



TRABAJO FIN DE MÁSTER

Bogie T250: Análisis y optimización del perfil de rodadura.

Adrián Herrero Mardomingo

Julio 2017

Ficha técnica.



**SOLICITUD DE ADMISIÓN DEL
TRABAJO FIN DE MASTER (6 ECTS)
(Entregar al Profesor Tutor de Prácticas en Comillas)**

Datos del alumno:

Apellidos: HERRERO MARDOMINGO	
Nombre: ADRIÁN	53616505D

Datos del director del Trabajo:

Apellidos: LÓPEZ GÓMEZ	
Nombre: JOSE LUIS	NIF: 13008716P
Empresa: PATENTES TALGO	Dirección de la empresa: Paseo del Tren Talgo, 2 (Las Matas - Madrid)
e-mail: jllopez@talgo.com	Teléfono: 649191466

Datos del co-director del Trabajo (si procede):

Apellidos:	
Nombre:	NIF:
Empresa:	Dirección de la empresa:
e-mail:	Teléfono:

Título del Trabajo Fin de Máster:

Bogie T250: Análisis y optimización del perfil de rodadura

Descripción breve:

Las composiciones de la Serie 130 de Renfe se someten diariamente a itinerarios de viaje recorriendo de un extremo a otro la península ibérica. Así, el conjunto de estos trazados están caracterizados por variaciones notables en cuanto a velocidad de servicio, calidad de vía, pendientes y rampas, sin olvidar la variación de ancho de vía y la obligación de disponer de tracción mediante la unión pantógrafo – catenaria o motor diesel.

Todo esto obliga al T250 a dotarse de tecnología enfocada a la flexibilización y optimización en cada uno de sus elementos. Dentro de la complejidad del bogie de cambio de ancho, este trabajo se centra en el estudio del contacto rueda-carril con objeto de dotar a la rodadura de un perfil de rueda que minimice las fuerzas de contacto así como el desgaste en la circulación sobre ambos anchos.

Objetivos:

Los objetivos de este trabajo son:

1. Análisis de la evolución del perfil de rodadura del bogie tractor del T250.
2. Determinación del tipo de contacto rueda-carril: zonas de desgaste.
3. Definición de un perfil de rueda optimizado para los escenarios más representativos mediante el uso de softwares multi-cuerpo.

Los mismos puntos aplicados a la rueda del bogie portante en la modalidad dual.

Aportaciones previstas del Trabajo:

Las aportaciones de este trabajo son:

1. Evolución y análisis detallado del perfil de rodadura del bogie de cambio de ancho montado en la S130.

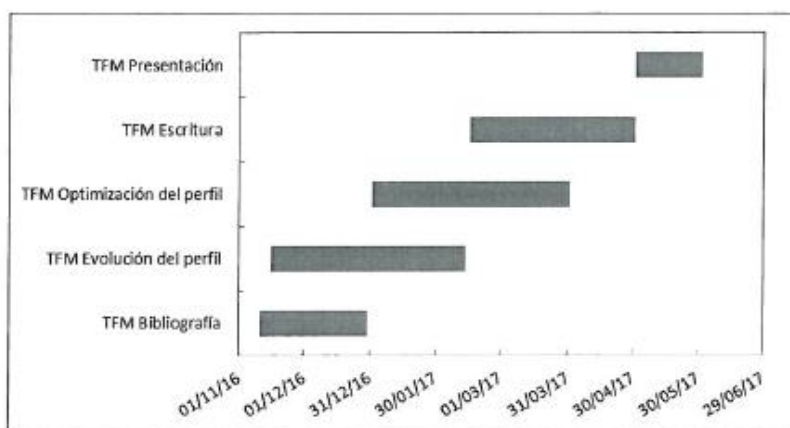
Disponer de esta información supondrá un avance a la hora de conocer el comportamiento de un bogie de tecnología única circulando por escenarios muy exigentes y de gran complejidad.

2. Creación de un perfil de rueda optimizado.

Tener acceso a las primeras versiones de un perfil de rodadura optimizado supone un punto de partida para un futuro desarrollo más profundo y concienzudo en esta materia.

Planificación de tareas:

Tarea	Fecha inicio	Fecha finalización	Duración (días)
TFM Bibliografía	11 Noviembre 2016	30 Diciembre 2016	49
TFM Evolución del perfil	16 Noviembre 2016	13 Febrero 2017	89
TFM Optimización del perfil	1 Enero 2017	1 Abril 2017	90
TFM Escritura	15 Febrero 2017	1 Mayo 2017	75
TFM Presentación	1 Mayo 2017	1 Junio 2017	31



Alumno: **AORIAN HERRERO**

Firma:

Director: **JOSÉ LUIS LÓPEZ GÓMEZ**

Firma:

Índice.

Ficha técnica.....	2
Índice.....	6
Prefacio.....	8
Lista de Figuras.....	9
Lista de Tablas.....	9
Lista de Expresiones.....	9
1. Descripción breve: introducción y resumen.....	10
2. Objetivos del Trabajo.....	12
2.1. Evolución del perfil de rodadura.....	12
2.2. Determinación del tipo de contacto rueda-carril.....	12
2.3. Definición de un perfil de rueda optimizado.....	12
3. Tareas.....	13
3.1. Estado del arte.....	13
3.2. Evolución del perfil de rodadura.....	13
3.3. Optimización del perfil de rodadura.....	13
4. Planificación.....	14
5. Desarrollo.....	15
5.1. Estado del arte.....	15
5.2. Evolución del perfil de rodadura.....	16
5.2.1. Metodología para la obtención de la evolución.....	16
5.2.2. Perfilómetro láser IKP-5.....	17
5.2.2.1. Características.....	17
5.2.2.2. Softwares asociados.....	18
5.2.2.2.1. Ikp-5_DB.....	18
5.2.2.2.2. RF505.....	18
5.2.3. Perfil de rueda GV40.....	19
5.2.3.1. Perfil de rueda GV40 para la S730.....	19
5.2.4. Resultado de la evolución del perfil de rodadura.....	20
5.2.5. Análisis de la evolución: Conclusiones.....	21
5.2.5.1. Perfil de rodadura <i>Medición #1</i>	21
5.2.5.2. Perfil de rodadura <i>Medición #2</i>	21
5.3. Optimización del perfil de rodadura.....	22

5.3.1.	Proceso de obtención del perfil de rueda optimizado.....	22
5.3.1.1.	Fase #1: Creación del modelo dinámico en ADAMS VI-Rail.	22
5.3.1.1.1.	Descripción del tipo de contacto rueda – carril.	23
5.3.1.2.	Fase #2: Obtención de la evolución en ADAMS-Rail.	24
5.3.1.2.1.	Definición de los escenarios para la S730.	24
5.3.1.2.2.	Reproducción de la evolución del perfil de rodadura.....	26
5.3.1.2.2.1.	Módulo de desgaste VI-Rail Wear.....	26
5.3.1.2.2.2.	Resultado de la reproducción de la evolución observada.	27
5.3.1.3.	Fase #3: Definición de un perfil optimizado.....	28
5.3.1.3.1.	Fase #1: Método de creación.....	28
5.3.1.3.2.	Fase #2: Perfil optimizado.....	28
5.3.1.3.3.	Fase #3: Resultado de la evolución del perfil optimizado.....	30
5.3.2.	Comparativa entre el perfil GV40 y perfil optimizado.	31
6.	Conclusiones.....	36
7.	Aportaciones y futuros trabajos.....	37
7.1.	Aportaciones.	37
7.2.	Trabajos futuros:	37
8.	Bibliografía.	38

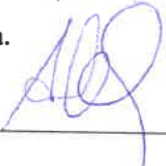

Prefacio.

Las actividades presentadas en este Trabajo Fin de Máster han sido llevadas a cabo para la obtención del título asociado al Máster Universitario en Sistemas Ferroviarios impartido por la Universidad Pontificia Comillas (ICAI).

Me gustaría expresar mi más sincera gratitud al ingeniero José Luis López Gómez, mi tutor en este proyecto. Sin su ayuda y buenos consejos durante todos estos meses, no habría sido posible finalizar este documento.

Aprovecho para agradecer especialmente a José María Ecenarro López, Director del Área de Mantenimiento de la empresa PATENTES TALGO, por permitirme la oportunidad de llevar a cabo este proyecto.

Este trabajo está dedicado a Jara.

Alumno: <i>ADRIÁN HERRERO MARDOMINGO</i>	Tutor:
Firma: 	Firma: 
<i>3/7/17</i>	

Lista de Figuras.

