



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



TESIS DOCTORAL:

Modelado de la interacción entre pantógrafo y catenaria rígida con técnicas de elementos finitos y validación con ensayos modales experimentales

Universidad de Málaga

Dpto. Ingeniería Mecánica, Térmicas y de Fluidos
Área de Ingeniería Mecánica

Programa de doctorado

Ingeniería Mecánica y Eficiencia Energética

Director

Sergio Postigo Pozo

Tutor

Juan Antonio Cabera Carrillo

Doctoranda

Montserrat Simarro Vega

UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA




Málaga, septiembre de 2022



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

AUTOR: Montserrat Simarro Vega

 <https://orcid.org/0000-0003-3884-6987>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer obras derivadas.

UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga (RIUMA): riuma.uma.es



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD DE LA TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL TÍTULO DE DOCTOR

D./Dña MONTSERRAT SIMARRO VEGA

Estudiante del programa de doctorado INGENIERÍA MECÁNICA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA de la Universidad de Málaga, autor/a de la tesis, presentada para la obtención del título de doctor por la Universidad de Málaga, titulada: MODELADO DE LA INTERACCIÓN ENTRE PANTÓGRAFO Y CATENARIA RÍGIDA CON TÉCNICAS DE ELEMENTOS FINITOS Y VALIDACIÓN CON ENSAYOS MODALES EXPERIMENTALES

Realizada bajo la tutorización de JUAN ANTONIO CABRERA CARRILLO y dirección de SERGIO POSTIGO POZO (si tuviera varios directores deberá hacer constar el nombre de todos)

DECLARO QUE:

La tesis presentada es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, conforme al ordenamiento jurídico vigente (Real Decreto Legislativo 1/1996, de 12 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Propiedad Intelectual, regularizando, aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), modificado por la Ley 2/2019, de 1 de marzo.

Igualmente asumo, ante a la Universidad de Málaga y ante cualquier otra instancia, la responsabilidad que pudiera derivarse en caso de plagio de contenidos en la tesis presentada, conforme al ordenamiento jurídico vigente.

En Málaga, a 19 de 10 de 2022

Fdo.: MONTSERRAT SIMARRO VEGA Doctorando/a	Fdo.: JUAN ANTONIO CABRERA CARRILLO Tutor/a
---	--



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



Escuela de Doctorado

Fdo.: SERGIO POSTIGO POZO
Director/es de tesis



Edificio Pabellón de Gobierno. Campus El Ejido.
29071
Tel.: 952 13 10 28 / 952 13 14 61 / 952 13 71 10
E-mail: doctorado@uma.es

AUTORIZACIÓN LECTURA

D. SERGIO POSTIGO POZO, profesor Titular de la Universidad de Málaga, en calidad de Director, AUTORIZA:

La presentación de la Tesis Doctoral realizada por Dña. MONTSERRAT SIMARRO VEGA, titulada “MODELADO DE LA INTERACCIÓN ENTRE PANTÓGRAFO Y CATENARIA RÍGIDA CON TÉCNICAS DE ELEMENTOS FINITOS Y VALIDACIÓN CON ENSAYOS MODALES EXPERIMENTALES”, por considerar que se han alcanzado los objetivos de la investigación propuestos y que reúne los requisitos formales y científicos para obtener el título de Doctor por la Universidad de Málaga.

Así mismo hace constar que las publicaciones que avalan esta Tesis Doctoral han sido desarrolladas como parte de la investigación que en ella se desarrollan y que no han sido utilizadas en tesis anteriores.

Fdo: SERGIO POSTIGO POZO
Director de tesis

En Málaga, a 19 de octubre de 2022



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE
INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



iMMA
Ingeniería Mecánica Málaga

Agradecimientos

“Hija, cuando acabes la tesis no vas a tener con quien celebrarlo” detrás de estas palabras está el reclamo de mi familia por todo el tiempo que he tenido que renunciar a ellos por conseguir esta meta. A pesar de esto, todos siguen presentes en mi día, en mi corazón y en mi vida. Gracias a mi MADRE, he tenido que ser madre para saber que no hay forma de expresar con palabras lo que se esconde detrás de una madre. “Soy incondicional” me dice, yo diría más bien irracional, porque pierde la cordura cuando habla de mí, porque parece que roza la perfección, porque el amor de una madre a un hijo es irracional. Gracias por acompañarme en mi camino, por consentirme y quererme con locura, por enseñarme la alegría con la que debemos afrontar cada día, por tu ejemplo de valentía y superación, simplemente gracias. Gracias a mi padre, por enseñarme a batallar cada día, por mostrarme las dificultades de la vida y cómo afrontarlas, por acompañarme en mi carrera laboral y calmar mis frustraciones, simplemente por escucharme, gracias. Gracias a mis hermanas, por calmar mi alma, porque con ellas mi sol brilla más, porque forman parte de mi felicidad. Siempre estaré en deuda con ellas.

Gracias a Sergio, por enseñarme a amar, entre otras cosas el mundo de la investigación. Por acompañarme en este camino desde el primer día hasta la última coma de esta memoria. Por regalarme su tiempo y enseñarme cada detalle del mundo científico. Por compartir la pasión que siente por los trenes y por no haberme dejado bajarme en cualquier estación a lo largo de este viaje. Por su nivel de exigencia, aunque a veces delirante, me ha permitido sentirme orgullosa de este trabajo y valorar la calidad de cada detalle. Gracias por acompañarme en esta etapa profesional y formar parte de ella. Gracias a los ‘Juanes’, por apoyar a Sergio y por tanto a mí. En especial a Castillo, gracias por aportar tanta sabiduría y calidad a este trabajo. Gracias a María, por escuchar mis necesidades y facilitarme el camino.

Gracias a CHLOE, porque no se puede sentir más amor y felicidad cada mañana al ver sus mofletes. Porque ha sido el impulso que necesitaba en la última etapa. A pesar del dolor de renunciar a pasar tiempo saltando juntas, espero ser un ejemplo para ella.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



Resumen

El trabajo de la presente tesis se enmarca en el sector ferroviario. Desde su invención, el ferrocarril trajo cambios importantes en las costumbres de las sociedades. A día de hoy, el ferrocarril tiene además un papel significativo en las políticas sociales, económicas, energéticas, etc. de todas las sociedades modernas.

En la actualidad, una de las soluciones más habituales para generar la tracción en los ferrocarriles es mediante motores eléctricos. De todos los sistemas de alimentación eléctrica de trenes existentes, este trabajo se centra en la catenaria rígida. Este sistema está actualmente en expansión, siendo muy valorado por los administradores ferroviarios, pues presenta algunas ventajas frente a los sistemas convencionales, como es el caso de la catenaria flexible. A pesar de sus cualidades, la alimentación mediante catenaria rígida aún no está lo suficientemente desarrollada, pues tiene pendiente mejorar algunos aspectos técnicos relevantes que permitan proporcionar un mejor funcionamiento. Uno de estos aspectos clave es la pobre transmisión de corriente y los problemas de desgaste prematuro en los materiales de contacto que se generan al aumentar la velocidad de explotación de los ferrocarriles.

Esta tesis se propone como objetivo ampliar el conocimiento acerca de la interacción entre pantógrafo y catenaria rígida con el fin de mejorar la transmisión de corriente y reducir los futuros desgastes de los materiales en contacto. Para alcanzar este objetivo se considera necesario disponer de modelos matemáticos validados de catenaria rígida y pantógrafo que permitan simular el comportamiento de la interacción en un amplio rango de configuraciones típicas de operación de este tipo de instalaciones. Los resultados de estas simulaciones permitirán proponer nuevas soluciones de diseño de ambos sistemas que contribuyan a una mayor explotación de las vías y a la reducción de costes de instalación y mantenimiento. Para ello se plantearon tres etapas principales que se enumeran a continuación:

- I. Desarrollo de una herramienta basada en algoritmos evolutivos para automatizar el proceso de validación de modelos matemáticos a partir de resultados de ensayos modales experimentales en túnel y laboratorio.
- II. Validación de modelos matemáticos de catenaria a partir de la caracterización dinámica con ensayos modales experimentales de un cantón de catenaria rígida realizados en una instalación real de la Red de Cercanías de Málaga en el túnel del Guadalhorce.
- III. Estudio de la interacción entre el modelo de catenaria rígida previamente validado y modelos de pantógrafo seleccionados de bibliografía que han sido contrastados por otros equipos de investigación referentes en este campo de estudio.

