

Optimización del Contacto Rueda-Carril y Reducción del Desgaste en la Rodadura Ferroviaria de Ruedas Libres Guiadas

Miguel Sánchez-Lozano¹, David Abellán-López², Manuel García-Troya³, José Carlos Miguel-De Priego⁴,
José Luis López-Gómez⁵

¹Instituto de Investigación en Ingeniería (I3E), Univ. Miguel Hernández de Elche, España. Email: msanchez@umh.es

²Instituto de Investigación en Ingeniería (I3E), Univ. Miguel Hernández de Elche, España. Email: dabellan@umh.es

³Instituto de Investigación en Ingeniería (I3E), Univ. Miguel Hernández de Elche, España. Email: manuel.garcia@umh.es

⁴Patentes Talgo S.L.U., España. Email: jcmiguel@talgo.com

⁵Patentes Talgo S.L.U., España. Email: jllopez@talgo.com

Resumen

Los trenes Talgo incorporan un sistema de rodadura propio basado en el empleo de ruedas libres guiadas sobre la vía que presenta importantes diferencias con la rodadura tradicional. Este sistema permite variar independientemente parámetros como los ángulos de ataque y las rigideces de apoyo de cada rueda, lo que posibilita estrategias de control de su posición y de las características del contacto rueda-carril que no serían viables en la rodadura tradicional con ejes rígidos montados. Estas estrategias pueden ser útiles para la optimización del desgaste y el ruido de rodadura. Se presentan aquí los primeros resultados de la línea de investigación abierta en este campo fruto de la colaboración de la Universidad Miguel Hernández con la empresa Patentes Talgo y que está siendo objeto de una Tesis Doctoral.

Palabras clave: contacto rueda-carril, desgaste, optimización, rueda libre.

Abstract

Talgo trains incorporate their own rolling system based on the use of free-guided wheels on the track, which presents significant differences compared to traditional rolling. This system allows the independent variation of parameters such as attack angles and support stiffnesses of each wheel, making it possible to consider strategies to control their position and the wheel-rail contact characteristics that would not be feasible in traditional rigid axle rolling. These strategies can be useful for optimizing wear and rolling noise. Here we present the first results of the research line opened in this field as part of a collaboration between Universidad Miguel Hernández and Patentes Talgo, which is the subject of a Ph.D. thesis.

Keywords: wheel-rail contact, wear, optimization, free wheel.

1. Introducción

1.1. Revisión histórica de las principales diferencias tecnológicas del tren Talgo

Desde su creación, Talgo se ha diferenciado claramente del resto de trenes en el mercado, por la utilización de diversas tecnologías no convencionales. Seguidamente se muestra una revisión histórica de estas tecnologías, sus diferencias y ventajas, que puede ayudar a entender el planteamiento del proyecto que se describe más adelante.

1.1.1. El tren articulado: el "guiado triangular"

A finales de los años 30 del siglo XX, con la reducción de peso y el incremento de velocidad en los trenes de pasajeros, aumentó su inestabilidad y peligro de descarrilamiento. Para minimizar estos riesgos, Alejandro Goicoechea diseñó una composición articulada continua, eliminando los bogies tradicionales, lo que permitía rebajar el centro de gravedad y mejorar la estabilidad.

En la estructura articulada propuesta, cada eslabón de la composición está formado por una estructura triangular ligera y sencilla, con un solo eje en la parte trasera, y cuyo vértice delantero descansa a modo de remolque sobre un punto de articulación situado en el centro del eje del triángulo inmediatamente anterior. La figura 1 muestra un primer prototipo realizado para probar la viabilidad de la configuración propuesta, que fue patentada en 1941 [1].

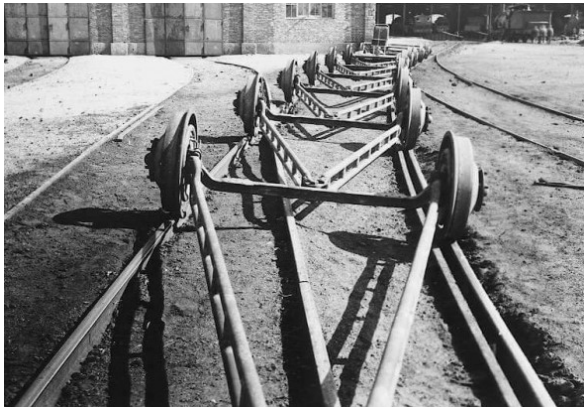


Figura 1. Primer prototipo de "guiado triangular". Fuente: archivo de Talgo

Con esta configuración, el guiado ya no se produce por el contacto con los carriles de las ruedas de perfil cónico montadas sobre ejes rígidos, y se elimina el conocido movimiento de lazo. La dirección marcada por el primer triángulo es seguida por los demás, que siguen la misma trayectoria sin necesidad de ninguna guía adicional.