<i>Figura 1: Planificación inicial de las tareas.</i>	14
<i>Figura 2: Planificación final de las tareas.</i>	14
<i>Figura 3: Perfilómetro RIFTEK utilizado para obtener la evolución del perfil de rodadura.</i>	17
<i>Figura 4: Ejemplo de superposición de perfiles de rodadura en el software Ikp5_db.</i>	18
<i>Figura 5: Perfilómetro sobre patrón de calibración.</i>	18
<i>Figura 6: Definición geométrica del perfil de rodadura GV40.</i>	19
<i>Figura 7: Definición del perfil GV40 $sD=32,5$ y $sH=28,5$mm para la S730.</i>	19
<i>Figura 8: Resultado de la evolución del perfil.</i>	20
<i>Figura 9: Modelo de simulación creado para la obtención del perfil optimizado.</i>	22
<i>Figura 10: Detalle del menú para la configuración del cálculo del desgaste.</i>	26
<i>Figura 11: Resultado de la reproducción del perfil GV40 en ADAMS VI-Rail.</i>	27
<i>Figura 12: Perfil de rodadura en el programa ME-10.</i>	28
<i>Figura 13: Diagrama de flujo para la obtención del perfil optimizado.</i>	28
<i>Figura 14: Comparativa entre el perfil de rueda GV40 y el perfil optimizado.</i>	29
<i>Figura 15: Resultado de la reproducción del perfil optimizado en ADAMS VI-Rail.</i>	30
<i>Figura 16: Resultado de la conicidad equivalente para ambos perfiles en ancho UIC.</i>	33
<i>Figura 17: Resultado de la conicidad equivalente para ambos perfiles en ancho RENFE.</i>	33
<i>Figura 18: Resultado de Y/Q y W_N para el escenario de UIC para ambos perfiles estudiados.</i>	35
<i>Figura 19: Resultado de Y/Q y W_N para el escenario de RENFE para ambos perfiles estudiados.</i>	35

Lista de Tablas.

<i>Tabla 1: Características principales del perfilómetro IKP-5.</i>	17
<i>Tabla 2: Resumen de características de la línea Madrid – Santiago de Compostela.</i>	24
<i>Tabla 3: Resumen de escenarios para las simulaciones dinámicas.</i>	24
<i>Tabla 4: Características de los escenarios creados para las simulaciones dinámicas.</i>	25
<i>Tabla 5: Relación de nº de simulaciones y distancia recorrida para cada tipo de escenario.</i>	27
<i>Tabla 6: Categorías para el Nº de desgaste.</i>	32
<i>Tabla 7: Valores límite considerados para los parámetros analizados durante la comparativa.</i>	33
<i>Tabla 8: Resultados para el perfil GV40 en el escenario de LAV UIC.</i>	34
<i>Tabla 9: Resultados para el perfil GV40 en el escenario de LC RENFE.</i>	34
<i>Tabla 10: Resultados para el perfil optimizado en el escenario de LAV UIC.</i>	34
<i>Tabla 11: Resultados para el perfil optimizado en el escenario de LC RENFE.</i>	34

Lista de Expresiones.

<i>Expresión 1: Definición de conicidad equivalente.</i>	31
<i>Expresión 2: Definición del coeficiente de descarrilo.</i>	31
<i>Expresión 3: Definición del sumatorio de fuerzas.</i>	32
<i>Expresión 4: Definición del Nº de desgaste.</i>	32

1. Descripción breve: introducción y resumen.

En la dinámica ferroviaria, la interacción entre la rueda y el carril determina el comportamiento del material rodante así como su relación con la infraestructura. Además, las características del contacto entre ambos elementos influyen en parámetros de interés de la siguiente manera:

- Etapa de diseño.

Para conseguir la certificación de un nuevo modelo de material rodante, es necesario satisfacer los requerimientos de seguridad que competen al contacto rueda-carril. Al mismo tiempo, las especificaciones que regulan la fatiga de vía son cada vez más restrictivas, por lo que un buen diseño de la rodadura reduce la probabilidad de provocar altos desgastes a la infraestructura.

- Etapa de operación → Mantenimiento.

Para la empresa encargada del mantenimiento del material rodante, el contacto rueda-carril es de gran importancia ya que es responsable de aspectos como el desgaste de rueda, el confort del pasajero o el grado de fatiga a la que se someten los elementos tanto *no suspendidos* como *suspendidos* de la rodadura.

- Etapa de operación → Administrador de la infraestructura

En lo que afecta al administrador de la infraestructura, la calidad del contacto rueda-carril influye en los niveles de excitaciones dinámicas aplicadas a la vía. Un ejemplo a este respecto es la aparición precoz de defectos ondulatorios en el carril.

Dentro de los parámetros que afectan al contacto rueda-carril, el perfil de rodadura es un factor que ha estado en la mente de los ingenieros desde los primeros pasos del ferrocarril. Determinar los valores óptimos de conicidad para conseguir un buen comportamiento en curva sin dañar la estabilidad a alta velocidad, establecer los valores que definen la pestaña para maximizar la vida de la rueda, etc... son en definitiva partes de un proceso de optimización del perfil de rodadura.

Este trabajo presenta el análisis de la evolución del perfil de rodadura de los bogies motores y portantes de los trenes de la S730 de RENFE (TALGO 250 Híbrido) así como su optimización.

Las razones que han motivado este proyecto son:

- a) Necesidad de conocer en detalle el contacto rueda-carril.

Los bogies de los trenes que forman la S730 se caracterizan por disponer de la tecnología de cambio automático de ancho de vía, necesaria para realizar los servicios Madrid-Galicia. Por tanto, se trata de un tipo de rodadura muy compleja sometida a escenarios exigentes cuyo comportamiento es necesario conocer.

- b) Optimizar su comportamiento.

Teniendo en cuenta los requerimientos exigidos a estos trenes, cabe la posibilidad de adaptar en mayor grado la rodadura a los escenarios utilizados. De esta forma, aspectos como la duración de la vida de la rueda o la fatiga a la que se somete a los elementos que forman el bogie se pueden optimizar.

Para lograr tales metas, se ha medido la evolución del perfil de rodadura de los bogies de la S730 con un perfilómetro láser, aprovechando las operaciones de mantenimiento llevadas a cabo en la base de mantenimiento de RENFE en Fuencarral (Madrid). Con esta información, se ha realizado su análisis y elaborado un intento de mejorar el comportamiento del perfil de rodadura.

2. Objetivos del Trabajo.

A continuación se enumeran y describen los objetivos de este trabajo.

2.1. Evolución del perfil de rodadura.

A través de la medición periódica del perfil de rodadura de una rueda, en el tiempo que va desde que ésta sale del torno hasta que por degradación del perfil debido al desgaste necesita ser torneada de nuevo, se elabora un abanico de perfiles que evidencian la evolución del perfil. Esta información es de gran ayuda a la hora de conocer el comportamiento del contacto rueda-carril.

2.2. Determinación del tipo de contacto rueda-carril.

Mediante el análisis de la evolución del perfil es posible determinar las zonas de desgaste en función de los kilómetros recorridos. Además, posibilita la detección de defectos tales como desgastes irregulares (separación excesiva entre puntos de contacto), aparición de acanaladuras o acunamiento.

2.3. Definición de un perfil de rueda optimizado.

Se trata del objetivo más ambicioso de este trabajo que consiste en la creación de un perfil de rodadura que logre reducir o incluso eliminar los posibles errores detectados durante el análisis de la evolución del perfil. Para ello, se utilizará el software de simulación multicuerpo ADAMS VI-Rail para simular en escenarios representativos la evolución del perfil original así como del óptimo.

3. Tareas.

Los siguientes apartados describen las principales tareas en las que se divide este trabajo.

3.1. Estado del arte.

De cara a satisfacer los objetivos perseguidos con este proyecto, ha sido necesario dedicar las primeras semanas de trabajo a la búsqueda de documentación enfocada a los siguientes temas:

1. Definición y cálculo de la velocidad crítica [1].
2. Influencia de la conicidad en la velocidad crítica y estabilidad [2], [3], [4], [5].
3. Ejemplos de optimización de perfiles de rodadura con respecto al desgaste o la estabilidad. Métodos de optimización [6] y [7].
4. Documentación normativa para el cálculo de la conicidad equivalente [8].
5. Documentación normativa para la obtención de perfiles de rodadura [9].
6. Contacto rueda-carril: Teorías [11].
7. Creación del perfil PRICAR (Perfil de Rueda Independiente para Carril y Ancho Rusos) por parte de TALGO [12].
8. MBS ADAMS – VI Rail: Módulo de desgaste [13].

3.2. Evolución del perfil de rodadura.

Esta fase del trabajo ha consistido en la obtención de la evolución del perfil de rodadura, mediante la medición periódica de ruedas de los trenes de la S730 mantenidas en la base de mantenimiento de Fuencarral. La herramienta utilizada para la medición así como para el almacenamiento de datos medidos ha sido un perfilómetro láser RIFTEK.

3.3. Optimización del perfil de rodadura.

Tras la obtención y análisis de la evolución del perfil de rodadura, el siguiente paso ha sido la creación de un perfil de rueda basado en el utilizado actualmente, cuya evolución permita minimizar o solventar los errores encontrados.

4. Planificación.

La siguiente imagen (ver Figura 1) muestra la distribución de tiempos inicial para cada una de las etapas. Se elaboró al comienzo del trabajo, durante la etapa de definición de tareas.

