

# Análisis del comportamiento dinámico de un automóvil dotado de asientos basculantes

C. Casqueiro Placer<sup>(1)</sup>, A. Suárez García<sup>(1)</sup>, J.A. Vilán Vilán<sup>(2)</sup>, S. Cereijo Fernández<sup>(2)</sup>

(1) Centro Universitario de la Defensa. Escuela Naval Militar  
ccasqueiro@cucl.udc.es

(2) Área Ingeniería Mecánica. Universidad de Vigo

---

Con este trabajo se estudiará el efecto que sobre el comportamiento dinámico de un vehículo tiene el empleo de asientos basculantes como los propuestos por la empresa Vaivencar SL, reflejados en la solicitud de patente con referencia en la OEPM PCT/ES2007/000094, destinados a aumentar el confort de los ocupantes.

El sistema propuesto por Vaivencar SL consiste en el empleo de asientos basculantes respecto de un eje contenido en un plano paralelo al longitudinal del vehículo y dotados de un sistema de muelle y amortiguador para limitar su movimiento. Su objetivo es reducir la aceleración lateral percibida por los ocupantes del automóvil.

A diferencia del ferrocarril equipado de sistemas pendulares, como los empleados por Talgo, en este caso sólo basculará el asiento y su ocupante respecto de la estructura del vehículo. A efectos de confort del individuo parece, a priori, igualmente efectivo a la vez que más simple y económico. Sin embargo es necesario estudiar también la influencia que sobre la dinámica vehicular tendrá el dispositivo propuesto. Para ello se realizaron ensayos sobre un pequeño automóvil adaptado a tal efecto así como numerosas simulaciones realizadas con diferentes parámetros geométricos y de rigidez de muelle y amortiguador.

Las pruebas realizadas mostraron enseguida que si bien el ocupante del vehículo aumenta su nivel de confort, el comportamiento dinámico puede verse afectado negativamente. La definición de parámetros que acoten esta aficción a niveles razonables, a la par que se mantiene el efecto positivo, es el objetivo del estudio que aquí presentamos.

Para alcanzar los objetivos propuestos la simulación se ha realizado sobre modelos bi y tridimensionales, que permiten conocer la influencia del movimiento del conjunto asiento-ocupante sobre las fuerzas de contacto rueda-suelo y así predecir la tendencia al vuelco o al deslizamiento del vehículo.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

En el año 2007 la empresa Vaivencar SL patenta un sistema de asiento basculante para vehículos automóviles. Su objetivo es mejorar el confort de los ocupantes del vehículo de una manera sencilla, fiable y económica. Su campo de aplicación sería cualquier automóvil, tanto de turismo como servicios públicos (autobuses, ambulancias) o incluso vehículos de competición donde el piloto se ve sometido a las máximas exigencias físicas.

Para la demostración de sus características la propia empresa adaptó un pequeño vehículo de tipo buggy, originalmente biplaza y dotado de un motor de 250 cc. Las modificaciones eliminaron los dos asientos, sustituyéndolos por una barquilla basculante que albergaba un único asiento, el del conductor. Con este prototipo se realizarían diversas demostraciones y ensayos, incluidos los de medición del esfuerzo que diferentes músculos de cuello y tronco del ocupante de un vehículo realizan cuando se circula en curva, sometido a aceleraciones laterales de valores similares a los que se tienen en una conducción normal. Estos ensayos realizados por el traumatólogo y especialista en medicina deportiva, Mario Galán resultaron plenamente satisfactorios desde este punto de vista, tal y como reflejan los resultados con valores de esfuerzo muscular hasta 10 veces menores de lo normal.

Sin embargo en los ensayos realizados para cuantificar las aceleraciones sufridas por el ocupante del vehículo y los esfuerzos que sobre su musculatura se generan se observó un preocupante aumento en la tendencia del vehículo al vuelco. Sobre este efecto trata el estudio realizado en este análisis.