1.1.2. La rueda libre e independiente

Con el concepto desarrollado, las ruedas interior y exterior tienen que girar a velocidades diferentes en curva, lo que impide el montaje sobre un eje rígido y obliga a adoptar la rodadura libre e independiente de cada rueda. La eliminación del eje físico, junto con la supresión de los bogies, permite situar el piso de los coches a un nivel muy bajo, que además puede mantenerse en el espacio entre las ruedas, permitiendo tanto el acceso de los pasajeros al tren como el paso entre coches a este nivel.

Los detalles asociados a la adopción de la rueda libre se recogen en la siguiente patente presentada en 1942, "Mejoras en los sistemas ferroviarios con articulación ligera combinada" [2]. Esta patente incluye también la posibilidad de desplazamiento transversal de las ruedas, para adaptarse a diferentes anchos de vía (ver figura 2). Esta posibilidad de cambio de ancho se desarrolló años después, dando lugar a un sistema de cambio de ancho con el tren en circulación, que ha constituido durante años otra de las tecnologías diferenciadoras de los trenes Talgo [3].

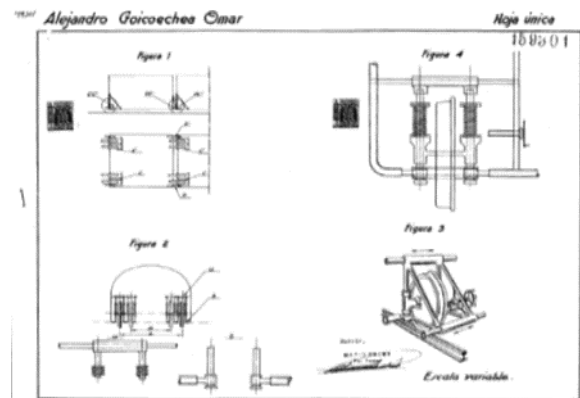


Figura 2. Rueda libre desplazable. Fuente: Patente ES159301A1 [2]

La apuesta de la empresa Patentes Talgo por el desarrollo de estas ideas, dio como primer resultado su incorporación y puesta en práctica en un prototipo denominado Talgo I (figura 3).

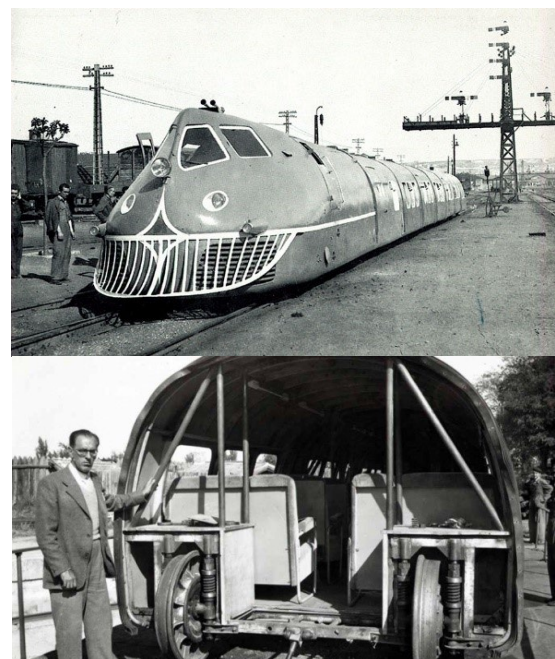


Figura 3. El prototipo Talgo I. Fuente: archivo de Talgo

1.1.3. El sistema de guiado reversible

El sistema de guiado triangular propuesto hace que el eje virtual que une cada pareja de ruedas esté orientado en una dirección que no pasa exactamente por el centro de la trayectoria. Por tanto, las ruedas no permanecen tangentes a los raíles, sino que tienen un ángulo de ataque negativo hacia el interior de la curva. Este efecto puede apreciarse en el croquis que se muestra en la figura 4, extraído de la patente del sistema de guiado presentada por Talgo en 1943 [4].

Para evitar ángulos de ataque excesivamente elevados, bastaba con limitar la longitud de los coches, lo que a priori no representaba un problema grave al tratarse de una composición continua. Por otra parte, este pequeño ángulo de ataque provoca una fuerza de fricción en la parte trasera de la pestaña de la rueda exterior, con una componente vertical hacia abajo que se opone al descarrilamiento.