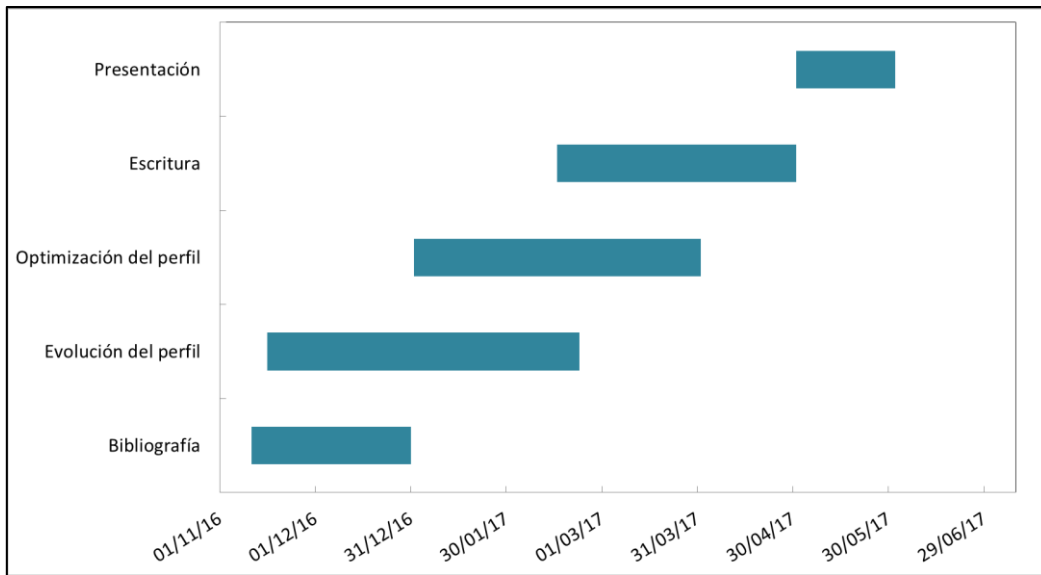


Figura 1: Planificación inicial de las tareas.

Sin embargo, tras el desarrollo de las distintas fases, la distribución de tiempos final se puede ver en la siguiente imagen (ver Figura 2).

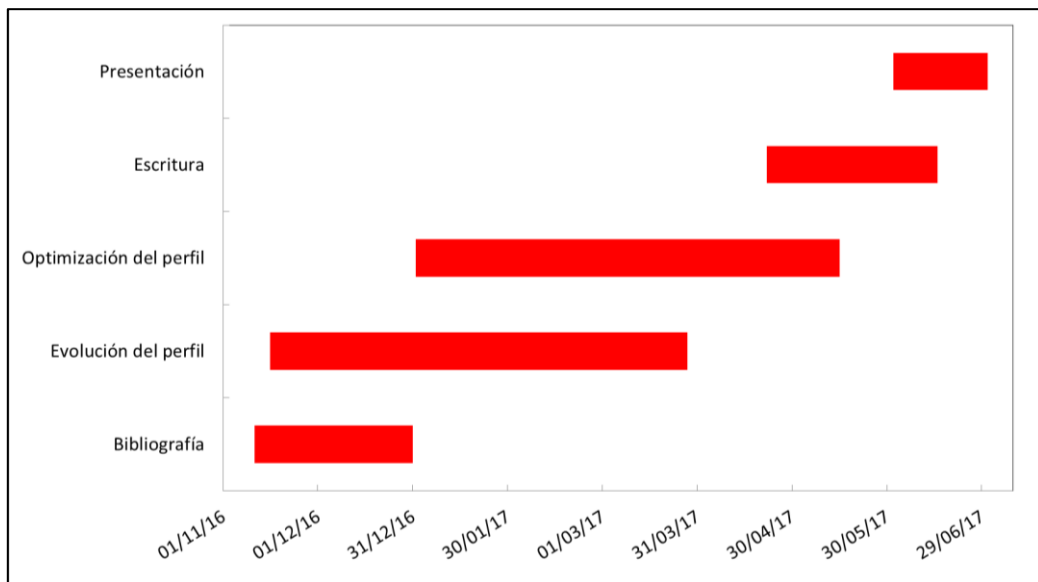


Figura 2: Planificación final de las tareas.

5. Desarrollo.

A continuación se detallan las tareas realizadas para satisfacer los objetivos de este trabajo.

5.1. Estado del arte.

A lo largo de las últimas décadas, el uso de potentes programas de simulación y cálculo han permitido a los ingenieros ferroviarios profundizar en el análisis del contacto entre rueda y carril durante el movimiento de un tren. Esto ha permitido el desarrollo de numerosas teorías sobre el contacto [11] así como la demostración de la influencia de parámetros como la conicidad equivalente [2] o un perfil de rueda desgastado sobre la estabilidad [3], el confort o la seguridad en el paso por una curva.

Desde el punto de vista del operador actual, la rodadura debe satisfacer una circulación caracterizada por altos niveles de confort (ausencia de molestas vibraciones y ruidos) que permita al viajero disfrutar por ejemplo de la lectura durante un viaje de alta velocidad [7] cumpliendo sobradamente los límites de seguridad impuestos. En definitiva, debe ser la solución óptima entre calidad de marcha y velocidad frente a la seguridad.

Mediante la creación de modelos dinámicos y el uso de softwares de optimización basados por ejemplo en algoritmos genéticos, se ha conseguido dar solución a problemas complejos como las inestabilidades propias del conjunto par de ruedas – eje sólido [1] [5] o la mejora de la calidad de la explotación mediante la obtención de perfiles de rueda o de carril optimizados [4] [6].

5.2. Evolución del perfil de rodadura.

La obtención de la evolución del perfil de rodadura resulta de gran interés a la hora de conocer el comportamiento del material rodante sobre la vía. En esta evolución intervienen aspectos como las propiedades del material rodante, las características de los escenarios utilizados así como el tipo de explotación, aportando información relevante sobre el tipo de desgaste de la rodadura.

5.2.1. Metodología para la obtención de la evolución.

La metodología seguida para conseguir la evolución el perfil de rodadura ha consistido en la medición periódica de los trenes de la S730 mantenidas en la base de mantenimiento de Fuencarral de RENFE durante los meses de Diciembre 2016 y Marzo 2017. Así y para cada medición, el proceso ha consistido en:

- 1) De acuerdo a la programación de la base de mantenimiento, se define el tren y la hora a la que acudir para realizar la medición.
- 2) Puesta a punto de la herramienta de medida (Capacidad de medida y definición de base de datos).
- 3) Presentarse en la base de mantenimiento y con el permiso de la jefatura de taller, realizar las mediciones satisfaciendo en todo momento las medidas de seguridad.

A lo largo del periodo destinado a la medición del perfil de rodadura, se han adquirido medidas de los doce trenes que forman actualmente la flota de la S730. Las mediciones consistían en capturar el perfil de rodadura de las ruedas de los bogies tanto motrices como portantes independientemente de los kilómetros realizados. Con esta información, se ha conseguido definir el patrón la evolución de las ruedas mencionadas.

5.2.2. Perfilómetro láser IKP-5.

La herramienta utilizada para medir la evolución del perfil de rodadura ha sido un perfilómetro láser de la serie IKP-5 del fabricante RIFTEK (ver Figura 3). Se trata del perfilómetro más utilizado en las labores de mantenimiento de la rodadura por parte de TALGO.

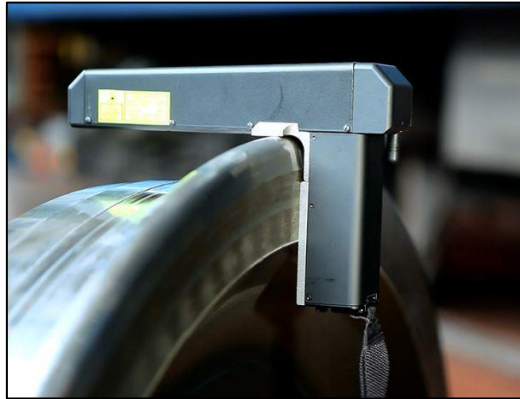


Figura 3: Perfilómetro RIFTEK utilizado para obtener la evolución del perfil de rodadura.

5.2.2.1. Características.

La siguiente tabla (ver Tabla 1) muestra las principales características del perfilómetro utilizado.

Tipo	IKP-5 de la serie 2016
Parámetros medidos	Grueso de pestaña (sD) Altura de pestaña (sH) Ángulo de pestaña (qR) Perfil de banda de rodadura
Incertidumbre en la medida	sD = ± 0.1 mm sH = ± 0.1 mm qR = ± 0.2 mm
Resolución en la medida	Todos los parámetros, 0.01mm

Tabla 1: Características principales del perfilómetro IKP-5.

Por último, el perfilómetro se utiliza junto a una PDA cuya comunicación se basa en la tecnología *bluetooth*. Las funciones más relevantes de la PDA son:

- Determinar las características de la medición (referencias geométricas, almacenamiento, etc...).
- Lanzar la orden de medición al perfilómetro.

5.2.2.2. Softwares asociados.

El perfilómetro lleva asociado dos programas de ordenador descritos a continuación.

5.2.2.2.1. Ikp-5_DB.

Es el software utilizado para el análisis y el tratamiento de los datos medidos. Permite la combinación de varias bases de datos con objeto de superponer numerosas medidas y determinar la evolución del perfil de una rueda (ver Figura 4).

