

Modelos matemáticos de la estabilidad lateral de Vehículos de Transporte Colectivo, Industriales y Especiales

D. Arribas⁽¹⁾, A. Martín

⁽¹⁾ *INSIA-Campus Sur de la U.P.M.- Ctra. De Valencia, Km.7-28031 Madrid*
Tel.:91336330-e-mail: d.arribas@upm.es

Área Temática: Vehículos y Transportes

Resumen

En el presente artículo se ha planteado un modelo matemático para simular la dinámica lateral de los vehículos. Además se ha realizado un análisis de sensibilidad de los diferentes factores que influyen en su estabilidad lateral.

Palabras Clave: estabilidad lateral vehículos simulación

Abstract

In this article has been created a mathematical model to simulate the vehicle lateral dynamics. In addition there has developed a sensitivity analysis of different factors influencing its lateral stability.

Keywords: lateral dynamics vehicle simulation

1. Introducción

La finalidad de un vehículo puede ser muy variada. En el caso de vehículos industriales y de transporte colectivo, el objetivo del vehículo es maximizar la carga a transportar para unas condiciones de marcha similares a las de los turismos. Esta maximización de la carga ocasiona que estos vehículos tengan características constructivas muy robustas, que sumado al peso de la carga hacen que el vehículo sea muy pesado. Las particularidades constructivas y de carga, también producen una elevación importante del centro de gravedad, disminuyendo considerablemente su factor de estabilidad estático “SST” ($Via/2 \cdot H_{cdg}$). Todas estas características hacen que los vehículos de transporte colectivo e industrial sean más sensibles a las acciones laterales; sufriendo, en comparación con los turismos, mayores transferencias de carga entre neumáticos del mismo eje para una misma aceleración lateral.

Esta sensibilidad al vuelco, ha ocasionado un mayor esfuerzo en el estudio e investigación del comportamiento lateral de este tipo de vehículos, aumentando la seguridad activa frente al vuelco en los mismos. Este factor de seguridad a la hora del

diseño de un vehículo se convierte en prioritario cuando las consecuencias de un accidente pueden ser fatales. Esto sucede cuando el vehículo está destinado al transporte colectivo de personas; por la integridad de sus ocupantes, o cuando el vehículo está destinado al transporte de mercancías peligrosas; por las consecuencias en el medio ambiente o en otras personas/vehículos implicados en el accidente.

En la normativa de aplicación, (la Directiva 2001/85 y el Reglamento CEPE R111, aplicable a vehículos de transporte colectivo y transporte de mercancías peligrosas, respectivamente), se exige unos requisitos mínimos al vehículo, siendo necesario tener un ángulo de vuelco mayor de 28°, en el caso de los vehículos de Transporte Colectivo, y de 23°, en el caso de los vehículos de transporte de mercancías peligrosas.

Para la verificación de la estabilidad lateral, existen varios métodos:

1. Mediante ensayo en plataforma pivotante o de vuelco, donde se obtiene el valor del umbral de vuelco estático, descritos en la normativa anterior.
2. Mediante ensayos dinámicos del vehículo ante distintas maniobras
3. Mediante modelos matemáticos para la simulación del comportamiento de los vehículos en el ensayo en la plataforma de vuelco y/o en ensayos dinámicos.

En el presente artículo se ha planteado un modelo matemático para simular la dinámica lateral de los vehículos. Éstos, nos serán muy útiles para predecir el comportamiento lateral de un vehículo ante condiciones reales (curva, slalom, baches, etc.) y en los ensayos de vuelco descritos en la normativa de aplicación. En los modelos es posible ajustar las características del vehículo para optimizar su comportamiento y predecir la respuesta de éste antes, por ejemplo, de ser ensayado en la plataforma, o como herramienta para la optimización de las características del vehículo.

2. Desarrollo de modelos matemáticos para la estabilidad lateral

En la actualidad existen diversos modelos para la simulación del comportamiento lateral de vehículos, uno de ellos se recoge en el Reglamento CEPE R111, pero son algo imprecisos o en algunos casos muy costosos en cuanto a tiempo de computación o al elevado número de parámetros necesarios.

Los modelos desarrollados en el presente artículo mejoran la precisión al incluir diversos factores, a la vez que resultan flexibles por las posibilidades que ofrecen a la

hora de simular diferentes vehículos o cargas. Se tratan de modelos dinámicos que han sido enfocados con dos principales objetivos:

- Simulaciones dinámicas laterales (peraltes, aceleraciones laterales, baches, etc.)
- Simulación del ensayo de vuelco estático en plataforma basculante, simulando los diferentes elementos que influyen en éste.