El algoritmo genético basado en técnicas evolutivas empleado permitió automatizar y optimizar el procedimiento de validación de modelos matemáticos de catenaria rígida a partir de resultados de ensayos modales. Se plantearon un gran número de escenarios equivalentes a instalaciones reales de catenaria rígida. En todos los casos el algoritmo demostró su eficacia a la hora de proporcionar los parámetros del modelo desconocidos. Todos los casos analizados presentaron un error por debajo del 0.5% después de 200 iteraciones. De acuerdo con el análisis de resultados, la herramienta fue considerada efectiva para la validación de modelos matemáticos de catenaria rígida.

Con la ayuda del algoritmo, se procedió a validar un cantón de catenaria rígida real que previamente se había caracterizado mediante ensayos modales experimentales realizados en el laboratorio de la UMA (Universidad de Málaga) y en un tramo de túnel de la red de cercanías de Málaga. Los resultados permitieron obtener el comportamiento dinámico del cantón cubriendo un rango de frecuencia entre 0 y 10 Hz. Los errores cometidos entre el modelo de elementos finitos de catenaria rígida y el comportamiento dinámico real obtenido a través de las pruebas modales experimentales del tramo de catenaria fueron por debajo del 2% en las frecuencias



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



naturales y por encima del 92 % en la correlación de las deformadas modales propias del sistema analizado. Estos resultados avalan que el comportamiento dinámico del modelo de catenaria rígida era equivalente al comportamiento medido en la realidad.

Tras la validación del modelo de catenaria rígida de un cantón completo se procedió al estudio de la interacción entre pantógrafo y catenaria. Se realizó una selección amplia de pantógrafos con el objetivo de estudiar su influencia en la excitación de la catenaria y las fuerzas de contacto que se generan en la interacción entre ambos sistemas. En todos los casos se obtuvieron las fuerzas de contacto, considerada la magnitud más representativa para el estudio de este tipo de sistemas. El análisis de resultados reveló que las fuerzas de contacto estaban influenciadas por los defectos de montaje a velocidades del pantógrafo superiores a 100 km/h. Así, si la resonancia del pantógrafo no está presente, cuanto menor sea la dispersión de la longitud de vanos, más constantes serán las fuerzas de contacto que se producen durante la interacción entre ambos sistemas. A bajas velocidades la longitud de los vanos y los modelos de pantógrafo tenían poca influencia sobre las fuerzas de contacto. Además, las fuerzas de contacto aumentaban en el seccionamiento de la catenaria. Este fenómeno se volvía más notorio a medida que aumentaba la velocidad de funcionamiento del pantógrafo.

De los pantógrafos analizados se seleccionaron 3 para un estudio en mayor profundidad. Este nuevo estudio se centró en evaluar la influencia en la fuerza de contacto de la velocidad, la precarga aplicada en el pantógrafo y el efecto de diferentes longitudes de vano de la catenaria rígida. El análisis de resultados reveló que cuanto mayor es la velocidad y la longitud de vano, mayores son las fluctuaciones de la fuerza de contacto. Por el contrario el aumento de la precarga conduce a menores oscilaciones de la fuerza de contacto siempre que no estén presentes efectos de resonancia.

Las técnicas y metodología empleadas a lo largo de esta tesis para la caracterización de la superestructura de catenaria rígida y su interacción con el pantógrafo permitieron obtener resultados de alta fiabilidad. Los resultados y conclusiones extendieron el conocimiento en un amplio rango de configuraciones de este tipo de instalaciones y su funcionamiento. Estos resultados fueron contrastados con las entidades ferroviarias y son coincidentes con los principales problemas expuestos a lo largo de los últimos años. Gracias al trabajo realizado será posible abordar líneas futuras que converjan en la mejora de la calidad de las instalaciones y su funcionamiento.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE
INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



iMMA
Ingeniería Mecánica Málaga

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ESTRUCTURA DE TESIS.....	1
1.2. INTRODUCCIÓN A LA TEMÁTICA DE ESTUDIO	2
2. ANTECEDENTES	5
2.1. ANTECEDENTES DE LA CATENARIA RÍGIDA.....	5
2.2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	6
3. OBJETIVO.....	11
4. METODOLOGÍA GLOBAL	11
5. JUSTIFICACIÓN DE LA UNIDAD TEMÁTICA	14
6. RESUMEN GLOBAL DE RESULTADOS	15
7. EXPOSICIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	17
7.1. ARTÍCULO I: “A PROCEDURE FOR VALIDATING RIGID CATENARY MODELS USING EVOLUTIONARY TECHNIQUES”	17
7.1.1. <i>INTRODUCCION</i>	17
7.1.2. <i>OBJETIVO</i>	18
7.1.3. <i>METODOLOGIA</i>	18
7.1.4. <i>RESUMEN DE RESULTADOS</i>	20
7.1.5. <i>DISCUSIÓN</i>	22
7.2. ARTÍCULO II: “ANALYSIS OF CONTACT FORCES BETWEEN THE PANTOGRAPH AND THE OVERHEAD CONDUCTOR RAIL USING A VALIDATED FINITE ELEMENT MODEL”	23
7.2.1. <i>INTRODUCCION</i>	23
7.2.2. <i>OBJETIVO</i>	24
7.2.3. <i>METODOLOGIA</i>	24
7.2.4. <i>RESUMEN DE RESULTADOS</i>	25
7.2.5. <i>DISCUSIÓN</i>	28
7.3. ARTÍCULO III: “EVALUATION OF THE INFLUENCE OF THE SPEED, PRELOAD AND SPAN LENGTH ON THE CONTACT FORCES IN THE INTERACTION BETWEEN THE PANTOGRAPH AND THE OVERHEAD CONDUCTOR RAIL”	29
7.3.1. <i>INTRODUCCIÓN</i>	29
7.3.2. <i>OBJETIVO</i>	29
7.3.3. <i>METODOLOGÍA</i>	30
7.3.4. <i>RESUMEN DE RESULTADOS</i>	30
7.3.5. <i>DISCUSIÓN</i>	35
8. CONCLUSIONES GLOBALES	36
9. LÍNEAS FUTURAS	37
10. BIBLIOGRAFIA.....	39
11. TRABAJOS PARA COMPENDIO	41