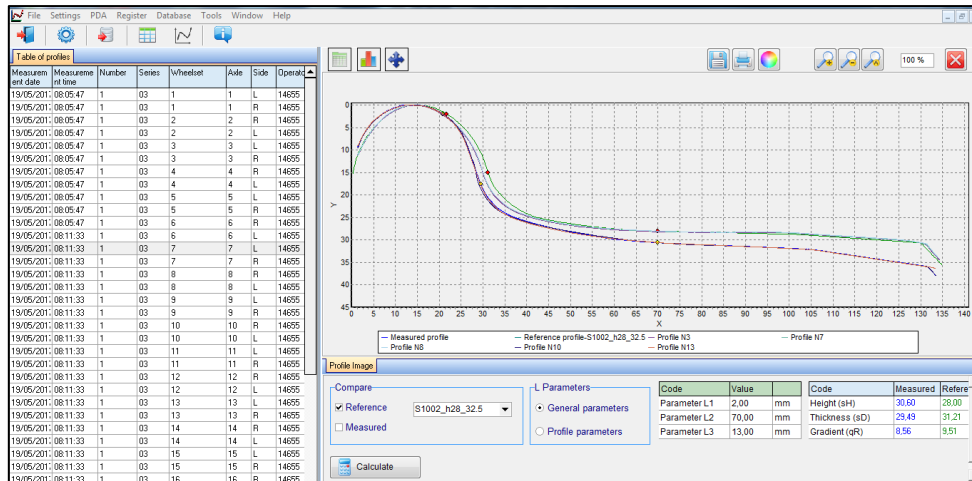


Figura 4: Ejemplo de superposición de perfiles de rodadura en el software Ikp5_db.

5.2.2.2.2. RF505.

Se trata del programa utilizado para realizar el ajuste del perfilómetro. Someramente, el proceso de ajuste consiste en la medición iterativa de un patrón de calibración (ver Figura 5), que junto a la modificación de los parámetros internos de medición del perfilómetro, permiten alcanzar el error de medida deseado.

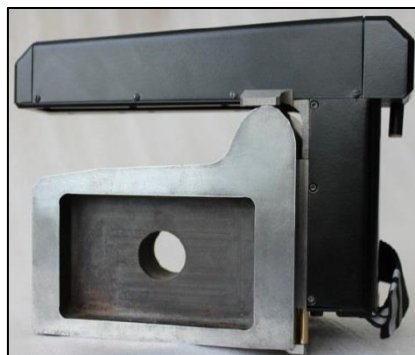


Figura 5: Perfilómetro sobre patrón de calibración.

5.2.3. Perfil de rueda GV40.

El perfil de rodadura implementado en los bogies motores y portantes de los trenes de la S730 es el perfil GV40 (*Grand Vitesse 1/40ème*) (ver Figura 6). Se trata de un perfil de rueda destinado a material rodante de altas velocidades de circulación.

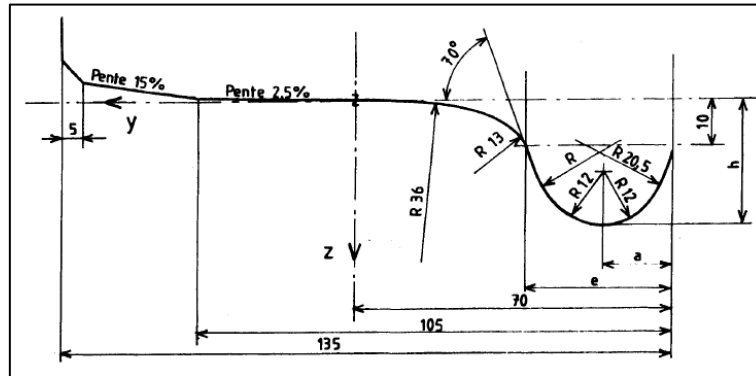


Figura 6: Definición geométrica del perfil de rodadura GV40.

Este perfil viene definido según el documento [9]. En esta norma se encuentra las ecuaciones que definen el perfil geométrico de la banda de rodadura, las relaciones entre la altura de la pestaña de rueda y el diámetro así como la geometría de la pestaña en función del grueso de pestaña.

5.2.3.1. Perfil de rueda GV40 para la S730.

El caso particular del perfil GV40 aplicado a la S730, se caracteriza por espesores de pestaña desde 32,5 a 28.5mm y una altura de pestaña de 28.5mm (ver Figura 6).

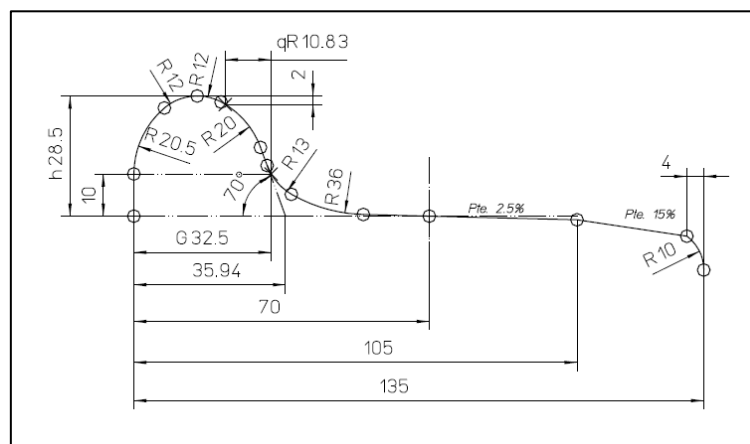


Figura 7: Definición del perfil GV40 $sD=32,5$ y $sH=28,5$ mm para la S730.

5.2.4. Resultado de la evolución del perfil de rodadura.

La siguiente imagen (ver Figura 8) muestra la evolución del perfil de rodadura de rueda de bogie motriz obtenido durante los meses de Diciembre 2016 y Marzo 2017.

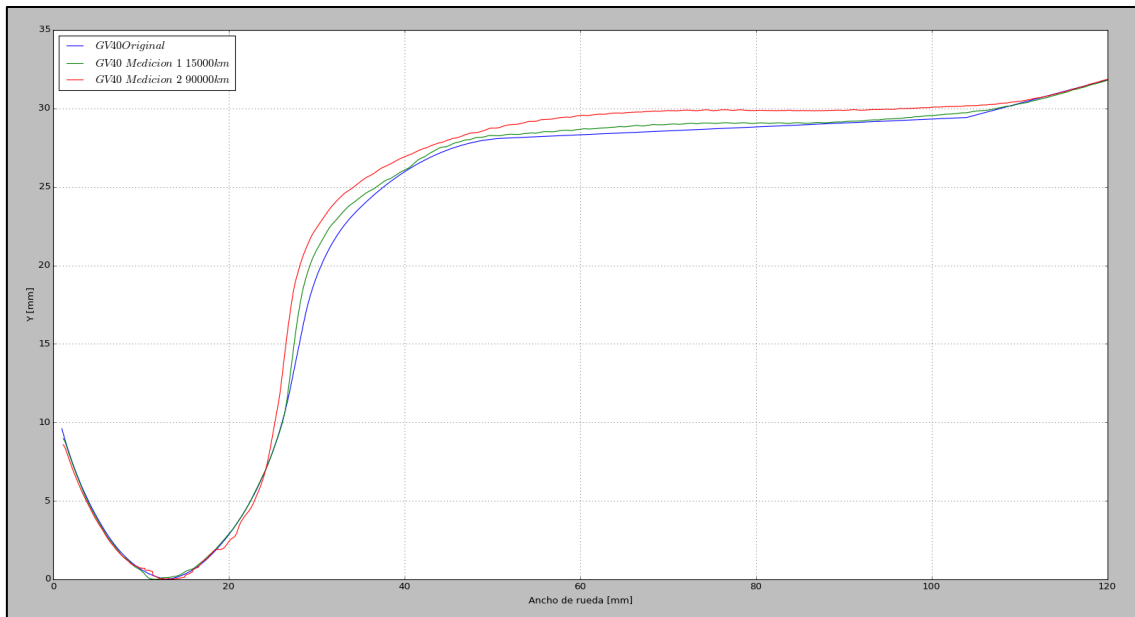


Figura 8: Resultado de la evolución del perfil.

La evolución mostrada se compone de tres perfiles caracterizados por:

- Perfil a la salida del torno: Perfil GV40 con $sD=30.5\text{mm}$ y $sH=28.5\text{mm}$.
- Perfil *Medición #1*: Evolución del perfil tras 6000 - 20000km de recorrido.
- Perfil *Medición #2*: Evolución del perfil tras 70000 -130000km de recorrido.

Así, se obtiene la evolución del perfil de rodadura en función de los kilómetros recorridos. Cabe destacar que, la evolución mostrada no corresponde a la de una única rueda. Esto no es posible ya que el tiempo disponible para la medición, no permite captar dicha variación teniendo en cuenta el periodo medio entre torneados de rueda. Éste suele rondar los 9 meses correspondiendo a 150000km aproximadamente.

Por tanto, el caso mostrado se ha obtenido mediante la combinación de perfiles de rueda de bogie correspondientes a distintos kilometrajes. No obstante, el comportamiento mostrado en la Figura 8 es el visto con más frecuencia.

5.2.5. Análisis de la evolución: Conclusiones.

Seguidamente se analizan cada uno de los perfiles obtenidos durante la evolución.