El vehículo se divide en secciones, que se corresponden con cada eje. Los modelos correspondientes a un eje del vehículo se componen de cinco grados de libertad que comprenden el movimiento de la masa suspendida y no suspendida respecto a sus centros de balanceo, incluyendo los desplazamientos verticales y los giros de estas respecto de sus centros de balanceo. Además se ha tenido en cuenta la rigidez lateral de los neumáticos, definiéndose así el quinto grado de libertad correspondiente al desplazamiento transversal del vehículo. Como modelos finales para un eje del vehículo, tendremos dos modelos en función de la tipología de la suspensión; el primero, para suspensión independiente (Figura 1), y el segundo para eje rígido, que contempla la posibilidad de la simulación de neumáticos gemelos (Figura 2).

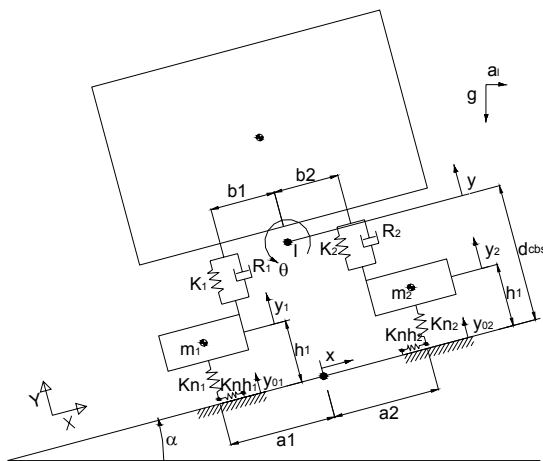


Figura 1. Modelo de suspensión independiente

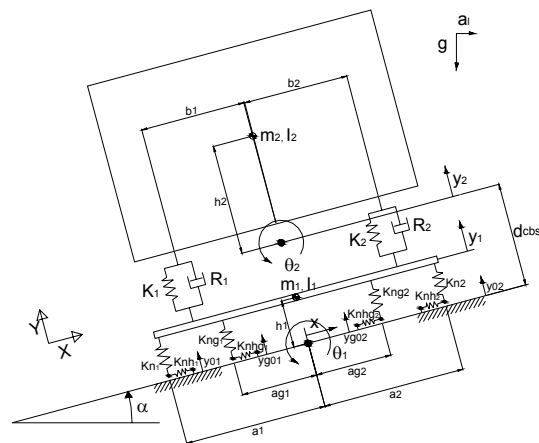
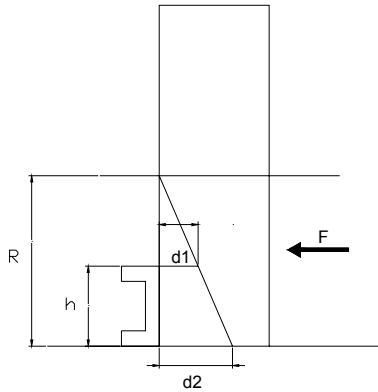


Figura 2. Modelo de eje rígido

Posteriormente se ensamblan los modelos de los ejes para construir el del modelo del vehículo completo teniendo en cuenta la rigidez torsional del bastidor, que unirá las masas suspendidas de los diferentes ejes en sus centros de balanceo. En los modelos desarrollados se han tenido en cuenta para su simulación fenómenos como la rigidez

lateral de los neumáticos y el efecto del tope que es necesario colocar en los neumáticos para evitar el deslizamiento lateral durante el ensayo de vuelco estático en la plataforma (ver Figura 3), así como el despegue de la misma de los neumáticos y por tanto la modificación del centro de balanceo.



$$F = K_{NL} \cdot d_2 = K'_{NL} \cdot d_1 \Rightarrow K'_{NL} = K_{NL} \cdot \frac{d_2}{d_1} \xrightarrow{\frac{d_2}{d_1} = \frac{R}{R-h}} \left[K'_{NL} = K_{NL} \left(\frac{R}{R-h} \right) \right] \quad (1)$$

Figura 3. Representación del sistema utilizado para determinar la rigidez lateral mayorada del neumático, por el efecto del tope

En la Figura 4 se presenta el modelo correspondiente a un vehículo de dos ejes con sistema de suspensión independiente en el eje delantero y eje rígido en el trasero.

