

DINÁMICA LATERAL DE UNA DUPLA FERROVIARIA ARTICULADA



Instituto de Investigaciones en Ingeniería Industrial (I4)

Expositor: Dr. Ing. SERRA, Diego

Grupo de trabajo: Dr. E. A. Heidenreich, Ing. E. Tamburini, Ing. G. Domínguez, Dr. C. Rosito

http://www.ingenieria.unlz.edu.ar/ingenieria/?page_id=2448
eheidenreich@ingenieria.unlz.edu.ar

INTRODUCCIÓN

Las duplas ferroviarias articuladas son vehículos modulares conformados por dos coches y una unidad motriz (UM) situada entre ellos. Cada coche exhibe la particularidad de poseer sólo un bogie en un extremo y estar apoyado sobre la UM. Estos tipos de vehículos presentan condiciones particulares de inestabilidad debido a la naturaleza propia de la configuración utilizada. Todo fenómeno producido en la dinámica del sistema es magnificado por la complejidad de la distribución de la formación analizada. El módulo de propulsión (UM) constituye el componente con mayor influencia sobre la dinámica de los coches conducidos, generando así, el interés de su estudio.

El objetivo general es identificar la gama de parámetros de prueba necesarios para la evaluación del rendimiento del vehículo y determinar las condiciones críticas que limitan la velocidad longitudinal de desplazamiento, lo cual produce la reducción del confort de marcha y afectan la seguridad frente al descarrilamiento.

Una limitación importante en el transporte ferroviario es el producido por las vibraciones laterales como respuesta al contacto con la vía. Dichas vibraciones en los coches de pasajeros reducen el confort de marcha, y son capaces de generar un severo desgaste tanto de los rieles como en las ruedas del bogie. Bajo condiciones extremas, estas oscilaciones pueden dar lugar al descarrilamiento de la formación.

Existen dos conceptos básicos a considerar en el comportamiento dinámico lateral de vehículos ferroviarios: es el fenómeno conocido como *hunting*, y la velocidad crítica. El primero de ellos, refiere a la utilización de una sección cónica variable en los perfiles de ruedas, es un movimiento armónico, periódico y oscilante. El segundo, es la velocidad crítica, la cual puede definirse como la velocidad a partir de la cual el vehículo presenta un cambio considerable en su comportamiento dinámico.

A bajas velocidades (< 30 km/h), el fenómeno se observa como una oscilación del coche, de gran amplitud, baja frecuencia, a velocidades más elevadas (> 70 km/h), aumenta la probabilidad de producirse una oscilación de aparición violenta, alta frecuencia, generando el peligro de un eventual descarrilamiento.

En el presente estudio, se ha realizado el análisis dinámico de la dupla articulada denominada "Alerce", de la empresa EMEPA. Dicha dupla se encuentra actualmente en funcionamiento como transporte de pasajeros en la línea Belgrano Norte, en el área metropolitana.

MATERIALES Y MÉTODOS

La dinámica de formaciones ferroviarias depende en gran parte de la fuerte influencia de la vasta cantidad de variables específicas de entrada a considerar y la interacción entre ellas. De esta última observación, nace la necesidad de generar modelos complejos que abarquen la mayor cantidad de información conocida.

Contacto rueda-riel. La fuerza de fricción originada en el contacto rueda-riel es la fuente de efectos no lineales con mayor influencia en la dinámica del vehículo ferroviario. El estudio del contacto se realiza a partir del análisis de 3 grandes grupos: los parámetros puramente geométricos, el problema normal y el tangencial.

Geometría del movimiento. El punto de partida es obtener la coordenada donde se produce el contacto entre cuerpos. Debido a la variación de la forma de los perfiles, el análisis debería efectuarse en todo instante, incrementando el tiempo de ejecución de la simulación. Para evitar dicho inconveniente, se realizó el análisis geométrico en forma previa variando sucesivamente la posición lateral del perfil de la rueda y su orientación respecto del eje longitudinal.

Forma de la zona de contacto. Por tratarse de dos cuerpos elásticos, la zona de contacto no se puede reducir a un simple punto, sino a un área proyectada en forma de elipse descrita por la teoría de contacto de Hertz. Con los radios geométricos previamente calculados y la fuerza normal actuante sobre el área, se obtienen los semiejes a y b de la elipse en cuestión.