5.2.5.1. Perfil de rodadura Medición #1.

Del perfil obtenido tras 15000km aproximadamente se concluye:

- Se observa un desgaste irregular centrado en tres zonas: Parte inferior de la pestaña, acanaladura en la transición entre pestaña y banda de rodadura y centro de banda de rodadura.
- *Desgaste en pestaña:* Provocado por valores altos de aceleración no compensada o por circulación en escenarios con radios de curvatura pequeños.
- *Desgaste en acanaladura:* El contacto rueda-carril consigue que ésta última se quede encajada. Es probable que existe una relación “radio de curvatura-velocidad de circulación” que consiga el contacto centrado en esa zona. No se descarta que en algún tramo, la cabeza del carril muestre alguna pequeña deformación que consiga este tipo de contacto.
- *Desgaste en la banda de rodadura:* Provocado por el contacto en recta o en curvas de radio grande como las de alta velocidad.
- Existe un punto de *no contacto* entre las zonas del perfil de rodadura de la pestaña y la acanaladura. Este tipo de desgaste puede provocar el *salto* entre ambas zonas de contacto induciendo vibraciones y fatiga a los elementos de la rodadura.

5.2.5.2. Perfil de rodadura Medición #2

Del perfil obtenido tras 100000km aproximadamente se concluye:

- Se elimina cualquier tipo de discontinuidad en el perfil.
- El desgaste se distribuye de manera regular por todo el perfil.
- Existe un ligero acunamiento (zona de conicidad negativa) en la banda de rodadura.

Por último, cabe destacar que la evolución del perfil de rodadura de rueda de bogies portantes es muy similar al obtenido para ruedas de bogies motrices. Así, a partir de este momento se trabajará en optimizar únicamente esta evolución de perfil.

5.3. Optimización del perfil de rodadura.

A continuación se describe el proceso de creación de un perfil de rueda optimizado a partir de la evolución observada mediante el uso del perfil GV40. El objetivo fundamental del perfil optimizado es conseguir un desgaste de rueda homogéneo desde las primeras etapas de recorrido, minimizando así los efectos adversos de un contacto focalizado en zonas concretas del perfil de rodadura.

5.3.1. Proceso de obtención del perfil de rueda optimizado.

Las siguientes tres fases resumen el proceso seguido para conseguir un perfil de rueda mejorado:

- 1) Creación de un modelo dinámico en el software de simulación ADAMS – VI Rail.
- 2) Obtención de la evolución del perfil observada mediante el uso del modelo dinámico.
- 3) Definición del perfil optimizado.

5.3.1.1. Fase #1: Creación del modelo dinámico en ADAMS VI-Rail.

Con objeto de reproducir la evolución del perfil observada así como obtener un perfil optimizado, se ha creado un modelo dinámico mediante el módulo para aplicaciones ferroviarias *VI-Rail* perteneciente al software multicuerpo ADAMS v2015.

La siguiente imagen (ver Figura 9) muestra el modelo creado para este trabajo.

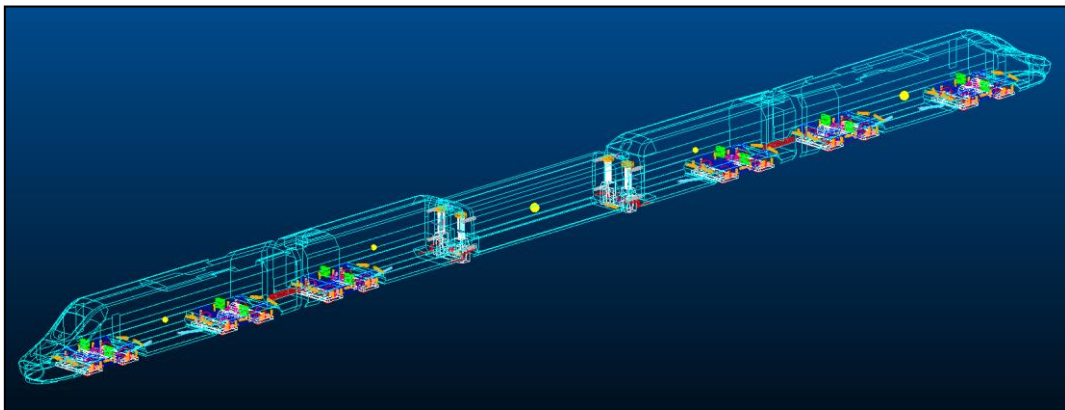


Figura 9: Modelo de simulación creado para la obtención del perfil optimizado.

Así, el modelo está compuesto por:

- Dos cabezas de tracción junto a su pareja de bogies motrices respectivamente.
- Dos coches CET (Coche Extremo Técnico) unidos a un bogie portante cada uno.
- Un coche de viajeros apoyado en un par de rodales TALGO.

Se ha elegido esta configuración ya que permite conocer el comportamiento del bogie motriz así como del portante, reduciendo el tiempo de cálculo por simulación al no disponer de todos los coches de pasajeros utilizados por los trenes de RENFE.

Por último y de cara a la validación del modelo, cada uno de los elementos que lo forman proviene del modelo dinámico utilizado por TALGO durante la certificación de los trenes S130 y S730 de RENFE. Así, se considera que el comportamiento de la motriz y del coche técnico están suficientemente validados por ensayos en vía.

5.3.1.1.1. Descripción del tipo de contacto rueda – carril.

El algoritmo utilizado durante las simulaciones para calcular las fuerzas y momentos tangenciales se llama “FASTSIM” (*A Fast Algorithm for the Simplified Non-linear Theory of Contact*). Está basado en el método creado por Kalker y asume que la zona de contacto rueda-carril tiene forma elíptica. Se ha seleccionado este algoritmo porque está ampliamente aceptado dentro del sector ferroviario y aporta resultados precisos de manera rápida.

5.3.1.2. Fase #2: Obtención de la evolución en ADAMS-Rail.

Una vez se dispone del modelo dinámico, para conseguir reproducir la evolución del perfil observada es necesaria la definición de los escenarios por los que se circula.

5.3.1.2.1. Definición de los escenarios para la S730.

Los trenes de la S730 realizan los trayectos que unen Madrid y Galicia. Pero dentro de las variantes, se ha elegido como ruta a estudiar la que une Madrid con Santiago de Compostela.

La siguiente tabla (ver Tabla 2) muestra las características de cada uno de los tramos que dividen la ruta analizada.

Tramo	Distancia	Ancho de vía	Características principales
Madrid – Olmedo	133km	1435mm	Línea de alta velocidad (LAV)
Olmedo – Zamora	99km	1435mm	Línea de alta velocidad (LAV)
Zamora - Ourense	361km	1668mm	Línea convencional (LC)
Ourense – Santiago	87km	1668mm	Línea de alta velocidad (LAV)

Tabla 2: Resumen de características de la línea Madrid – Santiago de Compostela.

De la información ofrecida por la tabla anterior, se han creado los siguientes escenarios para la realización de las simulaciones dinámicas (ver Tabla 3).

Nº de escenario	Nombre	Ancho de vía
1	LAV UIC	1435
2	LC RENFE	1668
3	LAV RENFE	1668

Tabla 3: Resumen de escenarios para las simulaciones dinámicas.

La siguiente tabla (ver Tabla 4) resumen las principales propiedades de los tres escenarios creados.

Nº de escenario	Ancho de vía	Radio	Velocidad	a_{NC}	Carril	Inclinación de carril
1	1435mm	2000m	196km/h	0.5m/s ²	UIC60	0.05
2	1668mm	500m	110km/h	1m/s ²	UIC60	0.03
3	1668mm	1000m	140km/h	0.8m/s ²	UIC60	0.05

Tabla 4: Características de los escenarios creados para las simulaciones dinámicas.

Cada escenario está formado por las siguientes partes:

- Tramo recto.
- Tramo curvo a derechas.
- Tramo recto.

De esta manera, se dispone de tres escenarios que representan de manera aceptable las principales características del trayecto Madrid – Santiago de Compostela.

5.3.1.2.2. Reproducción de la evolución del perfil de rodadura.

Para reproducir la evolución del perfil de rodadura observado, se ha utilizado el módulo *VI-Rail Wear* para el cálculo del desgaste, disponible en la última versión del software ADAMS.

5.3.1.2.2.1. Módulo de desgaste VI-Rail Wear.

Se trata de un nuevo paquete incluido en las últimas versiones de VI-Rail que permite calcular en detalle el desgaste producido por una simulación. Forma parte de un proyecto de investigación promocionado por la empresa Deutsche Bahn AG, cuyos resultados han sido validados por datos reales de vía [13].

El cálculo del desgaste se obtiene para cada punto del perfil de rodadura. Además, el perfil resultante de cada simulación es utilizado al comienzo de la siguiente simulación.

La siguiente imagen (ver Figura 10) muestra la parte relativa a la configuración del desgaste para una simulación dinámica.