## 2. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ASIENTO BASCULANTE

El asiento basculante presentado por la empresa Vaivencar y objeto de patente en España (OEPM PCT/ES2007/000094) y otros países consta de una barquilla que alberga el asiento, pedales y volante del vehículo en el caso del conductor (garantizando así que la posición de éste respecto de los mandos sea constante), conectada al resto del bastidor mediante dos apoyos articulados que conforman su eje de giro. La barquilla puede girar libremente o complementarse con un conjunto muelle amortiguador.

La sencillez del sistema propuesto radica en la relativa facilidad para su implementación y en el hecho de que el giro se produzca de forma natural, sin necesidad de accionamiento que lo provoque. El principio empleado es el mismo que el de la pendulación de un tren TALGO: el centro de balanceo del conjunto basculante se sitúa por encima de su centro de masas lo que provoca que en las curvas bascule inclinándose hacia su interior. Esta basculación provoca que el ocupante se sitúe de tal manera que la aceleración centrífuga y el peso actúen de manera oblicua al cuerpo del viajero y de esta manera el efecto lateral percibido sea menor. Sin embargo, a diferencia del TALGO no bascula toda la carrocería sino solamente una barquilla en la que se sitúa el ocupante.

En la figura 1 se muestran dos imágenes en curva del vehículo, en el primer caso con el dispositivo funcional y en el segundo con él bloqueado y el vehículo comportándose de manera convencional. Vemos como la fuerza centrífuga percibida por el ocupante que actúa en el primer caso podemos descomponerla en una fuerza lateral al mismo y otra que lo empuja contra el propio asiento. En el caso convencional, con el dispositivo anulado, la fuerza centrífuga es prácticamente lateral en su totalidad y apenas disminuye por la aparición de una pequeña componente que tiende a levantar al ocupante del asiento en caso de que el vehículo balancee.



Figura 1. Reducción de la fuerza lateral percibida con el sistema basculante.

Como se ha indicado, el sistema se dota además de un conjunto de muelle y amortiguador, ya que las primeras pruebas así lo aconsejaron a sus desarrolladores para evitar unas oscilaciones excesivas e incómodas a los viajeros. Fue en estas pruebas desarrolladas donde se comprobó algo ya percibido en los ensayos iniciales del prototipo: un incremento significativo de la tendencia al vuelco.

El trabajo aquí presentado cuantifica mediante simulación el efecto perjudicial detectado en las pruebas de pista con el prototipo y analiza la viabilidad de aunar mejora en confort con un comportamiento dinámico aceptable.

### 3. OBJETIVOS

Como ya se ha indicado, el objetivo es cuantificar el efecto que sobre la dinámica del vehículo, en particular la tendencia al vuelco, produce la instalación del sistema de asiento basculante presentado por Vaivencar y analizar la posibilidad de limitar este efecto perjudicial con un funcionamiento satisfactorio desde el punto de vista del confort.

La consecución del objetivo indicado pasará por la realización de diferentes pruebas de pista con el prototipo y la realización de diferentes simulaciones que permitan extender los resultados a un mayor número de situaciones de marcha, ampliando el espectro de velocidades y trayectorias posibles.

La simulación se realizó con Matlab para la resolución, mediante Simulink, de las ecuaciones diferenciales correspondientes al movimiento del vehículo, así como el cálculo de las reacciones en el apoyo rueda-suelo.

### 4. MODELADO DEL VEHÍCULO Y SISTEMA BASCULANTE

Para el estudio mediante resolución de las ecuaciones diferenciales que rigen el movimiento se planteará un modelo matemático que ofrezca un grado de realismo suficiente a la par que la mayor sencillez posible. Las ecuaciones diferenciales que resultan del modelo elegido se representarán a continuación en Simulink de Matlab para su resolución y la obtención de los resultados correspondientes.

El modelo matemático empleado para la simulación se corresponde con el esquema simplificado, mostrado en la figura 2.