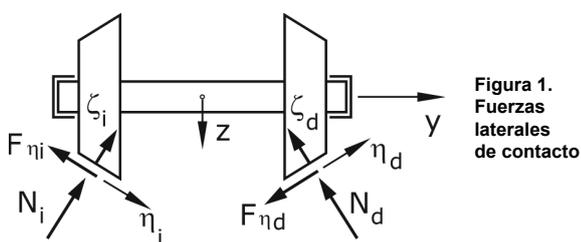


Figura 1.
Fuerzas laterales de contacto

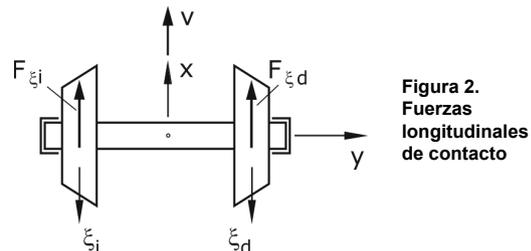


Figura 2.
Fuerzas longitudinales de contacto

Fuerzas tangenciales. El movimiento de la rueda sobre el riel no se produce mediante rodadura pura, sino por una combinación de rodadura por adhesión y una zona de deslizamiento. Debido a este último, las velocidades tangenciales de los cuerpos en contacto difieren entre sí, y son caracterizadas bajo un parámetro adimensional denominado pseudo-deslizamiento. De las teorías de cálculo que cumplen con las condiciones citadas anteriormente, fue seleccionada la teoría simplificada de Kalker, implementada bajo el algoritmo *FastSim*, por presentar las siguientes ventajas:

- Incorporación del efecto spin dentro de la fuerza tangencial y validez para deslizamientos-spin de gran magnitud.
- Corrección del área de contacto debido a la presencia del fenómeno de deslizamiento.
- Incorporación de la ley de saturación de la fuerza debida al rozamiento límite.
- Mayor exactitud en sus resultados en comparación a la teoría lineal.
- Coste computacional aceptablemente bajo respecto de la teoría exacta.

Las fuerzas tangenciales observadas en las Figuras 1 y 2, son computadas por el algoritmo *FastSim* en forma normalizada en un área de contacto discretizada y reducida a un círculo de radio 1, considerando como límite de tracción a la carga normal afectada por el coeficiente de rozamiento μ .

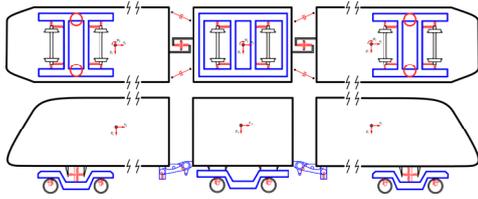


Figura 3. Esquema general de dupla articulada

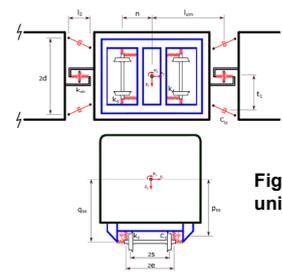


Figura 4. Detalle de unidad motriz

Modelo de la dupla articulada. El presente trabajo se limitó al estudio de la dinámica lateral de la dupla ferroviaria. Para ello, se seleccionaron los grados de libertad que influyen en la estabilidad lateral y que poseen interdependencia, como lo son el desplazamiento lateral, el rolido y el movimiento de lazo alrededor del eje vertical.

En las Figuras 3 y 4 se observan los modelos esquemáticos utilizados en el planteo de las ecuaciones dinámicas. Se consideraron 2 grados de libertad para cada par montado y 3 grados para los bogies y coches remolcados. De esta manera, el esquema completo de la dupla fue conformado por 66 grados de libertad. Las características consideradas en el modelo han sido las siguientes:

- Amortiguadores viscosos de suspensión primaria con tasas de compresión/expansión.
- Rigidez vertical y lateral de la suspensión secundaria correspondiente a carga máxima.
- Barra estabilizadora en coches junto a la suspensión secundaria.
- Barra anti rolido actuante entre coches.
- Amortiguadores viscosos anti lazo ubicados entre coches.
- Masa de elementos no suspendidos incorporada a la masa total soportada por la suspensión.

Ecuaciones dinámicas. La formulación de las ecuaciones dinámicas fue obtenida aplicando las leyes de Newton, tanto para las fuerzas como para los momentos. La convención de signos fue determinada adoptando como referencia la terna de mano derecha con eje z invertido.

Discusión y resultados. Se realizaron pruebas independientes a velocidad constante en una vía recta con los perfiles de ruedas normalizados, usando una trocha de 1435. Al modelo, se le introdujo una excitación lateral del orden de 5 mm, aplicado a los pares montados del bogie del coche delantero.

Influencia de rigidez primaria. La estabilidad del par montado, es el factor crítico en el comportamiento global del vehículo, y por dicho motivo, se ha decidido evaluar el efecto de la variación de la rigidez lateral y longitudinal de la suspensión primaria en la determinación de la velocidad crítica. El enfoque práctico del análisis, se basa principalmente, en la amplia gama de posibles combinaciones aplicables sin generar un excesivo esfuerzo de montaje.