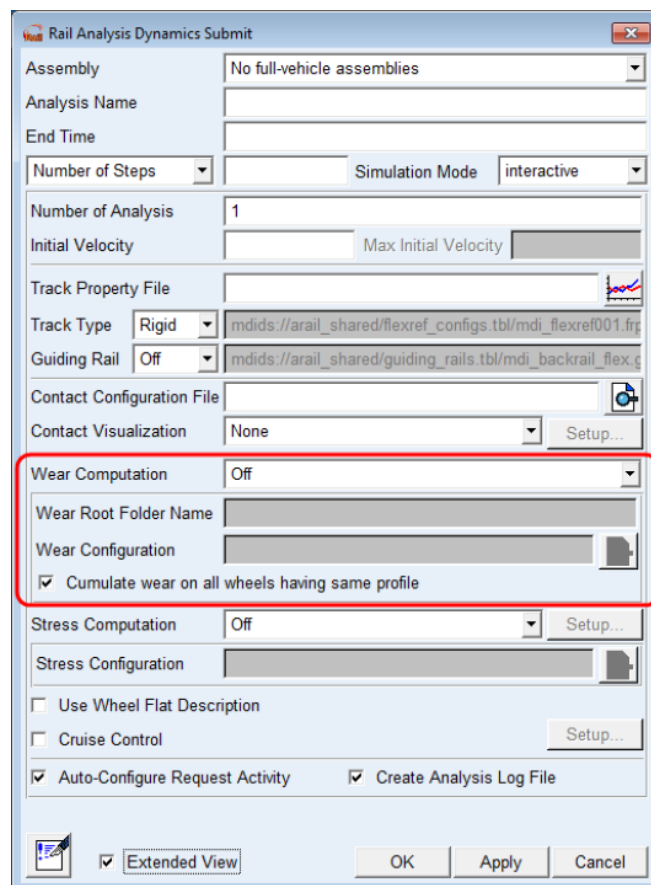


Figura 10: Detalle del menú para la configuración del cálculo del desgaste.

5.3.1.2.2.2. Resultado de la reproducción de la evolución observada.

La siguiente imagen (ver Figura 11) muestra el resultado obtenido habiendo simulado 30000 y 80000km.

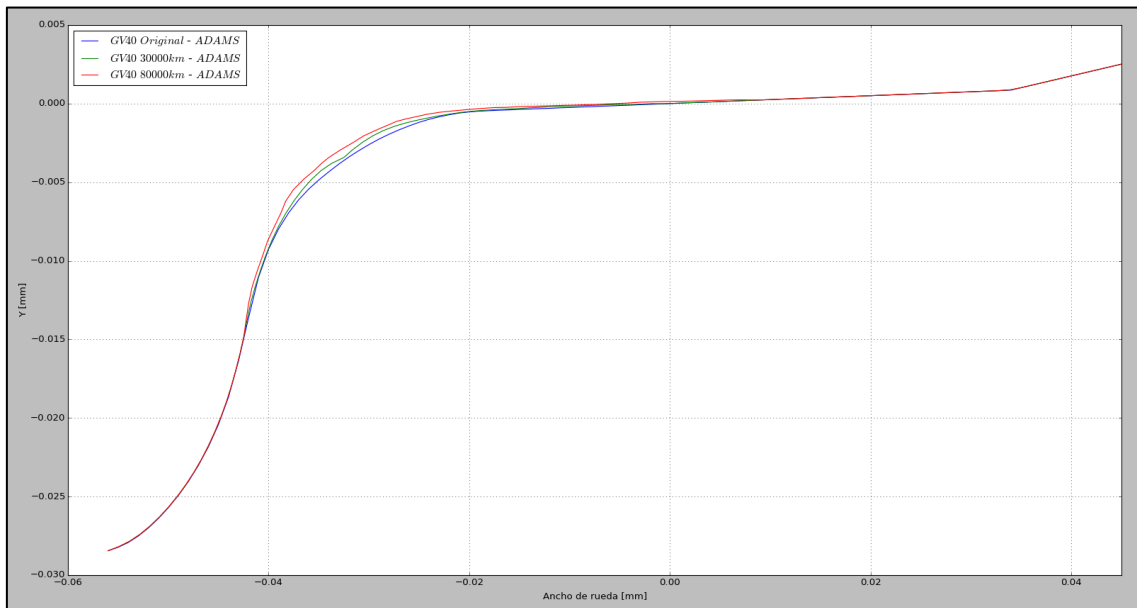


Figura 11: Resultado de la reproducción del perfil GV40 en ADAMS VI-Rail.

Por último, para conseguir reproducir la evolución del perfil de rodadura se han realizado simulaciones en los tres escenarios arriba mencionados de acuerdo a la siguiente proporción (ver Tabla 5).

Nº de Escenario	Nº de simulaciones	Distancia
1	39	32000km
2	60	61000km
3	14	6200km

Tabla 5: Relación de nº de simulaciones y distancia recorrida para cada tipo de escenario.

Así, se han realizado un total de 113 simulaciones recorriendo aproximadamente 100000km.

5.3.1.3. Fase #3: Definición de un perfil optimizado.

A continuación se describen las fases en las que se ha dividido el proceso de obtención del perfil optimizado.

5.3.1.3.1. Fase #1: Método de creación.

A la hora de crear un nuevo perfil se ha utilizado el programa ME-10. Este software permite importar el perfil original GV40 y mediante formas geométricas simples, modificarlo hasta conseguir un nuevo perfil. La siguiente imagen (ver Figura 12) muestra un ejemplo de un perfil de rodadura en ME-10.

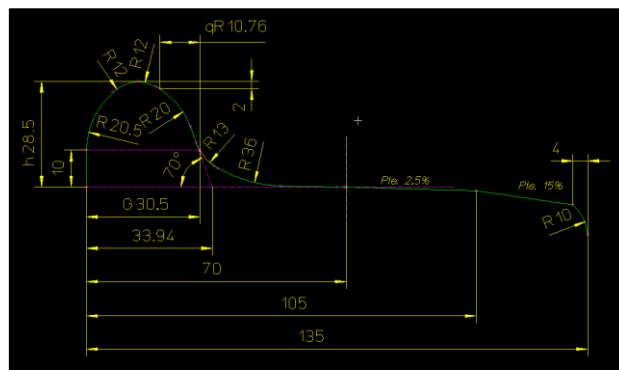


Figura 12: Perfil de rodadura en el programa ME-10.

5.3.1.3.2. Fase #2: Perfil optimizado.

El proceso seguido para la obtención de un perfil optimizado se describe a continuación (ver Figura 13).

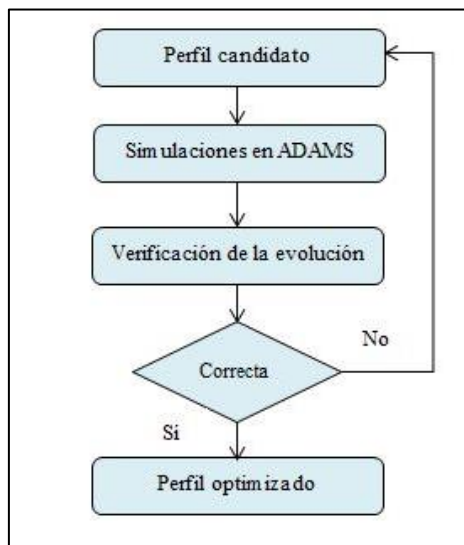


Figura 13: Diagrama de flujo para la obtención del perfil optimizado.

Así, la siguiente imagen (ver Figura 14) muestra la comparativa entre el perfil de rodadura original GV40 y el creado durante el proceso de optimización.

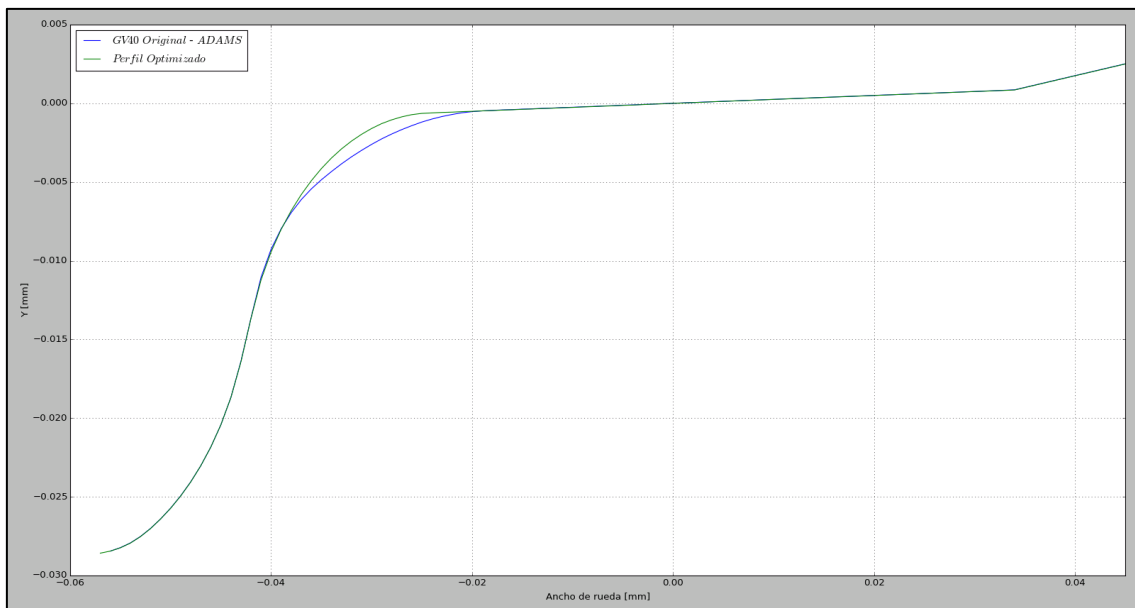


Figura 14: Comparativa entre el perfil de rueda GV40 y el perfil optimizado.

