
Figura B-60. Fuerza lateral en maniobra escalón para furgonetas a baja velocidad  
Figura B-61. Aceleración lateral en maniobra escalón para furgonetas a baja velocidad  
Figura B-62. Trayectoria en maniobra escalón para furgonetas a alta velocidad  
Figura B-63. Ángulo de deriva en maniobra escalón para furgonetas a alta velocidad

Figura B-64. Fuerza lateral en maniobra escalón para furgonetas a alta velocidad  
Figura B-65. Aceleración lateral en maniobra escalón para furgonetas a alta velocidad  
Figura B-66. Trayectoria en SwD para vehículos pequeños a baja velocidad  
Figura B-67. Ángulo de deriva en SwD para vehículos pequeños a baja velocidad  
Figura B-68. Fuerza lateral en SwD para vehículos pequeños a baja velocidad  
Figura B-69. Aceleración lateral en SwD para vehículos pequeños a baja velocidad  
Figura B-70. Trayectoria en SwD para vehículos pequeños a alta velocidad  
Figura B-71. Ángulo de deriva en SwD para vehículos pequeños a alta velocidad  
Figura B-72. Fuerza lateral en SwD para vehículos pequeños a alta velocidad  
Figura B-73. Aceleración lateral en SwD para vehículos pequeños a alta velocidad  
Figura B-74. Trayectoria en SwD para vehículos medianos a baja velocidad  
Figura B-75. Ángulo de deriva en SwD para vehículos medianos a baja velocidad  
Figura B-76. Fuerza lateral en SwD para vehículos medianos a baja velocidad  
Figura B-77. Aceleración lateral en SwD para vehículos medianos a baja velocidad  
Figura B-78. Trayectoria en SwD para vehículos medianos a alta velocidad  
Figura B-79. Ángulo de deriva en SwD para vehículos medianos a alta velocidad  
Figura B-80. Fuerza lateral en SwD para vehículos medianos a alta velocidad  
Figura B-81. Aceleración lateral en SwD para vehículos medianos a alta velocidad  
Figura B-82. Trayectoria en SwD para vehículos deportivos a baja velocidad  
Figura B-83. Ángulo de deriva en SwD para vehículos deportivos a baja velocidad  
Figura B-84. Fuerza lateral en SwD para vehículos deportivos a baja velocidad  
Figura B-86. Aceleración lateral en SwD para vehículos deportivos a baja velocidad  
Figura B-86. Trayectoria en SwD para vehículos deportivos a alta velocidad  
Figura B-87. Ángulo de deriva en SwD para vehículos deportivos a alta velocidad  
Figura B-88. Fuerza lateral en SwD para vehículos deportivos a alta velocidad  
Figura B-89. Aceleración lateral en SwD para vehículos deportivos a alta velocidad  
Figura B-90. Trayectoria en SwD para furgonetas a baja velocidad  
Figura B-91. Ángulo de deriva en SwD para furgonetas a baja velocidad  
Figura B-92. Fuerza lateral en SwD para furgonetas a baja velocidad  
Figura B-93. Aceleración lateral en SwD para furgonetas a baja velocidad  
Figura B-94. Trayectoria en SwD para furgonetas a alta velocidad  
Figura B-95. Ángulo de deriva en SwD para furgonetas a alta velocidad  
Figura B-96. Fuerza lateral en SwD para furgonetas a alta velocidad  
Figura B-97. Aceleración lateral en SwD para furgonetas a alta velocidad  
Figura B-98. Trayectoria en J Turn para vehículos pequeños a baja velocidad  
Figura B-99. Ángulo de deriva en J Turn para vehículos pequeños a baja velocidad  
Figura B-100. Fuerza lateral en J Turn para vehículos pequeños a baja velocidad  
Figura B-101. Aceleración lateral en J Turn para vehículos pequeños a baja velocidad  
Figura B-102. Trayectoria en J Turn para vehículos pequeños a alta velocidad  
Figura B-103. Ángulo de deriva en J Turn para vehículos pequeños a alta velocidad  
Figura B-104. Fuerza lateral en J Turn para vehículos pequeños a alta velocidad  
Figura B-105. Aceleración lateral en J Turn para vehículos pequeños a alta velocidad  
Figura B-106. Trayectoria en J Turn para vehículos medianos a baja velocidad  
Figura B-107. Ángulo de deriva en J Turn para vehículos medianos a baja velocidad  
Figura B-108. Fuerza lateral en J Turn para vehículos medianos a baja velocidad  
Figura B-109. Aceleración lateral en J Turn para vehículos medianos a baja velocidad  
Figura B-110. Trayectoria en J Turn para vehículos medianos a alta velocidad  
Figura B-111. Ángulo de deriva en J Turn para vehículos medianos a alta velocidad  