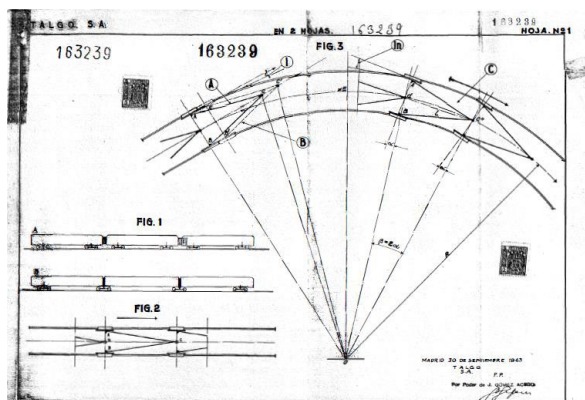
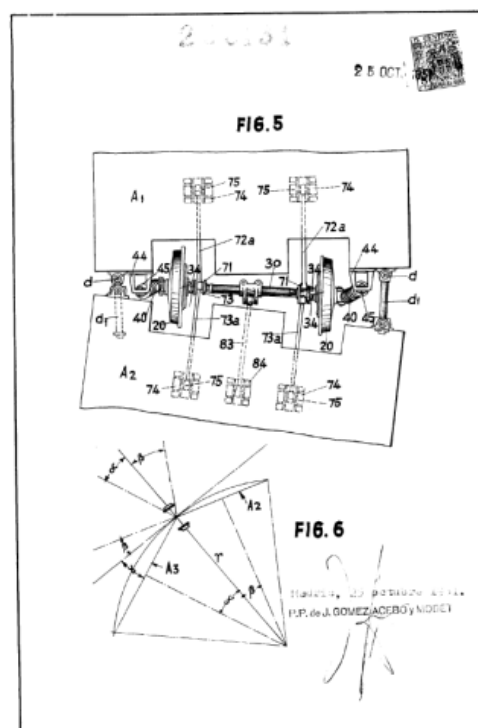


Figura 4. Ángulo de ataque negativo en curva. Fuente: Patente ES163239A1 [4]

Pero el gran problema del sistema de guiado triangular era su irreversibilidad. El autoguiado estable de la composición, y el efecto antidescarrilamiento descrito anteriormente, sólo se producen cuando se tira hacia delante. El sentido de marcha inverso hace que el ángulo de ataque de las ruedas en las curvas pase a ser positivo, la fricción en la pestaña se produce entonces en la parte delantera de la rueda exterior, lo que puede provocar el descarrilamiento a velocidades moderadas. Con la inminente desaparición de las locomotoras de vapor (también irreversibles), la imposibilidad de circular en ambos sentidos representaba un hándicap para desarrollo comercial futuro del tren Talgo.

A principios de los años 50, se patentó un mecanismo destinado a permitir un guiado reversible [5, 6]. Se trata de un sistema inspirado en el mecanismo Watt, que orienta el eje virtual de cada pareja de ruedas según la bisectriz del ángulo formado por los dos coches adyacentes (figura 5). En realidad, las ruedas independientes se montan a ambos lados de una estructura de rodadura denominadas “rodal”, sobre la que actúa el mecanismo de guiado. De esta forma, las ruedas se orientan tangencialmente al carril, y se consigue un ángulo de ataque cercano a cero.

Este mecanismo, que por fin permitía un guiado reversible, se aplicó por primera vez en el Talgo III (figura 6), que empezó a funcionar comercialmente en 1964. El sistema de guiado de los trenes Talgo actuales, con las lógicas optimizaciones de diseño, sigue estando basado en el mecanismo desarrollado entonces.



de balanceo) por encima del centro de gravedad de la caja, aprovechando el reducido espacio que ocupan los ejes entre los coches. De este modo, la fuerza centrífuga que actúa al entrar en una curva provoca naturalmente un ángulo de inclinación en sentido contrario al que se obtendría con la suspensión situada por debajo del centro de gravedad. El principio de funcionamiento se muestra en los croquis de la figura 7, extraídos de la primera patente del sistema de basculación natural [7] publicada en 1975.

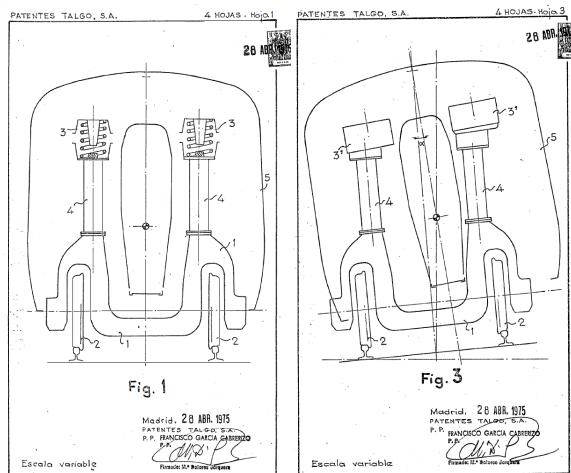


Figura 7. Sistema de pendulación natural. Fuente: Patente ES424615A1 [7].

El sistema se incorporó en servicio en 1980 con el Talgo Pendular (figura 8), y una evolución del mismo sigue utilizándose en trenes de alta velocidad actuales.