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE
INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



iMMA
Ingeniería Mecánica Málaga

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Estructura de la tesis	1
Figura 2: a) Sistema de catenaria convencional. b) Sistema de catenaria rígida.....	3
Figura 3: Esquema metodología global	12
Figura 4: a) Esquema instalación catenaria rígida b) Sección perfil de aluminio e hilo de contacto	13
Figura 5: “Global methodology for study of the validity of the genetic algorithm” (Metodología global para el estudio de validación del algoritmo genético)	19
Figura 6: “Goal function evolution in the case of scenario 2” (Evolución de la función objetivo para los casos del escenario 2).....	20
Figura 7: “Goal function evolution in the case of scenario 3” (Evolución de la función objetivo para los casos del escenario 3).....	21
Figura 8: “Goal function evolution in the cases of scenario 1” (Evolución de la función objetivo para los casos del escenario 1).....	21
Figura 9: “Candidate and experimental mode shapes, goal function, MAC and relative error evolution of the flexible support stiffness (support 5) for case E3-V20L12C01.” (Candidato y experimental modo de vibración, función objetivo, evolución del error MAC y de la rigidez del soporte (soporte5) para el caso E3-V20L12C01)	22
Figura 10: “Support stiffness evolution for case E3-V20L12C01.” (Evolución de la rigidez del soporte para el caso E3-V20L12C01)	22
Figura 11: “Contact forces in cases SI-P04-V130 y SR- P04-V130” (Fuerzas de contacto en los casos SI-P04-V130 y SR- P04-V130)	26
Figura 12: “Histograms of ideal and real OCR span lengths” (Histograma de las longitudes de vano de la sección ideal y real de catenaria rígida)	26
Figura 13: “Contact forces in the ideal OCR subsection” (Fuerzas de contacto en la subsección ideal de catenaria rígida).....	27
Figura 14: “Standard deviations of the contact forces” (Desviación estándar de las fuerzas de contacto)	28
Figura 15: “Measured forces (top) and histogram (bottom). Pantogrph 1 (left), pantograph 2 (right). 70 km/h” (Medida de las fuerzas de contacto (arriba) e histograma (abajo). Pantógrafo 1 (izquierda), pantógrafo 2 (derecha). 70 km/h).....	30
Figura 16: “Measured forces (top) and histogram (bottom). Pantogrph 1 (left), pantograph 2 (right). 100 km/h” (Medida de las fuerzas de contacto (arriba) e histograma (abajo). Pantógrafo 1 (izquierda), pantógrafo 2 (derecha). 100 km/h).....	31



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE
INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



iMMA
Ingeniería Mecánica Málaga

Figura 17: “Measured forces (top) and histogram (bottom). Pantograph 3. 130 km/h” (Medida de las fuerzas de contacto (arriba) e histograma (abajo). Pantógrafo 3. 130 km/h)	32
Figura 18: “Measured forces (top) and histograms (bottom). Pantograph 1 (top-left), pantograph 2 (top-right) and pantograph 3 (bottom-center). 160 km/h” (Medida de la fuerza (arriba) e histograma (abajo). Pantógrafo 1 (arriba-izquierda), pantógrafo 2 (arriba-derecha) y pantógrafo 3 (abajo-centro). 160 km/h)	32
Figura 19: “Standard deviations vs span length (SI) and preload (Pr). 70 km/h” (Desviación estándar vs longitud de vano (SI) y precarga (Pr). 70 km/h)	33
Figura 20: “Standard deviations vs span length (SI) and preload (Pr). 100 km/h” (Desviación estándar vs longitud de vano (SI) y precarga (Pr). 100 km/h)	33
Figura 21: “Standard deviations vs span length (SI) and preload (Pr). 130 km/h” (Desviación estándar vs longitud de vano (SI) y precarga (Pr). 130 km/h)	33
Figura 22: “Standard deviations vs span length (SI) and preload (Pr). 160 km/h” (Desviación estándar vs longitud de vano (SI) y precarga (Pr). 160 km/h)	33
Figura 23: “Test spectrums” (Resultados de espectro)	34
Figura 24: “OCR natural frequencies. Span length 8 m (top-left) – Span length 10 m (top-right) – Span length 12 m (bottom)” (Frecuencias naturales de catenaria rígida. Longitud de vano de 8 m (arriba-izquierda) – Longitud de vano 10 m (arriba-izquierda) – Longitud de vano 12 m (abajo))	35



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA





ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Datos de trenes de pasajeros y mercancías (Fuente: INE “Instituto nacional de estadística”). Datos de la red actual ferroviaria (Fuente: Adif “Administrador de infraestructuras ferroviarias”)	3
Tabla 2: Incidencias por rotura de catenaria	5
Tabla 3: Revisión bibliográfica clasificada por temáticas de estudio	7
Tabla 4: Líneas futuras clasificadas por temáticas de estudio	37



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE
INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



iMMA
Ingeniería Mecánica Málaga

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ESTRUCTURA DE TESIS

Este documento está organizado en 11 capítulos. La Figura 1 presenta un esquema de la estructura de la memoria de tesis. A continuación se describe cada capítulo brevemente:

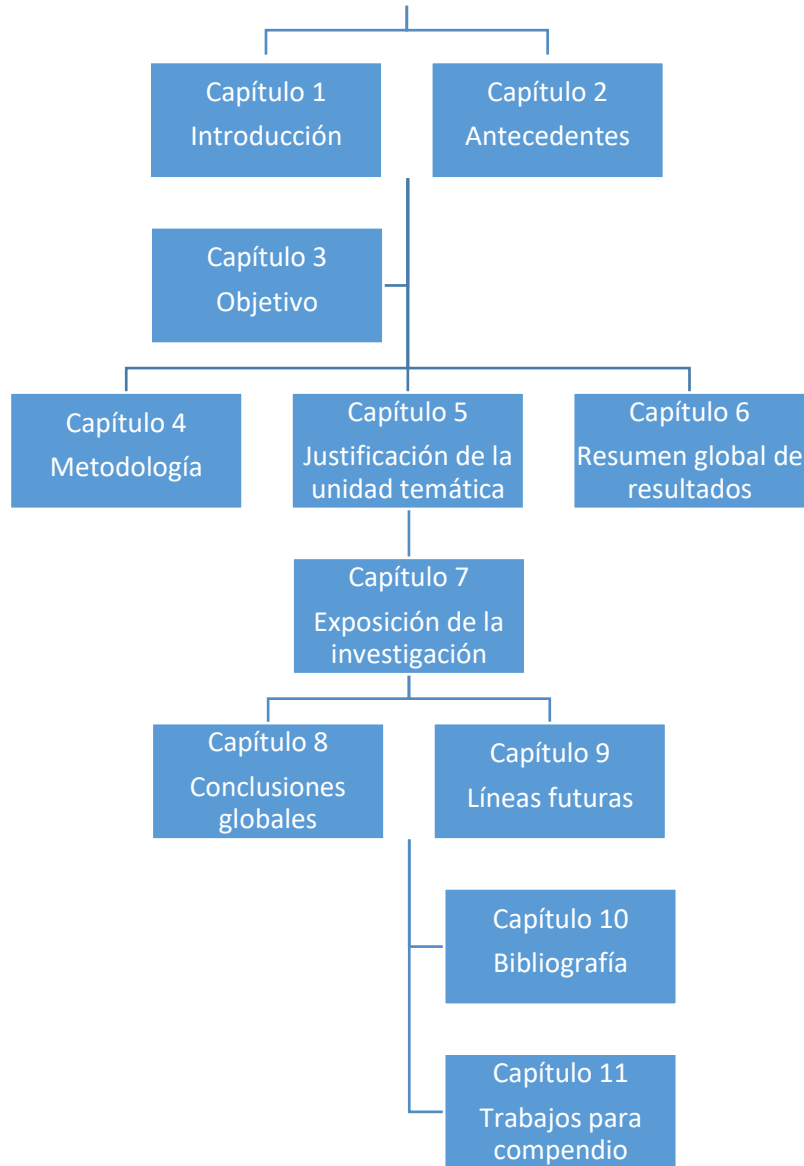


Figura 1: Estructura de la tesis

En el primer capítulo se resume brevemente la historia de ferrocarril y el estado actual en España centrándose en la tipología de transmisión de energía a las unidades tractoras para conseguir su movimiento. Se describen las diferentes alternativas existentes y la problemática de cada una de ellas concluyendo en la necesidad de estudio de la catenaria rígida y por tanto el interés de realizar este trabajo.

En el segundo capítulo se describen los antecedentes de la catenaria rígida y su comportamiento en diferentes condiciones de trabajo. Igualmente, se incluye una revisión bibliográfica de los distintos trabajos encontrados relacionados con el estudio de la catenaria rígida y su interacción con el pantógrafo.

En el tercer capítulo se describe el objetivo principal del trabajo de tesis, ampliar el conocimiento acerca del comportamiento de la interacción entre pantógrafo y catenaria rígida. Además, se nombran las tres etapas en las que se divide este trabajo para alcanzar este objetivo: desarrollo de una herramienta de validación de modelos basada en algoritmos evolutivos, validación de un modelo de catenaria rígida de túnel y estudio de la interacción entre pantógrafo y catenaria rígida.