Figura B-112. Fuerza lateral en J Turn para vehículos medianos a alta velocidad  
Figura B-113. Aceleración lateral en J Turn para vehículos medianos a alta velocidad  
Figura B-114. Trayectoria en J Turn para vehículos deportivos a baja velocidad  
Figura B-115. Ángulo de deriva en J Turn para vehículos deportivos a baja velocidad  
Figura B-116. Fuerza lateral en J Turn para vehículos deportivos a baja velocidad  
Figura B-117. Aceleración lateral en J Turn para vehículos deportivos a baja velocidad  
Figura B-118. Trayectoria en J Turn para vehículos deportivos a alta velocidad

- Figura B-119. Ángulo de deriva en J Turn para vehículos deportivos a alta velocidad
- Figura B-120. Fuerza lateral en J Turn para vehículos deportivos a alta velocidad
- Figura B-121. Aceleración lateral en J Turn para vehículos deportivos a alta velocidad
- Figura B-122. Trayectoria en J Turn para furgonetas a baja velocidad
- Figura B-123. Ángulo de deriva en J Turn para furgonetas a baja velocidad
- Figura B-124. Fuerza lateral en J Turn para furgonetas a baja velocidad
- Figura B-125. Aceleración lateral en J Turn para furgonetas a baja velocidad
- Figura B-126. Trayectoria en J Turn para furgonetas a alta velocidad
- Figura B-127. Ángulo de deriva en J Turn para furgonetas a alta velocidad
- Figura B-128. Fuerza lateral en J Turn para furgonetas a alta velocidad
- Figura B-129. Aceleración lateral en J Turn para furgonetas a alta velocidad
- Figura B-130. Trayectoria en Fishhook para vehículos pequeños a baja velocidad
- Figura B-131. Ángulo de deriva en Fishhook para vehículos pequeños a baja velocidad
- Figura B-132. Fuerza lateral en Fishhook para vehículos pequeños a baja velocidad
- Figura B-133. Aceleración lateral en Fishhook para vehículos pequeños a baja velocidad
- Figura B-134. Trayectoria en Fishhook para vehículos pequeños a alta velocidad
- Figura B-135. Ángulo de deriva en Fishhook para vehículos pequeños a alta velocidad
- Figura B-136. Fuerza lateral en Fishhook para vehículos pequeños a alta velocidad
- Figura B-137. Aceleración lateral en Fishhook para vehículos pequeños a alta velocidad
- Figura B-138. Trayectoria en Fishhook para vehículos medianos a baja velocidad
- Figura B-139. Ángulo de deriva en Fishhook para vehículos medianos a baja velocidad
- Figura B-140. Fuerza lateral en Fishhook para vehículos medianos a baja velocidad
- Figura B-141. Aceleración lateral en Fishhook para vehículos medianos a baja velocidad
- Figura B-142. Trayectoria en Fishhook para vehículos medianos a alta velocidad
- Figura B-143. Ángulo de deriva en Fishhook para vehículos medianos a alta velocidad
- Figura B-144. Fuerza lateral en Fishhook para vehículos medianos a alta velocidad
- Figura B-145. Aceleración lateral en Fishhook para vehículos medianos a alta velocidad
- Figura B-146. Trayectoria en Fishhook para vehículos deportivos a baja velocidad
- Figura B-147. Ángulo de deriva en Fishhook para vehículos deportivos a baja velocidad
- Figura B-148. Fuerza lateral en Fishhook para vehículos deportivos a baja velocidad
- Figura B-149. Aceleración lateral en Fishhook para vehículos deportivos a baja velocidad
- Figura B-150. Trayectoria en Fishhook para vehículos deportivos a alta velocidad
- Figura B-151. Ángulo de deriva en Fishhook para vehículos deportivos a alta velocidad
- Figura B-152. Fuerza lateral en Fishhook para vehículos deportivos a alta velocidad
- Figura B-153. Aceleración lateral en Fishhook para vehículos deportivos a alta velocidad
- Figura B-154. Trayectoria en Fishhook para furgonetas a baja velocidad
- Figura B-155. Ángulo de deriva en Fishhook para furgonetas a baja velocidad
- Figura B-156. Fuerza lateral en Fishhook para furgonetas a baja velocidad
- Figura B-157. Aceleración lateral en Fishhook para furgonetas a baja velocidad
- Figura B-158. Trayectoria en Fishhook para furgonetas a alta velocidad
- Figura B-159. Ángulo de deriva en Fishhook para furgonetas a alta velocidad
- Figura B-160. Fuerza lateral en Fishhook para furgonetas a alta velocidad
- Figura B-161. Aceleración lateral en Fishhook para furgonetas a alta velocidad