Figura 8. Rodal del Talgo Pendular. Fuente: archivo de Talgo

1.1.5. La rodadura de los trenes Talgo de hoy en día

En el Talgo 350, tren de alta velocidad en servicio desde 2000, se combinaron las tecnologías descritas antes, con algunos ajustes destinados a optimizar su comportamiento dinámico. Los resultados obtenidos fueron objeto de diferentes publicaciones [8], y la

evolución de las mismas tecnologías sigue implementándose en el modelo AVRIL, recientemente puesto en circulación.

El sistema de guiado es esencialmente el mismo, pero se incluye un sistema de control activo para el mecanismo de guiado que, a partir de la comparación de las velocidades de giro medidas en cada rueda, es capaz de detectar pequeñas desviaciones en la trayectoria [9, 10]. Las correcciones se realizan en tiempo real, actuando sobre la longitud de determinadas barras del mecanismo, y ajustando el ángulo de ataque de las ruedas para minimizar pérdidas, fricción y vibraciones. También se mantiene en esencia el sistema de basculación natural, aunque el plano de la suspensión secundaria se sitúa a un nivel inferior en los trenes de alta velocidad.

Pero la principal diferencia con respecto a las generaciones anteriores de trenes Talgo es la utilización de una suspensión primaria en los ejes de las ruedas (figura 9), que actúa en serie con la suspensión neumática ubicada en la parte superior de las columnas.

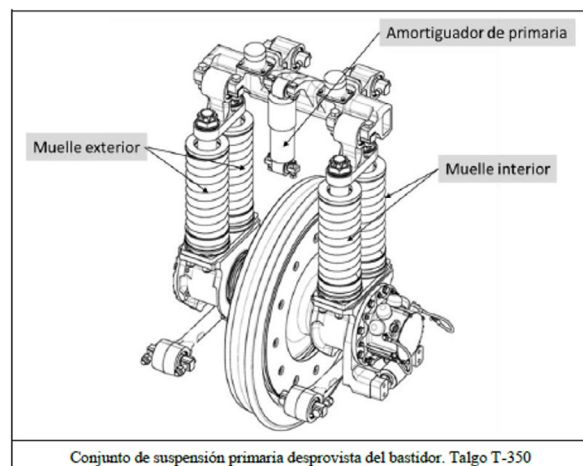


Figura 9. Suspensión primaria incorporada en los trenes de alta velocidad. Fuente: Talgo.

1.2. El problema del contacto rueda-carril y el desgaste, aplicado a la rodadura Talgo

El análisis del contacto rueda-carril es fundamental para el estudio de la dinámica del ferrocarril y ha sido ampliamente estudiado desde los años 20 del siglo pasado. Destacan las teorías desarrolladas, entre otros, por Kalker [11], que han sido ampliamente aceptadas por la comunidad científica y aplicadas mediante software de cálculo específicos. En las últimas décadas, también se han publicado trabajos que proponen algoritmos para la estimación del desgaste asociado a la rodadura, basados en una combinación de análisis numérico de los esfuerzos y deslizamientos en

el contacto y de resultados experimentales de medidas de desgaste en laboratorio [12].

El problema del contacto rueda-carril y el desgaste ha sido objeto de estudio, debido a su impacto significativo en la eficiencia y el mantenimiento de los trenes. Sin embargo, la práctica totalidad de estos estudios se aplican a la rodadura tradicional de ejes rígidos montados, utilizada por la gran mayoría de los trenes en circulación, sin contemplar la posibilidad de variación de parámetros que permite un sistema de rodadura libre. En este contexto, el sistema de rodadura de ruedas libres guiadas utilizado por los trenes Talgo, presenta una oportunidad única para optimizar el contacto rueda-carril mediante la variación de parámetros como los ángulos de ataque y rigideces de apoyo de cada rueda.

La suspensión primaria permite variar el ángulo de caída y el ángulo de ataque de cada rueda de forma independiente, lo que no es posible en rodaduras de ejes montados tradicionales. Esta variación de ángulos se puede lograr mediante la modificación de la altura y rigidez de los soportes de los resortes y la posición de los tirantes longitudinales.

Los trenes Talgo han demostrado en las últimas décadas un excelente rendimiento, en términos de desgaste y de ruido de rodadura, gracias al empleo de los sistemas de guiado y suspensión descritos. Y también se han emprendido estrategias de optimización, probando diferentes variaciones de ángulos y cotas de rodadura, basándose en la experiencia y en el análisis empírico de los desgastes observados durante el mantenimiento de los trenes en circulación.

No obstante, queda abierto un amplio campo de estudio, que incluye en primer lugar el análisis detallado de la influencia de los diferentes parámetros

modificables en las distribuciones de esfuerzos y deslizamientos en el contacto rueda-carril. Y, en última instancia, la estimación de los niveles de desgaste asociados a diferentes perfiles, posiciones de rueda y condiciones de circulación, y el análisis de su sensibilidad a la variación de los mencionados parámetros.