Para alcanzar el objetivo planteado de la presente tesis se estableció una metodología en la que se pueden diferenciar las tres fases principales. Cada una de ellas permitió abordar distintas etapas de este trabajo las cuales convergieron en el estudio del comportamiento de la interacción entre pantógrafo y catenaria rígida. Los aspectos principales de la metodología se recogen en el cuarto capítulo.

En el quinto capítulo se presenta la justificación de la unidad temática de la tesis por compendio donde se describe la relación entre los tres artículos publicados en este trabajo y la dependencia entre sí de cada una de las etapas con las etapas anteriores.

En el sexto capítulo se expone un resumen global de resultados de cada una de las etapas definidas. Se presentan los resultados obtenidos que avalan la aplicación del algoritmo evolutivo en la validación de modelos matemáticos. También se muestran los resultados obtenidos de la validación del modelo de catenaria rígida a partir de ensayos realizados en túnel. Finalmente, se presentan las principales conclusiones obtenidas tras el estudio de un gran número de configuraciones de interacción pantógrafo-catenaria.

En el séptimo capítulo se expone la investigación llevada a cabo a lo largo de la tesis. Se divide a su vez en tres subsecciones correspondientes a cada trabajo publicado. Se pretende hacer una revisión de cada uno de los trabajos y resumir la información contenida en cada uno de ellos.

En el octavo capítulo se exponen las conclusiones globales de la tesis y como se han alcanzado con éxito los sub-objetivos planteados para llevarla a cabo: herramienta validada basada en técnicas evolutivas, modelo validado de catenaria rígida y ampliación del conocimiento de la interacción entre pantógrafo-catenaria.

El capítulo noveno se centra en describir las líneas futuras, las cuales están basadas en las necesidades que han ido surgiendo a lo largo de estos años y en la necesidad de seguir ampliando el conocimiento de este tipo de instalaciones de catenaria rígida y su funcionamiento.

Finalmente, en el décimo y undécimo capítulo se presenta la bibliografía y los trabajos originales presentados para compendio de esta tesis.

1.2. INTRODUCCIÓN A LA TEMÁTICA DE ESTUDIO

En líneas generales podemos decir que el transporte ferroviario de mercancías y personas ha sufrido un continuo avance desde los inicios del ferrocarril. El siglo XVI vio el inicio de éste como transporte de carbón en numerosas minas europeas arrastrados por personas o animales. Más tarde, con la llegada del vapor y el hierro forjado, el transporte ferroviario se encaminó y desarrolló, a golpe de innovaciones, hacia lo que hoy es uno de los principales transportes masivos, rápidos y seguros de personas y mercancías, siendo además de los más ecológicos. Finalmente, se llega a lo que se conoce como tren de alta velocidad, inaugurado en Japón en 1964 y surgido de la necesidad de resolver el problema de transporte entre las pobladas y distanciadas ciudades del país.

El transporte ferroviario, en todos sus niveles, vertebra nuestra sociedad, siendo cada vez más empleado como política pública en las sociedades modernas. El uso ciudadano del transporte público ferroviario genera un valor tangible directo para la economía, la sociedad y el medioambiente. Además, al ser un común denominador en muchos países, cualquier mejora de este medio de transporte tiene un gran impacto social internacional. La Comisión Europea así lo ha entendido en este último periodo, apoyando con más de 406 millones de euros a los distintos objetivos distribuidos según la temática, convergiendo todos ellos en la mejora del sector ferroviario. La Tabla 1 vislumbra la importancia del sector ferroviario a través de los datos referentes a trenes de pasajeros y mercancías desde el 2015 a la actualidad, así como los datos de la red actual ferroviaria en España.

	2021	2020	2019	2018	2017	2016	2015
Nº trenes Pasajeros	148,643	137,197	185,698	185,954	187,850	181,080	183,579
Nº trenes Mercancías	23,640	22,068	25,507	25,088	24,484	24,934	25,499
Pasajeros (M)	418	333	634	602	593	569	567
Toneladas (M)	23	21	24	26	27	24	27
Red ferroviaria (Km)	11.870	-	-	-	-	-	-
Estaciones	1450	-	-	-	-	-	-
Terminales de mercancías	38	-	-	-	-	-	-

Tabla 1: Datos de trenes de pasajeros y mercancías (Fuente: INE "Instituto nacional de estadística"). Datos de la red actual ferroviaria (Fuente: Adif "Administrador de infraestructuras ferroviarias")

El primer ferrocarril con suministro eléctrico en la vía fue en 1883 y para ello utilizaba lo que se conoce como tercer carril. Los cables de alimentación aérea a ferrocarriles se introdujeron en 1879 por Siemens en Berlín. Hoy en día, el sistema que casi monopoliza la alimentación eléctrica a los trenes en el sistema ferroviario es el conocido como Catenaria Flexible (Figura 2a). Adicionalmente, y dentro de los sistemas aéreos, existe otro conocido con el nombre de Catenaria Rígida (Figura 2b), que también se sitúa sobre las vías del tren y muestra los mismos niveles de seguridad en el posible contacto con personas. Ambos sistemas de catenaria aérea funcionan de forma equivalente. Un mecanismo articulado que se denomina pantógrafo y que está situado en el techo del tren, viaja bajo la catenaria ejerciendo una sutil fuerza de contacto y cerrando el contacto eléctrico, permitiendo así alimentar los sistemas eléctricos del tren.



a



b

Figura 2: a) Sistema de catenaria convencional. b) Sistema de catenaria rígida

El primigenio y más extendido de los dos sistemas de conducción eléctrica aérea es la catenaria flexible. Este sistema tiene como componente principal un cable de cobre tensado que se sitúa a una altura lo más constante posible sobre la vía del tren para que éste, a través de su pantógrafo, contacte y permita el flujo de energía desde la catenaria flexible a la unidad tractora del tren. El sistema de catenaria flexible está muy desarrollado y estudiado, y es muy conocido por las administraciones ferroviarias. El amplio conocimiento técnico de la catenaria flexible permite operar de forma segura a velocidades de más de 300 km/h con unos costes de mantenimiento asumidos actualmente como aceptables. Sin embargo, las roturas súbitas del hilo de contacto tensionado en sus extremos ocasionan daños materiales graves y directos sobre los pantógrafos y las unidades tractoras de compañías ajenas, llegando incluso a causar muertes o heridos graves. La Tabla 2, recoge algunas de las incidencias graves relativas a roturas de catenarias destacadas en medios de comunicación en los últimos años. Además del perjuicio directo sobre el material ferroviario, se producen retrasos o cancelaciones del servicio hasta realizar la reparación de todos los sistemas dañados. Todas las consecuencias e inconvenientes se agravan especialmente si éstos se producen en zonas habitadas o en el interior de los túneles. El riesgo de contacto directo con los pasajeros o durante posibles evacuaciones en túneles genera situaciones complejas y en ocasiones arriesgadas.

Por todo lo anterior, los administradores ferroviarios de media y larga distancia están optando, cada vez más, por la instalación del segundo sistema de alimentación eléctrica aérea, la catenaria rígida, que ofrece mayor fiabilidad en su funcionamiento. La catenaria rígida fue patentada en 1972 por el francés Delachaux [1]. El sistema de catenaria rígida se instala generalmente en túneles, aunque existen ya hoy día instalaciones fuera de ellos. La catenaria rígida se compone de un hilo de contacto de cobre; sin embargo, para mantener constante la posición del hilo conductor sobre las vías, este sistema emplea un perfil de aluminio que agarra (pinzando) el hilo de contacto a lo largo de toda su longitud evitando la necesidad de tensarlo en sus extremos. Esta diferencia, presentan varias ventajas destacables de la catenaria rígida frente a la flexible:

- Se imposibilita la rotura del hilo, ofreciendo mayor seguridad en operación e imposibilitando los catastróficos enganchones con el pantógrafo.
- Permite instalarse con menores alturas en túneles de gálibo reducido.
- Permite mayores intensidades eléctricas de circulación al aprovechar la sección conductora del perfil completo de aluminio (no teniendo que duplicar el hilo de cobre en las instalaciones con alta necesidad de densidad de corriente).
- Los costes de mantenimiento se reducen drásticamente ya que sólo es necesario el engrasado y la sustitución del cable una vez se desgasta casi por completo.
- Ofrece mayor fiabilidad en su funcionamiento.