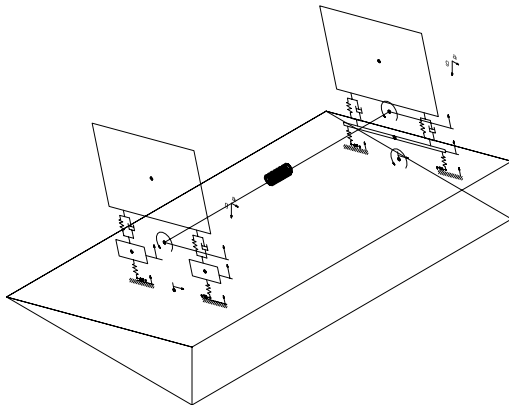


Figura 4. Modelo de dos ejes



Figura 5. Ensayo de estabilidad

2.1. Ecuaciones.

Las ecuaciones del modelo se han planteado imponiendo el equilibrio de fuerzas y de momentos en cada una de las masas en las que se ha dividido el vehículo. Se han planteado las ecuaciones de forma matricial, como se muestra en la Ecuación (2), en la

cual $[M]_{10 \times 10}$ se corresponde con la matriz de masas, $[R]_{10 \times 10}$ se corresponde con la matriz de amortiguamientos, $[K]_{10 \times 10}$ con la matriz de rigideces y $[e]_{10 \times 1}$ con el vector de términos independientes. Los grados de libertad van desde 10 para 2 ejes hasta 15 para 3 ejes.

$$[M] \cdot \begin{bmatrix} \ddot{y}_{11} \\ \ddot{\theta}_{11} \\ \ddot{\theta}_{21} \\ \ddot{y}_{21} \\ \ddot{x}_1 \\ \ddot{y}_{12} \\ \ddot{\theta}_{12} \\ \ddot{\theta}_{22} \\ \ddot{y}_{22} \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + [R] \cdot \begin{bmatrix} \dot{y}_{11} \\ \dot{\theta}_{11} \\ \dot{\theta}_{21} \\ \dot{y}_{21} \\ \dot{x}_1 \\ \dot{y}_{12} \\ \dot{\theta}_{12} \\ \dot{\theta}_{22} \\ \dot{y}_{22} \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + [K] \cdot \begin{bmatrix} y_{11} \\ \theta_{11} \\ \theta_{21} \\ y_{21} \\ x_1 \\ y_{12} \\ \theta_{12} \\ \theta_{22} \\ y_{22} \\ x_2 \end{bmatrix} + [e] = 0 \quad (2)$$

Ecuación para un vehículo de dos ejes y sistema de eje rígido en ambos ejes.

$y_{ij} \equiv$ Desplazamientos verticales de las masas

$\theta_{ij} \equiv$ Giros de las masas

$x_{ij} \equiv$ Desplazamientos horizontales de las masas

3. Validación de los modelos

Con el objetivo de validar los modelos se realiza la simulación del vuelco estático de los vehículos en la plataforma basculante para varios vehículos. Los datos obtenidos se comparan con los datos reales del ensayo y con los resultados del método de cálculo propuesto en el Reglamento CEPE R111 para vehículos cisterna.

En la tabla 1 se pueden observar los resultados de los umbrales de vuelco obtenidos para cuatro vehículos diferentes y los errores cometidos por los modelos desarrollados y los errores del método de cálculo del Reglamento 111.

Tabla 1. Umbrales de vuelco.

	Ensayo	Modelos	R - 111	Error modelos	Error R-111
Vehículo A	26,49°	26,61°	22.48°	0,4 %	15,14 %
Vehículo B	29,80°	29,73°	24,80°	0,23 %	16,78 %
Vehículo C	31,33°	31,34°	28,50°	0,03 %	9,03 %
Vehículo D	26,10°	26,91°	22.95°	3 %	12,07 %

Se puede ver la alta precisión de los modelos, debida principalmente a los factores que han sido tenidos en consideración, como se ha explicado anteriormente.

4. Análisis de sensibilidad

Posteriormente a la validación de los modelos se realizó un exhaustivo análisis de sensibilidad de la estabilidad lateral a la variación de los parámetros del vehículo, con objeto de determinar la influencia en el umbral de vuelco de las principales características del vehículo. En la Figura 6 se puede observar la influencia de diferentes factores para un eje del vehículo. Entre los factores analizados destacan, la rigidez radial y lateral del neumático, rigidez de las suspensiones, rigidez de la barra estabilizadora, altura del centro de gravedad, altura del centro de balanceo de la masa suspendida, rigidez del bastidor (Figura 7), rigidez de las suspensiones para la misma rigidez al balanceo (Figura 8), etc.