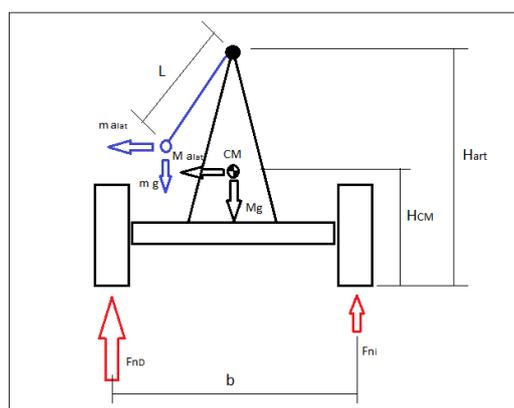


Figura 2. Esquema del conjunto vehículo basculante.

Se trata de un modelo, bidimensional y que considera el conjunto del basculante como un péndulo ideal y al vehículo carente de suspensión. Los motivos para emplear este modelo con un grado tan alto de simplificación son:

- El modelo bidimensional corresponde con el más habitual considerado para establecer la velocidad límite de vuelco de un vehículo. Implica considerar la fuerza centrífuga de manera totalmente transversal, lo que es aceptable siempre que el radio de giro sea muy superior a la batalla del vehículo.
- Bajo esta misma hipótesis el estudio del desplazamiento y la fuerza percibida por el ocupante no requiere de la tercera dimensión.
- Nos basta con obtener una aproximación al grado en que el sistema influye en el comportamiento del vehículo frente al vuelco, pero no pretendemos conocer con precisión los valores de la fuerza de normal en cada rueda, ni predecir cuál de las ruedas interiores perderá antes el contacto.

El modelo seleccionado se traduce en las siguientes expresiones que corresponden a la ecuación diferencial del movimiento del péndulo (1) y las ecuaciones de la estática que

permiten obtener las fuerzas del contacto rueda-suelo (2 y 3), siendo  $m$  la masa del basculante,  $M$  la masa restante del vehículo,  $l$  la longitud del péndulo,  $H_{art}$  la altura de la articulación del basculante y  $H_{CM}$  la del centro de masas al suelo y  $b$  la vía del vehículo.

$$m \ddot{\theta} l = m a_{lat} \cos \theta - m g \sin \theta - K \theta l - B \dot{\theta} l = m \ddot{\theta} l \tag{1}$$

$$N_{ext} = \frac{M g}{2} + \frac{M a_{lat} H_{CM}}{b} + (a_{lat} \sin \theta + m \dot{\theta}^2 l + m g \cos \theta) \frac{\cos \theta}{2} + (a_{lat} \sin \theta + m \dot{\theta}^2 l + m g \cos \theta) \frac{\sin \theta H_{art}}{b} - (a_{lat} \sin \theta + m \dot{\theta}^2 l) \frac{l}{b} \tag{2}$$

$$N_{int} = \frac{M g}{2} - \frac{M a_{lat} H_{CM}}{b} + (a_{lat} \sin \theta + m \dot{\theta}^2 l + m g \cos \theta) \frac{\cos \theta}{2} - (a_{lat} \sin \theta + m \dot{\theta}^2 l + m g \cos \theta) \frac{\sin \theta H_{art}}{b} + (a_{lat} \sin \theta + m \dot{\theta}^2 l) \frac{l}{b} \tag{3}$$

Para la resolución de las ecuaciones indicadas se recurre a Simulink de Matlab, donde se representan mediante el correspondiente diagrama de bloques, mostrado en la figura 3.