Por el contrario, los inconvenientes que presentan este tipo de instalaciones, están relacionados con la limitación de la velocidad de paso del tren, ya que es necesario reducir la velocidad en tramos donde está instalada la catenaria rígida para garantizar una buena interacción entre pantógrafo y catenaria que permita una adecuada transmisión de potencia a los sistemas eléctricos del tren. Incrementar la velocidad de operación es un aspecto relevante para las administraciones ferroviarias, ya que permite acortar los tiempos de servicio y aumentar la explotación de las instalaciones. Además de los aspectos anteriores, cabe mencionar algunos inconvenientes de este sistema:

- Mayor coste de la instalación inicial
- Longitudes de tramo más cortas
- Menos conocimiento del comportamiento de este sistema en comparación con la catenaria convencional

Incidencias	Fecha	Línea	Tramo	Problema identificado	Consecuencias
I	04/02/2017	Asturias-Madrid	Busdongo-Pajares	Rotura de catenaria	Bloqueo de vía durante 24 h
II	08/03/2017	Madrid-Santander	Palencia-Venta de Baños	Rotura de catenaria y enganchón de pantógrafo	Retrasos en más de 1000 pasajeros
III	12/04/2017	AVE	Málaga-Madrid Adamuz-Alcolea	Rotura de catenaria	Retrasos en más de 10000 pasajeros entre Madrid, Málaga, Cadiz y Sevilla
IV	29/08/2018	Media distancia	Sevilla-Cadiz Las Cabezas-Utrera	Rotura de catenaria (péndolas sueltas)	Retrasos durante más de 6 horas en la línea
V	21/04/2019	Vandellós-Salou	-	Rotura de catenaria	Retrasos en 20 trenes con afección a 2500 pasajeros Retrasos durante dos horas de servicio. Alto riesgo de contacto de cable con carril en zona urbana
VI	05/07/2019	Tranvía	Zaragoza	Rotura de catenaria	Retrasos durante más de 2 horas.
VII	14/03/2022	Ave	Málaga - Madrid	Rotura de catenaria	Retrasos durante más de 4 horas. Más de 5000 pasajeros afectados. Retrasos en otros 20 trenes.
VIII	21/05/2022	Ave	Madrid - Barcelona	Rotura de catenaria	

Tabla 2: Incidencias por rotura de catenaria

A pesar de los inconvenientes, las ventajas son suficientemente relevantes como para considerar la catenaria rígida una buena candidata a ser incorporada en nuevas instalaciones. Surge así la necesidad de desarrollar modelos matemáticos validados de pantógrafos y catenaria que permitan simular la interacción entre ambos sistemas y ampliar el conocimiento del comportamiento de la interacción para demostrar la viabilidad y beneficios de la instalación. Este conocimiento permitirá mejorar este tipo de instalaciones, mejorando el diseño y la calidad de captación de corriente, impidiendo paradas o accidentes en túnel y reduciendo el consumo de recursos naturales al disminuir los desgastes de materiales. En definitiva, obteniendo un mayor rendimiento de este tipo de instalaciones.

2. ANTECEDENTES

2.1. ANTECEDENTES DE LA CATENARIA RÍGIDA

La catenaria rígida es el segundo sistema de alimentación eléctrica aérea más empleado en la actualidad, siendo su instalación cada vez más extendida en túneles. Esta joven tecnología tiene actualmente la limitación de una menor velocidad de circulación de los trenes comparada con la catenaria flexible. Esta menor velocidad de circulación tiene su origen en las excesivas variaciones de las fuerzas de contacto que aparecen entre el pantógrafo y el hilo de contacto de la catenaria rígida (especialmente en los seccionamientos entre cantones). A medida que incrementa la velocidad se acentúan las vibraciones y las oscilaciones de las fuerzas de contacto, lo cual genera una pobre transmisión de corriente y problemas de desgaste prematuro. Cuanto mayor son las oscilaciones de la fuerza de contacto, mayores son las probabilidades de que éstas se reduzcan tanto que abran el contacto y aparezcan arcos eléctricos que fundan los materiales,

umentando con ello la rugosidad. Como consecuencia de todo lo anterior, se generan mayores desgastes en el pantógrafo y el hilo de contacto en la catenaria, incrementándose los costes de mantenimiento.

La fuerza de contacto es la magnitud más representativa para evaluar el comportamiento de la interacción entre ambos sistemas, permitiendo evaluar el riesgo de presencia de arcos eléctricos y problemas de desgaste. Valores bajos de la fuerza de contacto están relacionados con la aparición de arcos eléctricos como consecuencia de la separación entre ambos sistemas. Fuerzas de contacto elevadas conducen a un excesivo desgaste y rotura del hilo de contacto. Las fuerzas de contacto son tan determinantes que existe normativa que las regula. La norma EN 50367 define los límites de la fuerza de contacto desde el punto de vista estático y dinámico para un buen funcionamiento de la instalación. Sin embargo, está más orientada a la catenaria convencional que a la rígida.

La fuerza media del contacto depende de la precarga inicial con la que se ajusta el pantógrafo, de la velocidad del tren y de las características de la catenaria. Un diseño adecuado de estos sistemas es aquel que trata de disminuir las fuerzas de contacto para reducir los desgastes en los materiales, sin llegar a que aparezcan despegues entre el pantógrafo y la catenaria, y así garantizar una buena captación de corriente y un buen suministro de energía a los sistemas eléctricos del tren. La formación de arcos eléctricos y las excesivas oscilaciones en las fuerzas del contacto entre el pantógrafo y la catenaria son los puntos críticos en el diseño de nuevas instalaciones y el principal problema hoy en día, ya que puede producirse el desgaste acelerado de los materiales. Estos desgastes pueden generar roturas de hilo por desgaste excesivo, enganches catastróficos entre la catenaria y el pantógrafo y problemas de seguridad en operación, asunto de gran importancia en el mundo ferroviario. Regular en el futuro estos sistemas para reducir los desgastes será una tarea difícil de realizar sin contar con herramientas de simulación, adecuadamente validadas y contrastadas, que permitan conocer el comportamiento de este tipo de instalaciones.

A diferencia del desconocimiento patente en la catenaria rígida, la catenaria flexible ha sido ampliamente estudiada por múltiples equipos de investigación, con el fin de diseñar infraestructuras de catenaria o mejorar las actuales. Mucha de la información recopilada de estas publicaciones es comentada a lo largo de los 3 artículos publicados que compendian esta tesis. Por el contrario, según nuestro conocimiento, no hay muchos equipos de investigación que se centren en el estudio de la catenaria rígida y su interacción con el pantógrafo. A pesar de los estudios realizados hasta el momento, sigue existiendo margen de mejora para paliar sus defectos y acrecentar sus virtudes. De igual modo, si nos detenemos en la normativa, sobre catenaria flexible se puede encontrar un amplio espectro de normas que apoyan esta solución específica para la alimentación de los trenes eléctricos. Sin embargo, en referencia a la catenaria rígida, al ser una solución que está en los inicios de su desarrollo tecnológico, no existe normativa específica nacional o internacional.