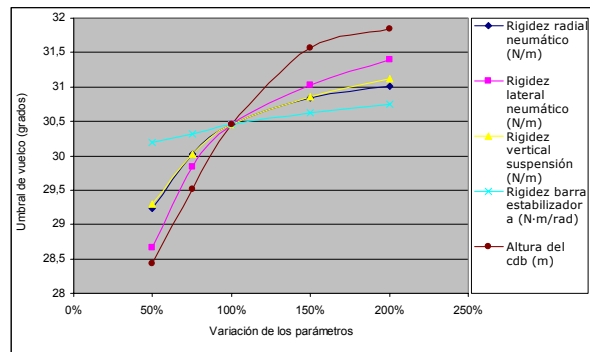


Figura 6. Sensibilidad de los parámetros para un eje

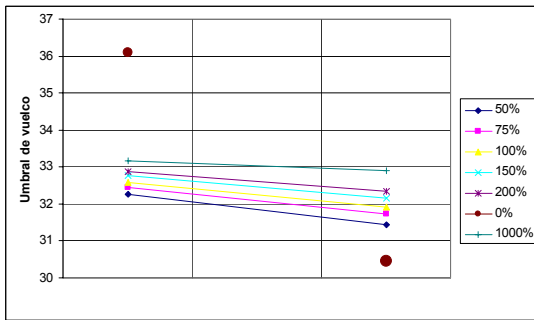


Figura 7. Umbral de vuelco para la variación de la rigidez del bastidor comparado con los umbrales de vuelco de cada sección (independientes)

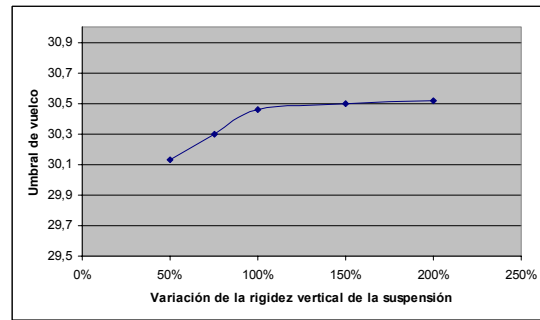


Figura 8. Umbral de vuelco para la variación de la rigidez vertical de la suspensión manteniendo constante la rigidez al balanceo de la suspensión

5. Conclusiones

Se ha elaborado un modelo matemático del comportamiento lateral de los vehículos que permite predecir con precisión su comportamiento lateral, teniéndose en cuenta factores no reflejados en otros modelos existentes, como la rigidez lateral de los neumáticos, los efectos de los neumáticos gemelos y del tope de la plataforma de vuelco.

5. Bibliografía

1. P. J. Liu, S. Rakheja y A. K. W. Ahmed, *Dinamic roll instability analisys using energy approach*, CONCAVE Research Centre, Department of Mechanical Engineering, Concordia University, Montreal.
2. Liu, P.J.; Rakheja, S. y Ahmed, A.K.W. *Dynamic rollover thresshold of articulated freight vehicles*, Heavy Vehicle Systems, A Series of the Int. J. of Vehicle Design, Vol. 5, Nos. 3/4, pp. 300-322. (1998)
3. X. Kang, S. Rakheja y I. Stiharu, *Cargo load shift and its influence on tank vehicle dynamics under braking and turning*, CONCAVE Research Centre, Department of Mechanical Engineering, Concordia University, Montreal.
4. T.-T. Fu y D. Cebon, *Analysis of a truck suspension database*, Department of Mechanical Engineering, National Taiwan University, ROC Cambridge University Engineering Department.
5. Verma, M. K. y Gillespie, *Roll dynamics of commercial vehicles*, Vehicle System Dynamics, 9, pp. 1-17. (1980)
6. Liu, P.J.; Rakheja, S. y Ahmed, *Dynamic rollover thresshold of articulated freight vehicles*, Heavy Vehicle Systems, A Series of the Int. J. of Vehicle Design, Vol. 5, Nos. 3/4, pp. 300-322. (1998)
7. Aparicio, F.; Vera, C. y Díaz, V.; *Teoría de los vehículos automóviles*, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad politécnica de Madrid