Como se puede observar, el perfil optimizado se caracteriza por una transición entre banda de rodadura y pestaña más acusada. El objetivo de este cambio es evitar la aparición de la acanaladura observada así como los puntos de no contacto.

5.3.1.3.3. Fase #3: Resultado de la evolución del perfil optimizado.

La siguiente imagen (ver Figura 15) muestra el resultado de la evolución del perfil de rueda optimizado.

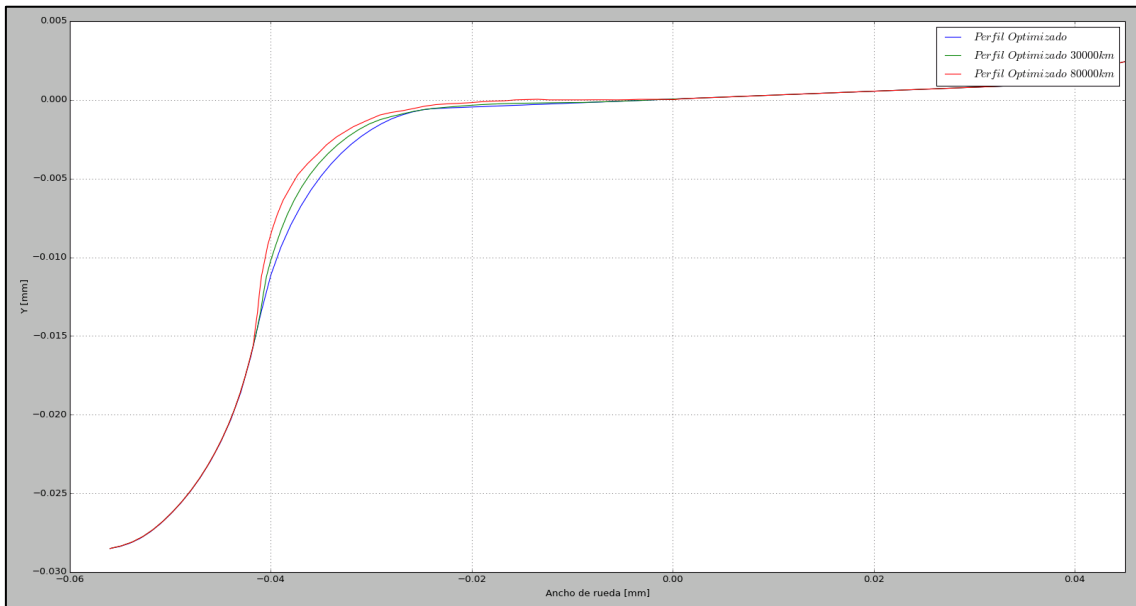


Figura 15: Resultado de la reproducción del perfil optimizado en ADAMS VI-Rail.

Así, se demuestra que el nuevo perfil satisface la condición de desgaste homogéneo y como consecuencia, ya no existen puntos de no contacto.

5.3.2. Comparativa entre el perfil GV40 y perfil optimizado.

Este apartado muestra el resultado de la comparativa en cuanto al documento EN-14363 [10] entre el perfil original GV40 y el perfil obtenido durante el proceso de optimización, siendo los siguientes parámetros los sometidos a estudio.

- Conicidad equivalente.

Según el documento UNE-EN 15302 [8], la conicidad equivalente se define como “*la tangente del ángulo cónico de un par de ruedas con ruedas cónicas cuyo movimiento transversal tiene la misma longitud de onda cinemática que el par de ruedas dado*”. Viene definida así (ver Expresión 1).

$$\tan \gamma_e = \left(\frac{\pi}{\lambda}\right) 2er_0$$

Expresión 1: Definición de conicidad equivalente.

Donde λ es la longitud de onda cinemática, e es la distancia nominal de los planos de rodadura de contacto y r_0 es el radio de las ruedas cuando el par de ruedas está centrado en la vía.

- Velocidad crítica.

Se define como la velocidad a la cual el vehículo se vuelve inestable y se ha calculado en vía recta sin irregularidades.

- Coeficiente de descarrilo

Se define de la siguiente manera (ver Expresión 2).

$$\left(\frac{Y}{Q}\right)_{20\text{Hz}, 2\text{m}, \text{medio}, 99,85\%}$$

Expresión 2: Definición del coeficiente de descarrilo.

Donde Y y Q representan las fuerzas vertical y lateral durante el contacto rueda-carril. El valor calculado corresponde al 99.85% del valor obtenido filtrando el cociente mediante una media móvil de 2m con incrementos de 0,5m y un filtro paso-bajo de 20Hz.

- Sumatorio de fuerzas laterales.

Se calcula de la siguiente manera (ver Expresión 3).

$$\sum_{20\text{Hz}, 2\text{m}, \text{medio}, 99,85\%} \leq \left(10 + \frac{2Q_0}{3}\right) \text{ (kN)}$$

Expresión 3: Definición del sumatorio de fuerzas.

Donde $2Q_0$ es el valor medio de la carga por eje del vehículo.

El valor final mostrado corresponde al percentil 99.85 del valor obtenido tras filtrar las fuerzas mediante una media móvil de 2m con incrementos de 0,5m y un filtro paso-bajo de 20Hz.

- N° de desgaste.

Se define de la siguiente manera (ver Expresión 4).

$$W_N = F_\xi \cdot v_\xi + F_\eta \cdot v_\eta$$

Expresión 4: Definición del N° de desgaste.

Se trata de la energía disipada debido al contacto y su valor depende de las fuerzas (F_ξ y F_η) y velocidades (v_ξ y v_η) de deslizamiento en las direcciones longitudinal y lateral. El valor mostrado corresponde al RMS del n° de desgaste durante la negociación de la curva.

La siguiente tabla muestra la clasificación del valor del N° de desgaste (ver Tabla 6).

N° de desgaste < 200	Bajo
$200 \leq$ N° de desgaste < 400	Medio
N° de desgaste \geq 400	Alto

Tabla 6: Categorías para el N° de desgaste.

Por último, los escenarios utilizados en la comparativa son los aquellos dos por los que más distancia circulan los trenes estudiados y que han sido definidos en el apartado 5.3.1.2.1. “Definición de los escenarios para la S730”. Se ha evaluado el comportamiento de la rueda del primer eje externa a la curva.

Las siguientes imágenes (ver Figura 16 y 17) muestran el valor de la conicidad equivalente de ambos perfiles estudiados para los escenarios de vía con ancho UIC y RENFE.

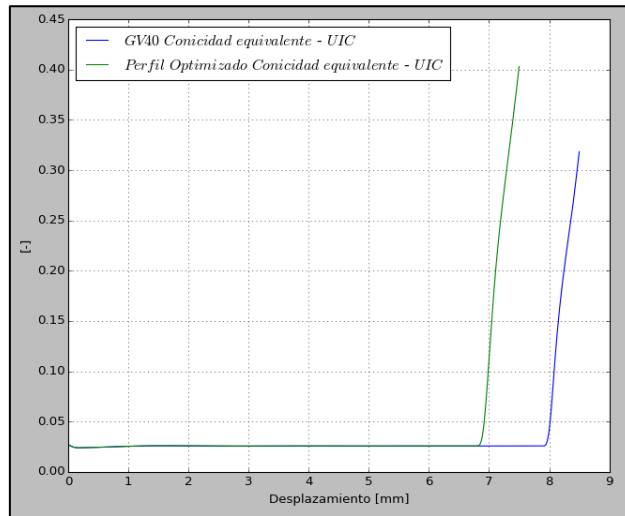


Figura 16: Resultado de la conicidad equivalente para ambos perfiles en ancho UIC.

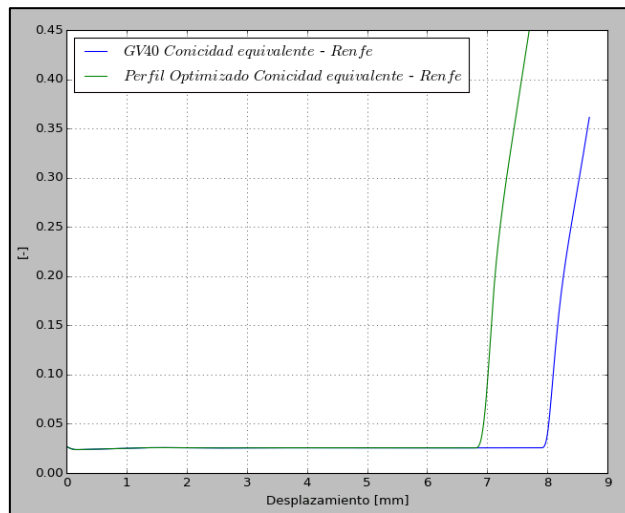


Figura 17: Resultado de la conicidad equivalente para ambos perfiles en ancho RENFE.

La siguiente tabla (ver Tabla 7) muestra los valores máximos de los parámetros bajo análisis.

Parámetro	Valor límite
Y/Q	0.8
ΣY	$10+2*Q_0/3 = 66.7\text{kN}$

Tabla 7: Valores límite considerados para los parámetros analizados durante la comparativa.

Se ha utilizado un valor de Q_0 (carga por rueda) igual a 85kN.

Las siguientes tablas (ver Tabla 8, 9, 9 y 11) muestran los resultados de la comparativa.