2.2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

De forma global los diferentes autores de los trabajos encontrados en la bibliografía sobre el estudio de la catenaria rígida resaltan las ventajas de este sistema de alimentación eléctrica frente a otros más convencionales. Generalmente destacan entre los aspectos más relevantes: la simplicidad de la superestructura, su robustez, la facilidad de montaje, la no necesidad de tensionar el hilo de contacto, los bajos costes de mantenimiento o la rápida disponibilidad en caso de accidente. Sin embargo, también describen la limitación de la velocidad en este tipo de instalaciones para asegurar una buena transmisión de corriente a los equipos eléctricos del tren, así como, los problemas de desgaste prematuro en el hilo de contacto y los frotadores del

pantógrafo. Estos aspectos preocupan a los operadores ferroviarios por generar limitaciones de velocidad y excesivos costes de mantenimiento derivados de los desgastes prematuros de los materiales. También, inciden en el gran crecimiento de las vías sub-urbanas en Europa y China donde puede ir instalado este sistema. Por todo lo anterior, los equipos de investigación centran sus esfuerzos en ampliar el conocimiento de la catenaria rígida y su interacción con el pantógrafo para poder mejorar estas instalaciones y extender el uso de este sistema de alimentación eléctrica [2-14]. A continuación, la Tabla 3 muestra una clasificación de las referencias bibliográficas según su temática de estudio:

Temática	Referencia
Rediseño de la configuración de catenaria rígida	Oya et al. [2] C. Vera et al. [3] Calleja et al. [4]
Alternativas de cálculo a la metodología de los elementos finitos	Bautista et al. [5] J. D Sanz [6]
Incremento de velocidad - Evaluación del rendimiento de la captación de corriente	Takemura et al. [7] Huang et al. [8] Chen et al. [9] Furrer & Frey [10]
Desgaste prematuro de los materiales en contacto	Wei et al [11] Guiming et al [12]
Revisión de la normativa vigente de la catenaria rígida	Carnevale et al. [13]
Costes de instalación y mantenimiento	Mak Man [14]

Tabla 3: Revisión bibliográfica clasificada por temáticas de estudio

Algunos estudios encontrados en la bibliografía proponen cambios en el diseño de la catenaria con el objetivo de obtener un comportamiento dinámico superior y mejor adaptado a su funcionamiento, entre otros, Oya et al. [2] presentaron un nuevo perfil de catenaria rígida que permitía incrementar la velocidad de operación garantizando la buena captación de corriente durante la interacción entre catenaria y pantógrafo. Para llevar a cabo el estudio y demostrar la viabilidad del nuevo perfil conductor, presentaron una comparativa entre el comportamiento de la interacción en túnel a 80 km/h entre el perfil de catenaria rígida convencional y el nuevo perfil con dos pantógrafos usualmente usados. Entre los resultados que ayudaron a valorar el nuevo perfil mostraron el ratio de pérdida de contacto y observaron que el porcentaje era inferior con el nuevo perfil de catenaria. Como conclusión indicaron que la velocidad máxima del túnel fue 80 km/h pero había margen para seguir cumpliendo con los valores de la normativa, por lo que defendían la viabilidad del nuevo perfil para velocidades mayores a la analizada. Así mismo, el equipo de investigación C. Vera et al. [3] presentó un nuevo perfil conductor de catenaria rígida con el objetivo de mejorar el comportamiento dinámico del perfil actualmente en uso e incrementar la velocidad de operación o reducir la distancia entre soportes. Para llevar a cabo el estudio y simular la interacción entre pantógrafo y catenaria usaron el programa ANSYS para los modelos de elementos finitos y el programa SIMPACK para el análisis de los sistemas elásticos 'multibody'. Tras analizar diferentes parámetros de perfil conductor como las inercias, módulo de Young o la densidad, observaron una reducción significativa en la desviación estándar de la fuerza de contacto cuando incrementaban la inercia del perfil. Este resultado fue el punto de partida para el nuevo diseño del perfil conductor. Tras presentar la sección y propiedades del

nuevo perfil, presentaron una casuística donde contemplaron diferentes escenarios de funcionamiento con el objetivo de realizar una comparativa entre el nuevo perfil y el actual. Después de analizar los resultados concluyeron que el nuevo perfil presentado presentaba un mejor comportamiento durante su interacción con el pantógrafo permitiendo así incrementar la velocidad o aumentar la distancia entre soportes siempre y cuando no se superara un rango de velocidad. Por otro lado, respetando la configuración actual de la superestructura de la catenaria rígida, Calleja et al. [4] presentó el diseño, desarrollo y validación de un prototipo de amortiguador de masa ajustado para reducir la vibración de las frecuencias propias del sistema de catenaria rígida para ser instalado en el vano solidario al perfil. Para conocer el comportamiento dinámico del sistema, realizaron un modelo de elementos finitos en SolidWorks del banco de pruebas de catenaria rígida instalado en el centro de tecnologías ferroviarias de Málaga. Tras analizar los resultados comprobaron que se observaban dos frecuencias de resonancia propias del sistema, las cuales fueron el punto de partida para el diseño y desarrollo del dispositivo de masas sintonizadas. Finalmente para validar el dispositivo, fabricaron un prototipo, lo instalaron en el banco de pruebas y lo analizaron. Los resultados obtenidos demostraron la eficacia del dispositivo para amortiguar las frecuencias de resonancia del sistema analizado.

Muchos de los estudios para simular la interacción entre pantógrafo y catenaria son llevados a cabo empleando la metodología de elementos finitos, sin embargo, se encuentran alternativas de cálculo en la bibliografía. Por ejemplo, Bautista et al. [5] presentó un algoritmo para realizar la cosimulación entre pantógrafo y catenaria rígida. El pantógrafo fue modelado por un procedimiento multicuerpo y la catenaria por medio de elementos finitos. El algoritmo permitió optimizar el diseño de la infraestructura como la configuración de los pantógrafos. Sin embargo, el modelo de catenaria no fue validado con ensayos experimentales. También, J. D Sanz [6] demostró que un software de simulación no específico, usualmente usado en docencia, permitía estudiar la interacción entre pantógrafo y catenaria, sin embargo, se encontraron varias limitaciones al trabajar con modelos de un cantón completo.

En Japón la velocidad de las instalaciones de catenaria rígida, está limitada a 90 km/h y la longitud de vano es de 6 metros. Las entidades ferroviarias tienen como objetivo incrementar la velocidad hasta los 150 km/h. Por ello, Takemura et al. [7] se centraron en analizar el efecto de los intervalos entre soportes, la clasificación de los pantógrafos más apropiados para esta instalación y estudiar la influencia de los seccionamientos en el rendimiento de la captación de corriente durante la interacción entre ambos sistemas. Para ello, estudiaron las características de la catenaria rígida de sección transversal tipo T y pantógrafo desde el punto de vista estático y dinámico y analizaron la influencia de la pérdida de contacto en los intervalos entre soportes y en el seccionamiento. Como conclusiones generales destacaron: la diferencia de caída de vano según su longitud; el mejor comportamiento de uno de los pantógrafos de los dos analizados en el estudio; y la posibilidad de incrementar a 7 metros la longitud de vano para un rango de funcionamiento entre 80 y 160 km/h según el análisis de pérdida de contacto realizado. Siguiendo la línea del estudio anterior, otros equipos de investigación también han centrado sus esfuerzos en analizar la calidad de la captación de corriente durante la interacción entre el pantógrafo y la catenaria, así como, evaluar cuáles son los parámetros más influyentes en el comportamiento de las fuerzas de contacto. Huang et al. [8] desarrollaron un método para evaluar la captación de corriente entre pantógrafo y los sistemas de transmisión de corriente más empleados en la actualidad: catenaria convencional y rígida. El objetivo era detectar las pérdidas de contacto entre pantógrafo y catenaria para determinar la calidad de la transmisión de corriente. El estudio se realizó con un modelo de pantógrafo AM59 FU propiedad de Faiveley al que se le aplicó una precarga de 75 N y un tramo de catenaria rígida instalada en la línea norte de Taiwan. Los resultados recogieron el ratio de la duración total de los despegues detectados para cada rango de velocidad, el cual variaba desde 80 a 135 km/h. Pudo observarse claramente