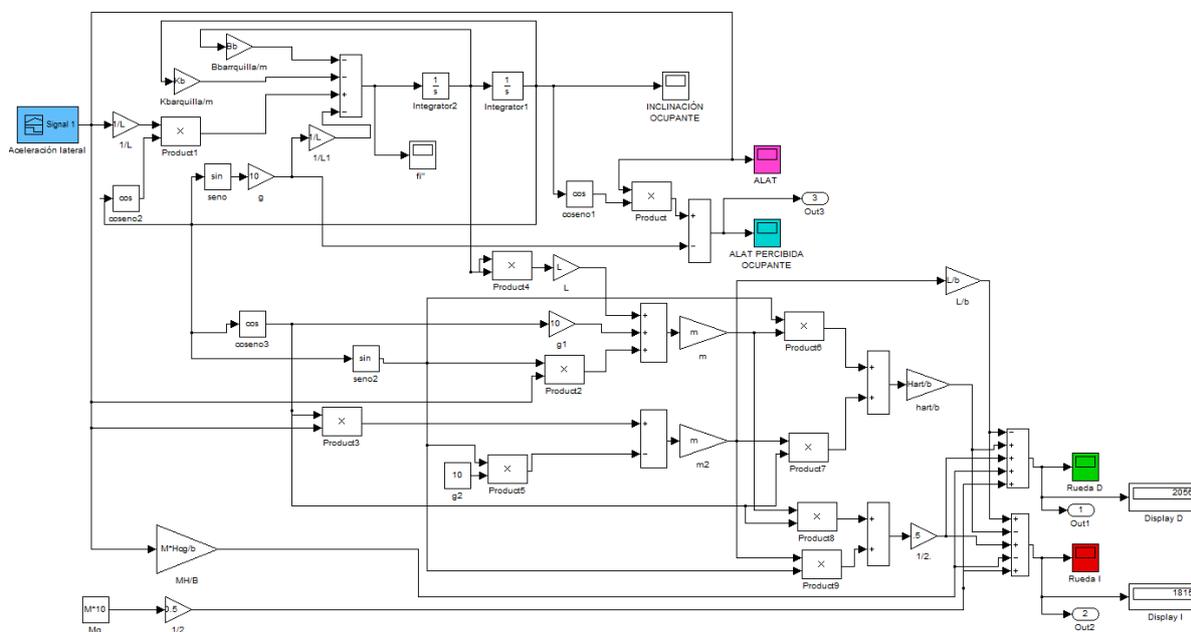


Figura 3. Implementación en Simulink de las ecuaciones diferenciales del sistema.

El modelo empleado considera una entrada, la aceleración lateral, y 4 salidas principales: fuerza normal en apoyo rueda-suelo izquierda y derecha, aceleración lateral percibida e inclinación del basculante.

El análisis del problema pasa así por el modelado matemático del vehículo y su sometimiento a diferentes aceleraciones correspondientes a distintas situaciones de trazado de curva de radio constante o variable, a distintas velocidades no necesariamente constantes, curvas enlazadas, impacto lateral...

### 5. MONITORIZACIÓN DEL VEHÍCULO DE PRUEBAS

Con la intención de corroborar los resultados obtenidos en las simulaciones, así como realizar pruebas de esfuerzo muscular a los ocupantes se dotó a un pequeño vehículo monoplaza del sistema basculante y se monitorizó convenientemente, dotándolo de un sistema de adquisición de datos que recogía los valores de las aceleraciones transversal al vehículo y a la barquilla, así como el ángulo girado por ésta.

El sistema elegido fue un EVO 3 de la casa AIM, empleado ampliamente en el estudio de la dinámica de vehículos de competición. Para la lectura de los valores correspondientes a los diferentes parámetros se recurrió a los acelerómetros internos del datalogger, en sentido longitudinal y transversal al eje del vehículo, un acelerómetro externo para registrar los valores de aceleración lateral percibida por el ocupante montado en la barquilla basculante y un sensor de posición lineal, empleado para la medida indirecta del ángulo del basculante con la vertical.

## 6. EXPERIMENTACIÓN Y ENSAYOS VIRTUALES

Los ensayos realizados sobre el vehículo de pruebas se refieren aquí por su utilización para estudiar el comportamiento del sistema. Se emplearon estos ensayos para verificar la funcionalidad y utilidad del sistema en cuanto al confort del ocupante y, en cuanto al comportamiento del vehículo, de manera cualitativa. Se realizaron ensayos de radio constante, en ocho, y sobre un pequeño circuito que combinaba giros cerrados con otros de velocidad media.