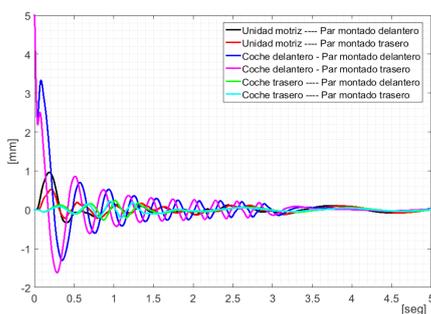


Figura 5. Velocidad máxima amortiguada. (110 km/h)

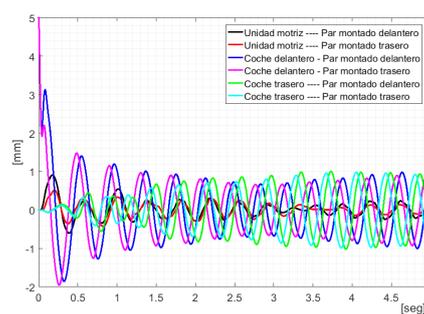


Figura 6. Velocidad crítica en ciclo límite. (130 km/h)

Criterio de inestabilidad. La estabilidad para cualquier sistema puede definirse como la capacidad de retornar a la condición inicial luego de producida una perturbación. Para velocidades menores a la crítica, el sistema responde exhibiendo el decremento rápido de la oscilación retornando a la posición de equilibrio (Figura 5). Para velocidades levemente mayores a la crítica, el sistema pierde su equilibrio original y la señal de respuesta presenta una trayectoria remanente, relativamente continua, denominada ciclo límite (Figura 6). La amplitud de dicho ciclo, puede o no considerarse inestable, dependiendo del criterio aceptado desde el punto de vista normativo.

Sin embargo, un sistema cuya respuesta presenta un ciclo límite, es propenso a perder su estabilidad ante la aparición de una nueva perturbación.

RESULTADOS

Las figuras 7 y 8 reúnen las velocidades obtenidas de la simulación para las diferentes combinaciones de rigidez longitudinal, tanto para la respuesta amortiguada como para la respuesta con ciclo límite presentan las siguientes particularidades:

- Como se puede apreciar, tanto la respuesta amortiguada y la correspondiente al ciclo límite, muestran mayores velocidades conforme aumenta la rigidez longitudinal k_x .
- La rigidez lateral k_y tiene poca influencia, es por ello que no se ha presentado.

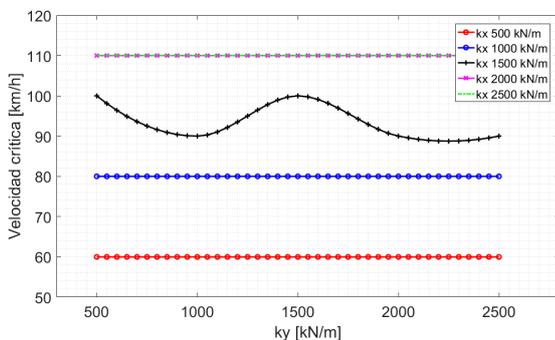


Figura 7. Influencia k_x - Respuesta amortiguada

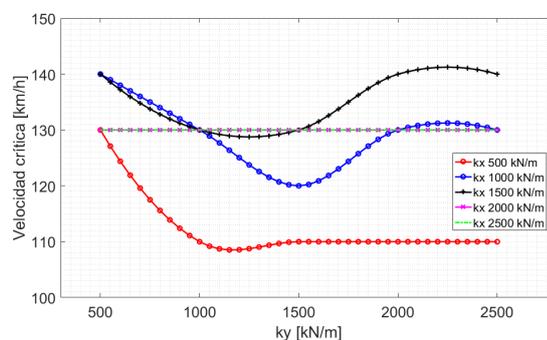


Figura 8. Influencia k_x - Respuesta ciclo límite

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos son suficientes para dar origen a un análisis preliminar donde se observa que las duplas ferroviarias tienen una importante sensibilidad a la variación de la rigidez longitudinal de la suspensión primaria, presentando mejor relación para ambas respuestas (amortiguada y con ciclo límite) en las combinaciones con rigideces longitudinales k_x altas. Sin embargo, las gráficas comparativas muestran respuestas particulares en los valores de rigidez, tanto longitudinal como lateral, cercanos a 1500 kN/m , actuando como punto de inflexión en el comportamiento dinámico. Por dicha observación, será necesario realizar un estudio con mayor profundidad en las cercanías del valor citado, y la posible interacción con otros parámetros y/o variables intervinientes. Además, tendrá gran utilidad la evaluación de la respuesta ante condiciones de excitación aleatorias, utilizando diferentes tipos de perfiles de rueda y trochas.