la pobre captación de corriente en túnel en comparación con el comportamiento de la interacción en catenaria convencional. Para velocidades inferiores a 100 km/h las diferencias de comportamiento son significativas, sin embargo, en el rango comprendido entre 110 y 120 km/h ambos sistemas presentaban un comportamiento semejante. No obstante, durante todo el estudio se cumplió con la regulación europea. Finalmente, en estudios futuros, el equipo de trabajo se planteaba obtener modelos de pantógrafo y catenaria para simular la interacción con el objetivo de predecir la calidad de la captación de corriente cuando el tren se mueve a altas velocidades. Chen et al. [9] también estudiaron los parámetros clave en las fuerzas de contacto. Para ello, propuso una metodología basada en modelos lineales de elementos finitos de catenaria rígida y realizaron en torno a 700 simulaciones a 220 km/h donde calcularon los valores estadísticos de las fuerzas de contacto. Estudiaron la sensibilidad de la longitud de vano, la rigidez a la flexión y densidad lineal, en las fuerzas de contacto. Además, analizaron la influencia de las irregularidades del hilo de contacto en la fuerzas de contacto. Tras obtener los resultados de las simulaciones, concluyeron que la longitud de vano era un parámetro sensible que tenía un efecto significativo en la fuerza de contacto. Como ya es sabido, las entidades ferroviarias están enfocadas en el incremento de velocidad en las instalaciones de catenaria rígida para poder tener un mayor rendimiento y explotación de la vía. En base a lo anterior, diferentes compañías ferroviarias intentan satisfacer esta necesidad, entre otras, Furrer & Frey [10] ha probado su perfil de catenaria rígida a altas velocidades donde se alcanzó una velocidad máxima de 302 Km/h y de 250 Km/h. Desafortunadamente, los resultados y los datos medidos de estas pruebas no están disponibles públicamente ni se han incluido en el trabajo de investigación. A pesar de estas velocidades máximas alcanzadas en algunas instalaciones, la velocidad máxima de este sistema está muy por debajo de la velocidad máxima de la catenaria convencional.

Otro de los problemas que presentan este tipo de instalaciones, es el desgaste prematuro de los materiales en contacto durante la interacción entre el pantógrafo y catenaria. Además, las irregularidades del hilo de contacto y de los frotadores del pantógrafo, tienen una gran influencia y afectan negativamente a las fuerzas de contacto, por ello, algunos trabajos se centran en estudiar el desgaste de estos materiales. Wei et al [11] propusieron modelos que permitían calcular y predecir el desgaste en el hilo de contacto y los frotadores del pantógrafo. Los modelos contemplaban cuatro factores principales implicados en el desgaste de los materiales en contacto durante la interacción entre ambos sistemas: la fuerza de contacto, la velocidad, la intensidad de corriente y la temperatura. Estos factores fueron combinados entre sí para realizar un estudio de sensibilidad frente al desgaste. Por otro lado, analizaron datos reales de líneas de metro de China en los que contemplaban la velocidad e intensidad de los tramos analizados, el mantenimiento llevado a cabo en los últimos años y los metros de hilo de contacto reemplazados, las características geométricas que presentaban las vías, el desgaste real en los frotadores del pantógrafo, etc. Todos los datos anteriores fueron contrastados con los resultados obtenidos y convergían en la validación de la metodología presentada. Entre las conclusiones generales destacaron: el promedio de desgaste en el hilo de contacto era mucho más alto en las zonas donde se producía una aceleración del tren frente a velocidades constantes o a deceleraciones; el factor con mayor influencia en el desgaste observando los resultados fue la variación en la intensidad de corriente, coincidente con el punto anterior, el mayor consumo de potencia se producía en zonas de aceleración coincidiendo con un mayor desgaste en el hilo de contacto; en lo referente al desgaste en los frotadores del pantógrafo, consideraron importante tener en cuenta el diseño de la superestructura de la catenaria rígida y su zig-zag, ya que esto podía generar un desgaste no homogéneo en los frotadores. Los resultados ilustraban que largas distancias recorridas con altos intervalos de escalonamiento en el hilo de contacto generan desgastes no uniformes e indeseados. Finalmente, concluyeron que los modelos presentados eran fiables para calcular y predecir el desgaste de los materiales en contacto durante la interacción. Sin embargo, resaltan la complejidad del problema en estudio y la

necesidad de realizar más estudios en el futuro. También Guiming et al [12] describieron los principales problemas de desgastes prematuros de los materiales en contacto. Para su estudio, los autores se centraron en estudiar el rendimiento tribológico de la interacción mediante experimentos en el laboratorio simulando diferentes condiciones de trabajo. Los datos adquiridos durante los experimentos fueron: la fricción, desgaste, temperatura, vibración del pantógrafo, voltaje y corriente. El trabajo presentaba la sensibilidad de unas variables frente a otras. Finalmente, los autores concluyeron lo siguiente: el desgaste de los frotadores del pantógrafo era mayor cuando se aplicaba corriente, el rango de abrasión llegaba a ser casi 18 veces mayor comparado con un ensayo sin corriente; la vibración del pantógrafo podría afectar al desgaste del pantógrafo e hilo de contacto, se observaba la relación entre la fluctuación de las fuerzas de contacto y la fluctuación de la intensidad de corriente lo cual conducía a la aparición de arcos eléctricos, en este punto los autores defendían estudios futuros para determinar las causas de la vibración durante la interacción entre ambos sistemas; la temperatura del pantógrafo y la energía de las descargas de los arcos eléctricos crecían a medida que crecía la intensidad; finalmente, concluyeron que la mala unión entre dos partes del frotador del pantógrafo podría comportarse como un cuchillo y provocar hebras en el hilo de contacto.

Algunos trabajos presentados en los últimos años hacen referencia a la normativa que rige actualmente la simulación de la interacción entre pantógrafo y catenaria y mencionan la necesidad de revisarla, ya que están principalmente orientadas al estudio de la catenaria flexible. Por ello, Carnevale et al. [13] desarrollaron una metodología para identificar los defectos de la catenaria rígida. Para llevarla a cabo, realizaron simulaciones de una línea sana y defectuosa de catenaria para encontrar un índice significativo que permitiera una identificación robusta de los defectos. En el modelado del pantógrafo, a diferencias de otros artículos, tienen en cuenta los modos de flexión de los frotadores los cuales se encuentra por encima de 20 Hz, siendo este el límite superior que contempla la normativa actual EN 50317. Por ello, presentaron los resultados de las simulaciones llevadas a cabo a 160 km/h en una línea sana y otra defectuosa en dos rangos de frecuencia, entre 0-20 Hz y 0-150 Hz. Tras el análisis de resultados concluyeron que introducir los modos de flexión de los frotadores del pantógrafo en las simulaciones de la interacción entre pantógrafo y catenaria era esencial para identificar los defectos de la catenaria rígida, lo que implicaba ampliar el rango de frecuencia en el estudio de la interacción entre pantógrafo y catenaria rígida.

Otro de los aspectos mencionados a lo largo de la bibliografía es que la catenaria rígida tiene menores costes de instalación y mantenimiento. Para cuantificar lo anterior, Mak Man [14] presentó un estudio sobre la viabilidad de incorporar la catenaria rígida en 4 líneas nuevas de Hong Kong a través de un análisis cuantitativo de las ventajas de la catenaria rígida. Para ello, realizaron un estudio de la interacción entre un pantógrafo comúnmente usado en estas líneas y el perfil de catenaria rígida a 130 km/h. Analizando los resultados concluyeron lo siguiente: desde el punto de vista del mantenimiento la vida útil de catenaria rígida esperada es de 30 años frente a los 25 de la catenaria convencional; en lo referente a fiabilidad resaltaban el menor número de componentes que componen la catenaria rígida frente a la convencional y por tanto la disminución de la probabilidad de rotura, así como, una mayor resistencia al fuego de la catenaria rígida; otro aspecto que destacaban es el tiempo necesario para reemplazar la catenaria rígida, siendo más corto que la flexible. Respecto a los costes de instalación, manifestaban la necesidad de menor espacio para instalar catenaria rígida lo que reduce el diámetro necesario de la construcción del túnel. Por todo lo anterior, concluyeron en la viabilidad de incorporar la catenaria rígida a las cuatro nuevas extensiones de ferrocarril previstas en Hong Kong.