En la figura 4 se observa una gráfica obtenida de los datos registrados con los acelerómetros, registrados con el sistema AIM. Se trata de un ensayo realizado sobre un circuito en forma de ocho, a velocidad reducida, si bien las aceleraciones laterales eran relativamente elevadas en torno a 0,8g. La gráfica muestra, para la configuración ensayada del sistema, una reducción del orden del 12% en las fuerzas laterales percibidas.

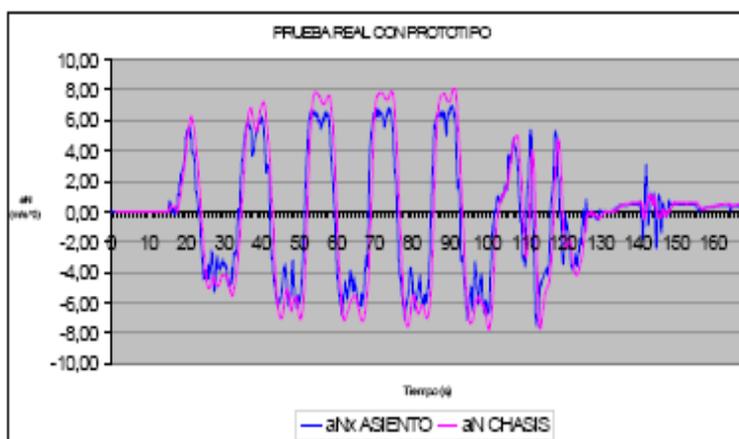


Figura 4. Resultados comparados de aceleración lateral y percibida en el prototipo.

La escasa reducción en la aceleración lateral mostrada se justifica en lo limitado de la amplitud del movimiento del basculante en la configuración correspondiente al ensayo, con una constante elástica elevada pero carente de amortiguación.

Al no disponer de sensores que permitieran registrar el trabajo de la suspensión no fue posible determinar en estos ensayos la fuerza de normal rueda suelo. Sin embargo sí se pudo comprobar, aun de una manera imprecisa, como el automóvil perdía en algunos casos el contacto de su rueda interior trasera y, en ocasiones, también la delantera hasta llegar incluso al vuelco. Este efecto se producía a menores velocidades (dato que sí se registraba) y consecuentemente menores aceleraciones laterales (también registradas) cuando el sistema basculante se encontraba habilitado. Sin embargo, dada lo impreciso de la percepción de dicha pérdida de contacto, no fue posible extraer de estos ensayos información relevante acerca del % de reducción de la velocidad.

La imposibilidad para realizar estas medidas de manera experimental obligó a realizar el estudio cuantitativo mediante ensayos virtuales. Para ello se empleó el modelo virtual descrito, implementado en Simulink de Matlab.

Los ensayos virtuales se realizaron con dos objetivos: optimizar el sistema desde el punto de vista del confort del usuario y verificar la afección que el funcionamiento del mismo tiene sobre la dinámica del vehículo.

Para ello se realizaron los siguientes ensayos:

| Tipo                      | Aceleración lateral máxima (m/s <sup>2</sup> ) | Tiempo transición (s) | Tiempo Estacionario (s) |
|---------------------------|--|-----------------------|-------------------------|
| Curva $a_{lat}$ constante | 5  | 0.5                   | 10                      |
|                           | 10   | 1                     | 6                       |
| Ocho                      | 5  | 0.5                   | 10                      |
|                           | 10   | 1                     | 6                       |
| Impacto lateral           | 150  | 0.1                   | 0                       |

Tabla 1. Ensayos realizados sobre el modelo virtual

La tipología de estos ensayos, en lo que se refiere a la aceleración lateral, se muestra con mayor claridad en la figura 5:

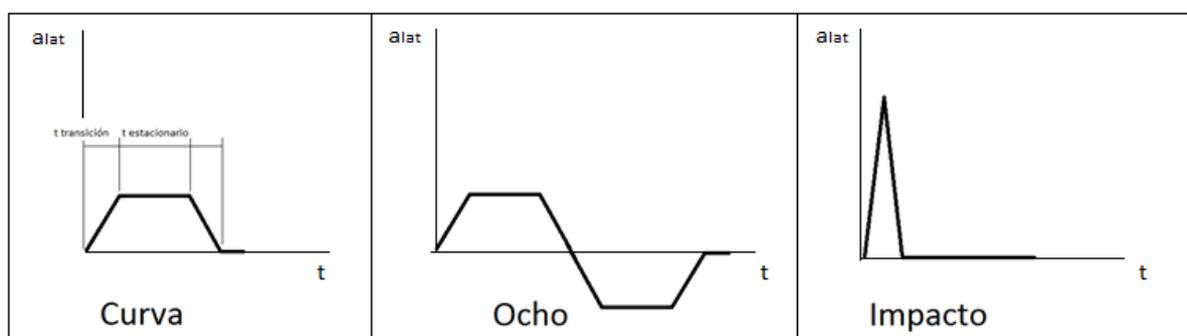


Figura 5. Forma de la señal de entrada (aceleración lateral).

En cada ensayo se analizó:

- Valor máximo de la aceleración lateral percibida y oscilación.
- Valor máximo del ángulo del basculante con la vertical en cada sentido.
- Valor mínimo de la normal de contacto rueda suelo.

Los ensayos se realizaron para distintos valores de constante elástica y amortiguamiento en el eje del basculante.

## 7. RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos en los diferentes ensayos para distintos valores de los parámetros de elasticidad y amortiguamiento.

A continuación, figura 6, vemos algunos resultados de la aceleración lateral percibida para diferentes constantes elásticas, entre 0 y 50 Nm/rad, y amortiguamientos de 0, 5 y 20 Nms/rad. Se comprueba que a valores de K reducidos se disminuye mucho la aceleración lateral percibida y a valores elevados la reducción es menor como corresponde a un ángulo de inclinación del basculante más pequeño. Se observa también, figura 7, como amortiguamientos nulos resultan en oscilaciones pronunciadas mientras que aumentar el amortiguamiento hasta cierto punto mitiga esta oscilación. Valores elevados de amortiguamiento genera una excesiva lentitud del movimiento del basculante provoca que se encuentre por momentos muy lejos de su posición de equilibrio y se incrementa así la aceleración lateral percibida. Este efecto es especialmente significativo a la salida de la curva.

En cuanto a la dinámica del vehículo, el movimiento del basculante incrementa la transferencia de masas entre las ruedas interior y exterior, lo que disminuye la adherencia

total del eje y aumenta la tendencia al vuelco, que se producirá cuando la normal en la rueda interior se anule. En la figura 8 se observa el valor de dicha normal frente al tiempo para diferentes valores de los parámetros de diseño del sistema.

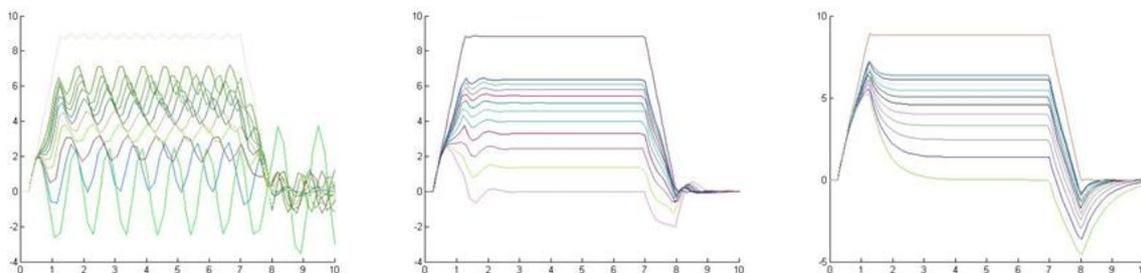


Figura 6. Aceleración lateral percibida para un pulso de  $10 \text{ m/s}^2$  con valores de  $K = 0$  hasta  $50 \text{ Nm}$  en incrementos de 5 unidades, para  $B = 0$  (izquierda), 5 (centro) y 20 (derecha).