**** Perfil original GV40.**

- Escenario LAV UIC.

	Velocidad crítica	Y/Q	ΣY	W_N
GV40 original	390km/h	0.2	18.75	152.3
GV40 30000km	340km/h	0.245	20.7	220
GV40 80000km	300km/h	0.25	21.1	234

Tabla 8: Resultados para el perfil GV40 en el escenario de LAV UIC.

- Escenario LC RENFE.

	Velocidad crítica	Y/Q	ΣY	W_N
GV40 original	380km/h	0.43	26.94	454
GV40 30000km	320km/h	0.45	29.06	494
GV40 80000km	305km/h	0.45	28.9	485

Tabla 9: Resultados para el perfil GV40 en el escenario de LC RENFE.

**** Perfil optimizado.**

- Escenario LAV UIC.

	Velocidad crítica	Y/Q	ΣY	W_N
Optimizado original	380km/h	0.2	18.9	166
Optimizado 30000km	360km/h	0.27	19.1	174
Optimizado 80000km	320km/h	0.32	19.4	185

Tabla 10: Resultados para el perfil optimizado en el escenario de LAV UIC.

- Escenario LC RENFE.

	Velocidad crítica	Y/Q	ΣY	W_N
Optimizado original	370km/h	0.44	27	454
Optimizado 30000km	360	0.45	27.5	475
Optimizado 80000km	310km/h	0.48	27.8	478

Tabla 11: Resultados para el perfil optimizado en el escenario de LC RENFE.

Por último, las siguientes imágenes (ver Figuras 18 y 19) muestran el comportamiento de ambos perfiles estudiados en cuanto al “Coeficiente de descarrilo” y “Número de Desgaste”. Se ha hecho hincapié en estos dos parámetros ya que están directamente relacionados con la seguridad y con la tasa de desgaste respectivamente, siendo de vital importancia tanto para el operador como para el mantenedor.

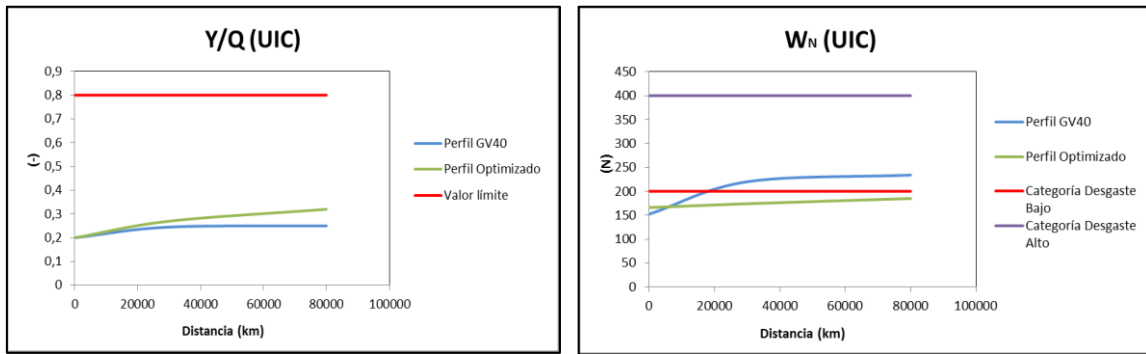


Figura 18: Resultado de Y/Q y W_N para el escenario de UIC para ambos perfiles estudiados.

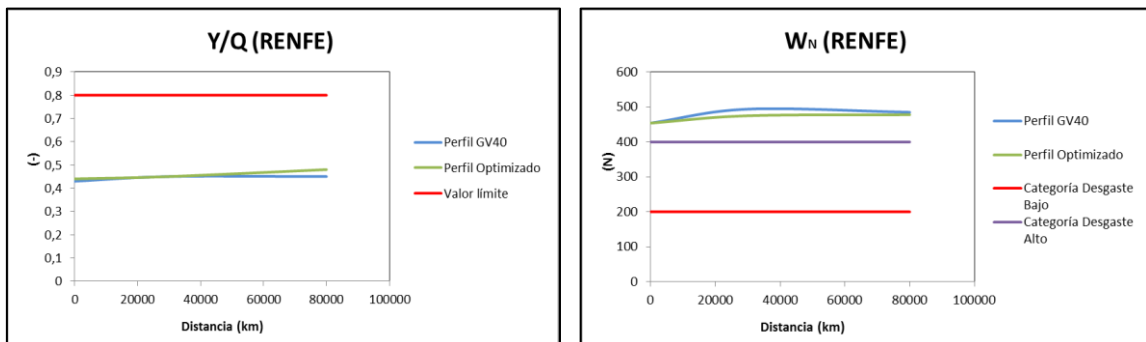


Figura 19: Resultado de Y/Q y W_N para el escenario de RENFE para ambos perfiles estudiados.

De los datos mostrados anteriormente, se puede concluir que el perfil optimizado satisface los límites de seguridad y permite conseguir valores del n° de desgaste muy similares a los obtenidos con el perfil original GV40.

6. Conclusiones.

En este trabajo se ha llevado a cabo la obtención de un perfil de rueda optimizado a partir de la evolución del perfil de rodadura medido en bogies de los trenes de la S730 de RENFE.

Utilizando el método propuesto se consigue crear la evolución detallada de las ruedas medidas, aportando información relevante acerca del tipo de desgaste sufrido por la rodadura.

Por último, las simulaciones dinámicas han permitido obtener el efecto del desgaste en el perfil de rueda optimizado, demostrando que su evolución soluciona los problemas asociados al perfil original cumpliendo además los requerimientos de seguridad.

Se concluye por tanto que el método propuesto satisface los objetivos creados para este trabajo.

7. Aportaciones y futuros trabajos.

7.1. Aportaciones.

Las principales aportaciones de este trabajo se enumeran a continuación.

1. La evolución del perfil de rodadura de los bogies motrices y portantes de la S730 se ha medido durante los meses de Diciembre 2016 a Marzo 2017.
2. Gracias a la disponibilidad de datos obtenidos a partir de una muestra suficientemente amplia, se ha podido crear un patrón de evolución del perfil de rodadura de ambos tipos de bogie en función de los kilómetros recorridos.
3. La evolución del perfil ha sido analizada en detalle aportando las bases de las características de un perfil de rueda optimizado.
4. Se ha creado una versión del modelo dinámico utilizado por TALGO, para realizar análisis del comportamiento de la rodadura de ambos bogies minimizando el tiempo de cálculo.
5. Los escenarios por los que circulan los trenes de la S730 se han analizado, traducándose en tres escenarios creados en el MBS ADAMS – VI Rail que permiten obtener la evolución del perfil observado en la realidad mediante simulaciones y el uso del módulo Rail Wear.
6. Se ha creado un método de optimización de perfil de rueda a partir de la evolución observada del perfil original.
7. Se ha creado un perfil de rueda que mejora el comportamiento del perfil original GV40 ya que evita la aparición de puntos de no contacto consiguiendo así un desgaste homogéneo durante todo el periodo de vida del perfil.

7.2. Trabajos futuros:

Las futuras acciones a realizar como continuación del trabajo presentado son las siguientes:

1. Obtención de una evolución del perfil basada en una muestra de ruedas de mayor tamaño.
2. Determinación detallada de la evolución del perfil de rueda de bogie portante y motor.
3. Definición de una metodología basada en la comunicación ADAMS – Software de optimización que mejore resultados y reduzca el tiempo de obtención.
4. Implementación del perfil de rueda optimizado en la rodadura del S730 con objeto de validar el diseño propuesto.

8. Bibliografía.

- [1] Ahmadian, M., Yang, S. (2007): *Effect of System Nonlinearities on Locomotive Bogie Hunting Stability*.
- [2] Baldovin, D., Baldovin, S. (2011): *The influence of the wheel conicity on the hunting motion critical speed of the high speed railway wheelset with elastic joints*.
- [3] Wickens, A.H. (1965): *The dynamic stability of railway vehicle wheelsets and bogies having profiled wheels*.
- [4] Iwnicki, S.D. (2009): *The effect of profiles on wheel and rail damage*.
- [5] Sharma, R.C. (2013): *Stability and eigenvalue analysis of an indian railway general sleeper coach using Lagrangian Dynamics*.
- [6] Persson, I., Nilsson, R., Bik, U., Lundgren, M., Iwnicki, S. (2010): *Use of a genetic algorithm to improve the rail profile on Stockholm underground*.
- [7] Andersson, E., Orvnäs, A., Persson, R. (2007): *On the optimization of a track-friendly bogie for high speed*.
- [8] UNE-EN 15302 “Método para el cálculo de la conicidad equivalente”
- [9] EN 13715 (2016) “Railway applications Wheelsets and bogies – Wheels – Wheels tread”
- [10] EN-14363 “Railway applications – Testing and simulation for the acceptance of running characteristics of railway vehicles – Running behavior and stationary test”.
- [11] Zaazaa, K.E., Schwab A.L. (2009): *Review of Joost Kalker’s wheel-rail contact theories and their implementation in multibody codes*.
- [12] Rodríguez, V. Hurtado M. (2012): “ES-0461 Desarrollo del perfil de rueda independiente para carril ruso”.
- [13] VI-Grade GmbH: VI-Rail 17.0 Documentation