El presente trabajo se enmarca en esta línea. Se desarrollan modelos de elementos finitos detallados, para determinar la posición y geometría de la huella de contacto en diferentes condiciones, y obtener las distribuciones de fuerzas y deslizamientos dentro de la misma. Y se aplican diferentes modelos de desgaste, para estimar el material desgastado en cada caso, y plantear estrategias de optimización para su minimización, y para la reducción de los costes de mantenimiento. Por otro lado, cabe esperar que la optimización del contacto rueda-carril no solo mejore el desgaste, sino que también reduzca el ruido de rodadura.

2. Metodología

Las teorías clásicas para el análisis del contacto rueda-carril, y los programas numéricos que las implementan, están orientadas a aplicaciones tradicionales con ruedas montadas sobre ejes rígidos, y no permite contemplar la variación de los parámetros ahora considerados de una forma suficientemente abierta y flexible.

Se ha hecho necesario por tanto el desarrollo de una metodología novedosa, basada en modelos tridimensionales del contacto entre rueda y rail, resolviendo los problemas de contacto normal y tangencial, para poder obtener después los valores de desgaste para cada configuración estudiada. Se incluyen las fases que se describen a continuación.

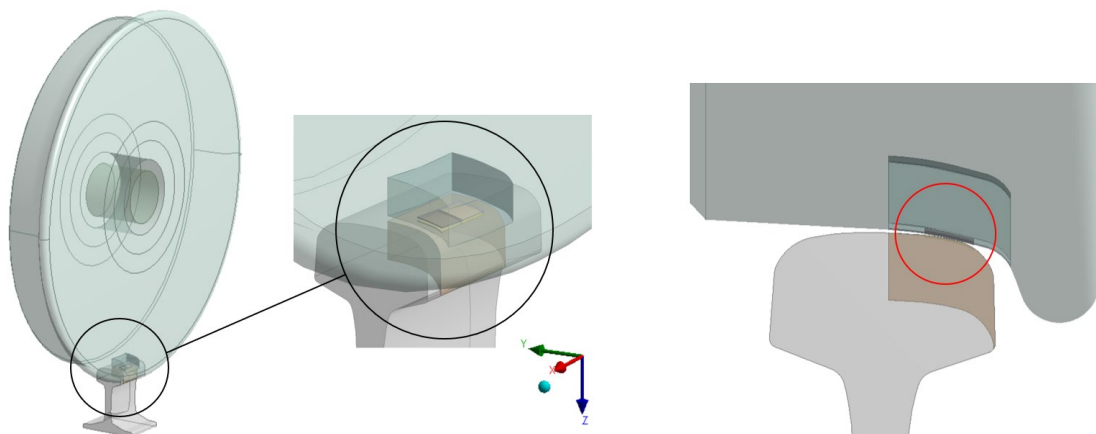


Figura 10. Modelización detallada de la zona de contacto rueda-carril. Fuente: elaboración propia.

2.1. Desarrollo de modelos

En primer lugar, se han elaborado modelos paramétricos de elementos finitos, que permiten la introducción de diferentes perfiles de rueda y de carril (con geometrías nominales o ya desgastadas), así como la libre variación de parámetros tales como los ángulos de caída y convergencia de cada rueda, distintas posiciones transversales sobre la vía, y diversas condiciones dinámicas de circulación.

Se emplea un análisis cuasi-estático utilizando esquemas de integración implícita. La correcta resolución del problema no lineal del contacto, requiere el ajuste del tamaño de los incrementos de tiempo para mantener acotado el error, conocido como disipación numérica, que tiende a suavizar los resultados del cálculo y disminuir los valores obtenidos para la energía disipada por fricción.

Cabe destacar la importancia de asegurar una alta calidad y densidad del mallado en la zona cercana al contacto, que por otra parte varía su posición en función de los parámetros considerados. El punto de contacto debe ser por tanto estimado en cada caso de forma preliminar, para afinar y adaptar el mallado en el volumen que lo rodea (figura 10). Así mismo, es fundamental el ajuste detallado de las rigideces del contacto, para representar fielmente las condiciones de adhesión y deslizamiento en función de las condiciones de fricción.

2.2. Tratamiento estandarizado de los resultados

Para facilitar la comparación entre casos, y la aplicación posterior de algoritmos de optimización y el análisis de sensibilidad, se ha programado un tratamiento estandarizado de los resultados obtenidos en cada simulación, para las soluciones del contacto normal y tangencial.

La solución de contacto normal permite obtener la geometría de la huella de contacto, así como la distribución de presiones normales en la misma, que puede presentar pequeñas variaciones respecto a la teoría de Hertz de pendiendo de las irregularidades geométricas consideradas. En la figura 11 se representa un ejemplo de las salidas gráficas obtenidas, de donde se pueden extraer además los valores numéricos en cualquier punto de interés.