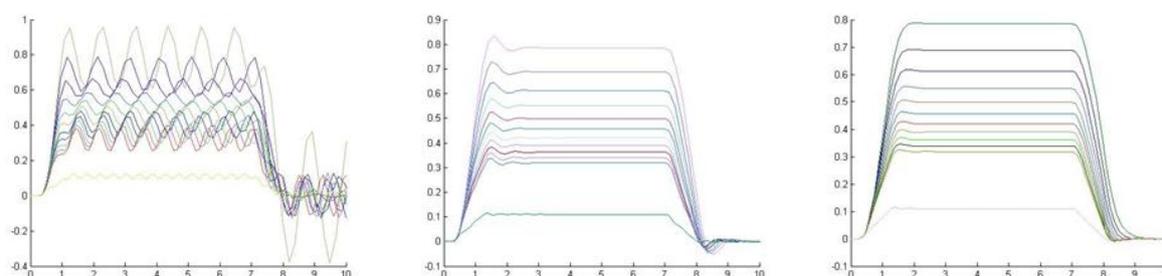


Figura 7. Inclinación del basculante para un pulso de  $10 \text{ m/s}^2$  con valores de  $K = 0$  hasta  $50 \text{ Nm}$  en incrementos de 5 unidades, para  $B = 0$  (izquierda), 5 (centro) y 20 (derecha).

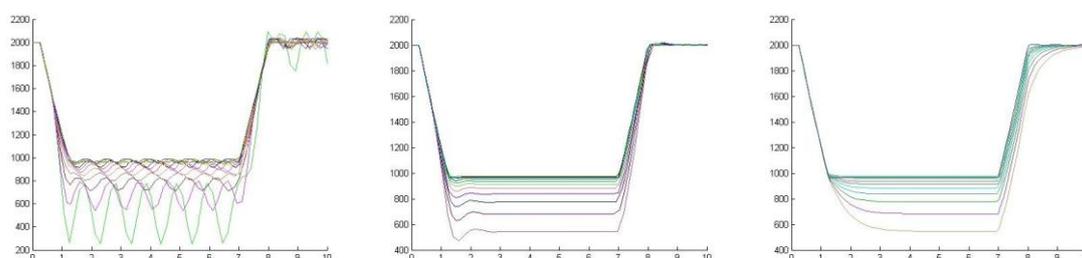


Figura 8. Normal en la rueda interior al giro para un pulso de  $10 \text{ m/s}^2$  con valores de  $K = 0$  hasta  $50 \text{ Nm}$  en incrementos de 5 unidades, para  $B = 0$  (izquierda), 5 (centro) y 20 (derecha).

Se observa como para el vehículo ensayado la implementación del sistema basculante reduce en hasta un 70% el valor mínimo de la normal de contacto en la rueda interior. Esta reducción es menor si se incluye amortiguamiento. Así la normal se puede mantener con facilidad en un 50 % del valor que se tendría en el automóvil carente de asiento basculante. Valores de constante elástica del orden de 20-25  $\text{Nm/rad}$  permiten minimizar la pérdida hasta un 10-20%.

Si observamos la figura 9 comprobamos que valores  $K = 20 \text{ Nm/rad}$  con amortiguamientos de 5  $\text{Nms/rad}$  reducciones de la aceleración lateral percibida superiores al 50%, con una inclinación inversa (en sentido contrario a la curva) máxima a la salida de la curva de menos de 0,05 rad y valores de fuerza normal mínima de 900 N (10% de reducción respecto a la fuerza registrada en ausencia de basculante). Con estos parámetros, ante un ensayo de impacto lateral se reduce entorno al 50 % la aceleración lateral percibida.