La solución de contacto tangencial incluye en primer lugar la obtención de la distribución de tensiones tangenciales, la magnitud y dirección de los vectores de esfuerzo cortante a lo largo de la huella de contacto (figura 12). También se determinan las zonas de adhesión y deslizamiento, así como la magnitud y

dirección de los microdeslizamientos obtenidos en cada punto de la zona de deslizamiento (figuras 13-14).

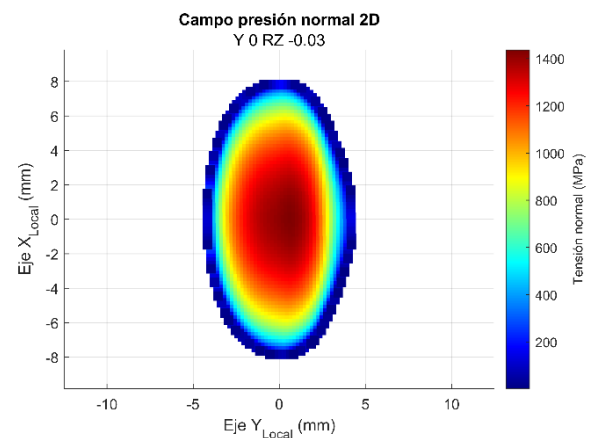


Figura 11. Presiones normales en el contacto.
Fuente: elaboración propia.

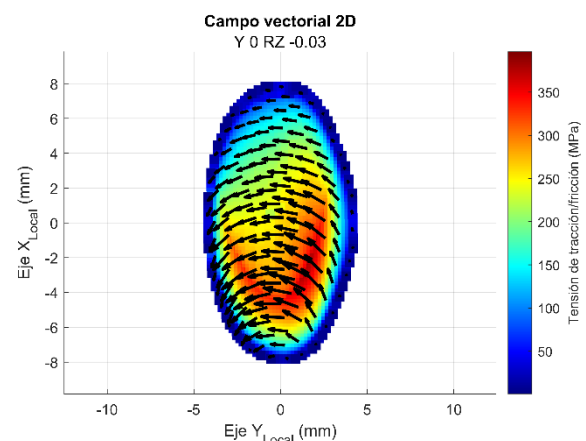


Figura 12. Esfuerzos tangenciales en el contacto.
Fuente: elaboración propia.

2.3. Validación de la metodología de modelización

Para validar la metodología de simulación utilizada, se ha aplicado la misma técnica de modelización, análisis y tratamiento de resultados, a la simulación de casos estándar de rodadura de ejes rígidos. En estos casos, se han comparado los resultados obtenidos para la solución del contacto normal y tangencial, con los obtenidos para esas mismas configuraciones con las formulaciones clásicas, implementadas en el software CONTACT [2], ampliamente aceptado por la comunidad científica.

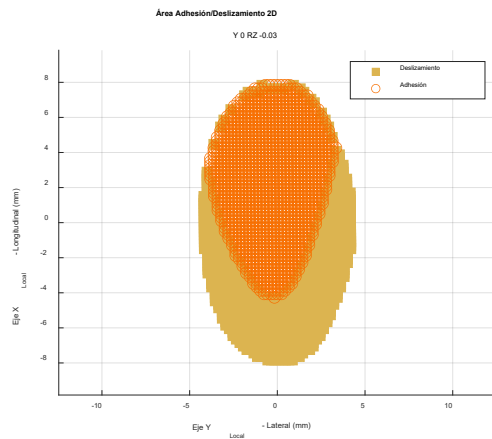


Figura 13. Zonas de adhesión y deslizamiento.
Fuente: elaboración propia.

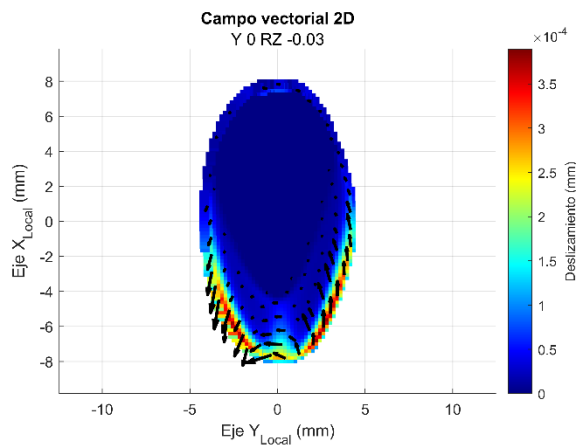


Figura 14. Microdeslizamientos en la huella de contacto.
Fuente: elaboración propia.

2.4. Estimación de la tasa de desgaste

Partiendo de los resultados obtenidos para las presiones normales, las tensiones tangenciales y los deslizamientos, se ha valorado la implementación de diferentes algoritmos de estimación de desgaste obtenidos de bibliografía [12].

Tras un análisis comparativo preliminar, se ha optado por la aplicación del modelo empírico desarrollado por la Universidad de Sheffield (USFD). En la tabla 1 se ha incluido la formulación básica de este algoritmo, que parte de las distribuciones de tensiones tangenciales (T/A) y deslizamientos (γ), para obtener un valor estimado de tasa de desgaste en cada punto de la huella de contacto.

Dividiendo la huella de contacto en tiras longitudinales, e integrando a lo largo de cada una de ellas los valores de tasa de desgaste, se pueden calcular valores teóricos de profundidad de desgaste en función de la cota transversal a la huella de contacto (se muestra un ejemplo en la figura 15).

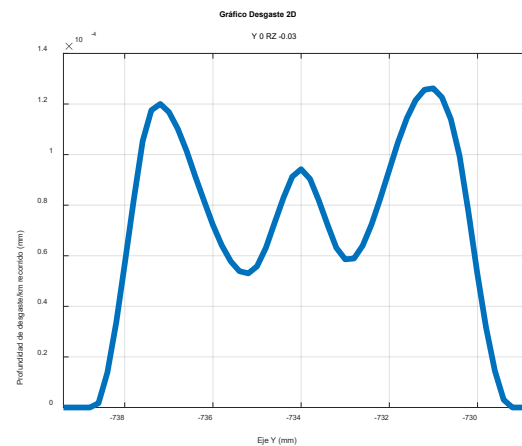


Figura 15. Profundidades de desgaste teóricas. Fuente: elaboración propia.

Finalmente, el cálculo del área bajo esta curva (que se ha denominado “área de desgaste”), multiplicada por el perímetro de rueda, permitirá obtener la estimación de volumen de material desgastado por kilómetro rodado. Este resultado, la estimación de la cantidad de material desgastado, será de utilidad para su empleo como variable objetivo a minimizar en posteriores procedimientos de optimización o análisis de sensibilidad.

Tabla 1. Obtención de tasas de desgaste según el algoritmo desarrollado por la USFD.

Régimen	$T\gamma/A$ (N/mm ²)	Tasa de desgaste (W_R) (μg/m rodado/mm ²)
Suave (K_1)	$T\gamma/A \leq 10,4$	$5,3 T\gamma/A$
Severo (K_2)	$10,4 \leq T\gamma/A \leq 77,2$	55,0
Catastrófico (K_3)	$77,2 < T\gamma/A$	$55,0 + 61,9 (T\gamma/A - 77,2)$

Fuente: Rovira et al. [12].

2.5. Desarrollo de la matriz de simulaciones. Análisis de sensibilidad.

Se ha diseñado una extensa matriz de combinaciones significativas de valores de los diferentes parámetros a introducir en el modelo. Estos parámetros incluyen ángulo de convergencia/divergencia, ángulo de caída, posición transversal respecto al rail, así como diferentes condiciones de carga normal y transversal. Los rangos de variación para cada parámetro se mantienen dentro de unos límites moderados, de manera que no se considera que puedan tener un efecto significativo sobre el comportamiento dinámico del tren.

Los resultados obtenidos del cálculo se extraen y procesan siguiendo el procedimiento estándar descrito, facilitando un análisis estadístico que permite obtener conclusiones útiles sobre la sensibilidad de los resultados a la variación de cada parámetro.

3. Resultados

El proyecto se encuentra en curso, y se está avanzando en el proceso cálculo de la matriz de simulaciones mencionada antes. Los primeros resultados muestran una gran sensibilidad a pequeñas variaciones de determinados parámetros. A priori se muestra especialmente significativa la influencia del ángulo de convergencia, y de otros parámetros que determinan el punto de contacto, como el ángulo de caída o la posición transversal de las ruedas respecto al centro de la vía.

En la figura 16 se muestra a título de ejemplo un gráfico tridimensional que permite apreciar la sensibilidad del desgaste global estimado por km rodado a la variación de estos parámetros.

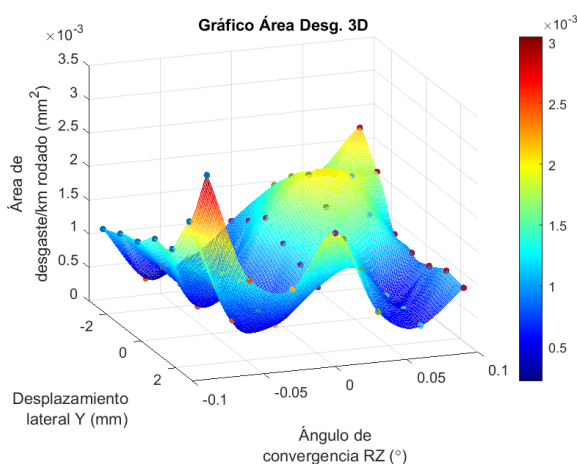


Figura 16. Desgaste de rueda por km rodado en función ángulo y posicionamiento sobre el rail. Fuente: elaboración propia.

No obstante, los resultados deberán valorarse de forma conjunta una vez completado el cálculo de la matriz de casos completa.