Alternativamente se podría recurrir a valores de constante elástica menores (por ejemplo 10 Nm/rad) con grandes amortiguamientos, ofreciendo resultados similares en el ensayo de paso por curva, pero penaliza el comportamiento en ensayo de curva enlazada e impacto lateral.

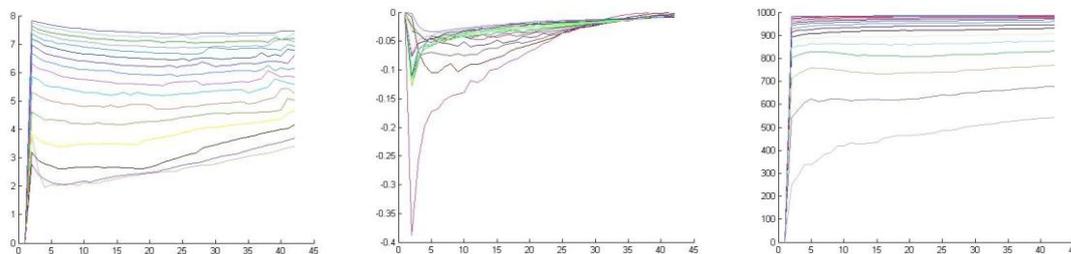


Figura 9. Aceleración lateral máxima percibida (izquierda), inclinación inversa máxima del basculante (centro) y mínima fuerza normal sobre rueda interior al giro (derecha) para un pulso de  $10 \text{ m/s}^2$  con valores de  $K = 0$  hasta  $50 \text{ Nm}$  frente al amortiguamiento.

## 8. CONCLUSIONES

A la vista de los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El sistema de asiento basculante permite reducir la aceleración lateral percibida por su ocupante.
- El empleo de elementos que limiten la oscilación oponiéndose al desplazamiento (posición y/o velocidad) permiten evitar inversiones en el sentido de dicha aceleración percibida que pudiera resultar origen de incomodidad y desorientación al conductor.
- El empleo de los elementos que reducen la oscilación limita la reducción en la aceleración percibida, al reducir el ángulo de inclinación del ocupante.
- La oscilación del elemento basculante tiene un efecto negativo sobre la dinámica del vehículo al aumentar su tendencia al vuelco y perjudicar la adherencia al existir mayor transferencia de masas.
- El efecto anterior puede ser significativo sobre el vehículo objeto de la prueba, pero resultaría insignificante para automóviles de dimensiones y pesos usuales.
- Una adecuada elección de los parámetros de elasticidad y amortiguamiento en la articulación del basculante permiten mitigar el efecto nocivo a valores casi imperceptibles.
- El sistema ofrece una protección extra en choque lateral en relación al valor de aceleración lateral sufrida en el impacto.

Las conclusiones anteriores se resumen en que la utilización del sistema aun limitada es positiva para el confort e imperceptiblemente negativa para el comportamiento del vehículo si se ajustan los parámetros de diseño del sistema de manera adecuada, por lo que es necesario un estudio previo a la implementación en cada caso. En la actualidad se trabaja en la optimización de los parámetros mediante la aplicación de algoritmos genéticos.

## 9. REFERENCIAS

- T. D. Gillespie, *Fundamentals of vehicle dynamics*. Society of Automotive Engineers, Inc. (SAE), (1992)
- J.C. Polking, *Ordinary Differential Equations using MATLAB. Matlab Curriculum Series*. Prentice Hall, Inc. (1995)
- R. Gao, *Dynamic System Modeling Using MATLAB and Simulink*. MIE397B: Dynamic System Modeling, Analysis, And Simulation, Fall Semester, (2007)