Por otra parte, como se dijo en el punto anterior, la metodología de modelización paramétrica desarrollada ha sido validada mediante su aplicación a casos estándar de rodadura de ejes rígidos, y su comparación con los ofrecidos por las formulaciones clásicas. Los resultados muestran para estos casos una buena concordancia entre los modelos de elementos finitos y los ofrecidos por el programa CONTACT, para la solución de contacto normal y tangencial. Los valores máximos de fuerzas de deslizamiento en dirección longitudinal y lateral en la solución de elementos finitos son inicialmente algo menores que los resultados de CONTACT, diferencia que se han corregido fácilmente con pequeñas ajustes finales de las rigideces de contacto.

Finalmente, el estudio de las distribuciones de esfuerzos y deslizamientos en el contacto está permitiendo entender mejor la manera en que la variación de los distintos parámetros afecta al comportamiento del contacto. Este análisis cualitativo del fenómeno será también de utilidad a la hora de plantear estrategias de optimización en la fase final del trabajo.

4. Conclusiones

El trabajo mostrado aquí está siendo objeto de una Tesis Doctoral, gracias a la colaboración de la Universidad Miguel Hernández de Elche y la empresa Patentes Talgo S.L.

La metodología de cálculo desarrollada y validada en la primera fase de la Tesis, se muestra eficaz para el análisis del contacto rueda-carril, en sistemas de rodadura ferroviaria con ruedas libres como el incorporado por los trenes Talgo, y en general para sistemas que no se correspondan con la rodadura tradicional de ruedas montadas sobre eje rígido.

Los modelos paramétricos desarrollados permiten la variación de gran cantidad de parámetros de forma versátil, y el procesado estandarizado de los resultados, permite acometer análisis de sensibilidad a múltiples variables.

A la vista de los primeros resultados obtenidos, se está encontrando una alta sensibilidad del desgaste a la variación de determinados parámetros como los ángulos de convergencia y de caída de las ruedas, incluso para rangos de variación pequeños. Se considera por tanto que las posibilidades de optimización del sistema son muy importantes, y la metodología desarrollada aquí podrá resultar de gran

utilidad para identificar los valores óptimos de estos parámetros que conduzcan a una reducción global del desgaste sin afectar negativamente al comportamiento dinámico del tren.

Una vez que se complete la fase de simulación y análisis, se publicarán las correspondientes conclusiones, y se acometerá la fase final del trabajo, que incluirá la propuesta de posibles actuaciones de optimización sobre el sistema de rodadura.

Referencias

- [1] Goicoechea Omar, A.: Sistema de articulación ligera combinada para organización de trenes en rutas guiadas. Patente nº ES151396A1. Oficina Española de Patentes y Marcas. (1941).
- [2] Goicoechea Omar, A.: Mejoras en los sistemas ferroviarios de articulación ligera combinada. Patente nº ES159301A1. Oficina Española de Patentes y Marcas. (1942).
- [3] Patentes Talgo S.A., Torán Tomás, A.: Procedimiento para variar la distancia entre ruedas en vehículos ferroviarios en marcha. Patente nº ES332452A1. Oficina Española de Patentes y Marcas. (1966).
- [4] Talgo S.A.: Vehículos ferroviarios articulados formados de elementos ligeros, cortos, bajos, sobre ruedas independientes, con rodadura guiada por tracción triangular. Patente nº ES163239A1. Oficina Española de Patentes y Marcas. (1943).
- [5] Patentes Talgo S.A.: Sistema guiado de pares de ruedas. Patente nº ES200131A1. Oficina Española de Patentes y Marcas. (1951).
- [6] Patentes Talgo S.A.: Rodadura guiada para vehículos ferroviarios. Patente nº ES206362A1. Oficina Española de Patentes y Marcas. (1952).
- [7] Patentes Talgo S.A., Torán Tomás, A.: Sistema de suspensión pendular. Patente nº ES424615A1. Oficina Española de Patentes y Marcas. (1975).
- [8] J. Carballeira, L. Baeza, A. Rovira, E. García. Technical characteristics and dynamic modelling of Talgo trains. *Vehicle System Dynamics* 46-Supplement (2008) 301-316
- [9] Patentes Talgo S.A., López Gómez, J.L. et al.: Sistema para optimizar el guiado de ejes ferroviarios. Patente nº ES2195756A1. Oficina Española de Patentes y Marcas. (2001).
- [10] Patentes Talgo S.A., López Gómez, J.L.: Método para optimizar el guiado de vehículos ferroviarios. Patente nº ES2316220A1. Oficina Española de Patentes y Marcas. (2006).
- [11] J.J. Kalker. Wheel-rail rolling contact theory. *Wear* 144 (1991) 243-261.
- [12] A. Rovira, A. Roda, M.B. Marshall, H. Brunskill, R. Lewis. Experimental and numerical modelling of wheel-rail contact and wear. *Wear* 271 (2011) 911-924.