A pesar de todas estas investigaciones, se requieren más trabajos que ayuden a ampliar el conocimiento de este tipo de instalaciones. Es necesario seguir investigando para estandarizar este tipo de instalaciones y así darle más viabilidad y beneficiarnos de su potencial. Debemos mejorar la calidad de la captación de corriente durante la interacción para evitar desgastes prematuros de los materiales en contacto y poder incrementar la velocidad de operación. A pesar de los estos inconvenientes, los operadores ferroviarios muestran su confianza en este tipo de instalaciones y las compañías centran sus esfuerzos en satisfacer las necesidades de operatividad del sistema. Las perspectivas de futuro son esperanzadoras y se espera un gran crecimiento de instalaciones de catenaria rígida, principalmente en Europa y China. De todo lo anterior, surge la necesidad de seguir estudiando la catenaria rígida y su interacción con el pantógrafo.

3. OBJETIVO

Esta tesis se centra en ampliar el conocimiento acerca del comportamiento de la interacción entre pantógrafo y catenaria rígida. Este conocimiento permitirá aprovechar los beneficios intrínsecos de la catenaria rígida, ayudará a valorar la viabilidad de instalar dicho sistema, así como a mejorar la captación de corriente durante la interacción entre ambos sistemas para aumentar la velocidad de operación y reducir los desgastes prematuros de los materiales en futuros estudios. Todos estos aspectos permitirán mejorar la calidad de las instalaciones, reducir costes de instalación y mantenimiento y obtener mayores rendimientos de los materiales durante su funcionamiento. Para alcanzar este objetivo, se definieron tres objetivos secundarios:

- I. Desarrollo de una herramienta basada en algoritmos evolutivos para automatizar el proceso de validación de modelos matemáticos a partir de resultados de ensayos modales experimentales en túnel y laboratorio.
- II. Validación de modelos matemáticos de catenaria a partir de la caracterización dinámica con ensayos modales experimentales de un cantón de catenaria rígida realizados en una instalación real de la Red de Cercanías de Málaga en el túnel del Guadalhorce
- III. Estudio de la interacción entre pantógrafo – catenaria rígida, con pantógrafos seleccionados de bibliografía y contrastados por otros equipos de investigación y el modelo de catenaria rígida previamente validado

4. METODOLOGÍA GLOBAL

Como se ha comentado, el objetivo de este trabajo de tesis se centra en el estudio de la interacción entre pantógrafo y catenaria rígida. Para que la interacción entre ambos sistema sea adecuada a velocidades significativas será necesario que el pantógrafo y la catenaria se acoplen dinámicamente durante su funcionamiento. Para el estudio de la interacción es muy útil, e incluso necesario, disponer de modelos matemáticos validados de catenaria rígida y pantógrafo que permitan simular el comportamiento de la interacción para poder valorar un amplio rango de configuraciones típicas de este tipo de instalaciones. Los resultados de estas simulaciones permitirán abordar nuevas soluciones de diseño de ambos sistemas, mayor explotación de las líneas ferroviarias, reducción de costes de instalación y mantenimiento, etc.

A continuación se presenta en la Figura 3 un esquema de la metodología global en la que se pueden diferenciar las tres fases principales planteadas para alcanzar el objetivo. Cada una de ellas permitió abordar distintas etapas de este trabajo las cuales fueron convergieron en las distintas publicaciones. También se indica la relación entre los tres artículos publicados en este trabajo y la dependencia entre sí de cada una de las etapas con las etapas anteriores.

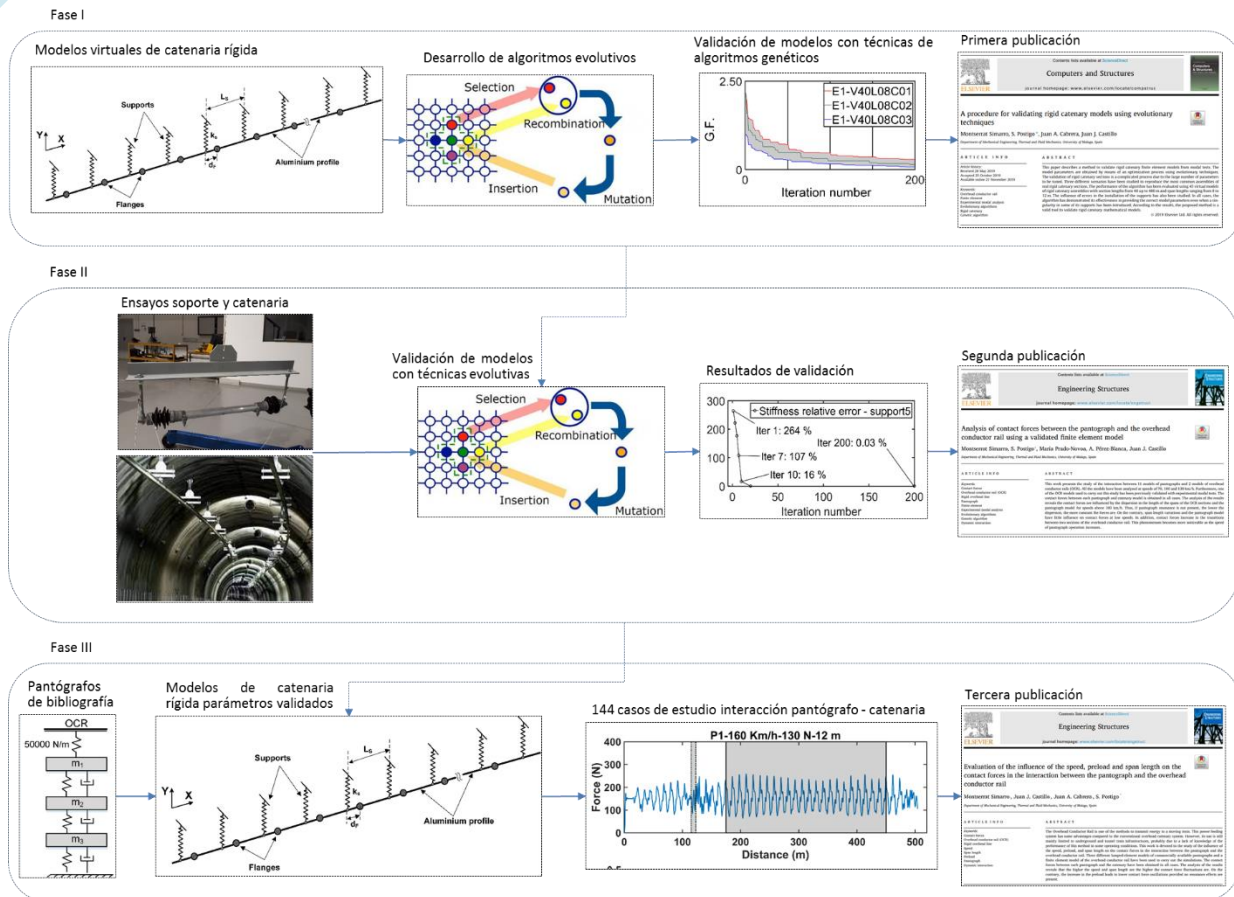


Figura 3: Esquema metodología global

De forma simplificada, la estructura de catenaria rígida está formada por perfiles de aluminio extruidos, que son unidos entre sí mediante bridas que dan continuidad a la estructura. El hilo de contacto, encargado de transmitir la energía, se fija (pinzando) a la parte inferior del perfil de aluminio quedando rígidamente unido. La parte superior del perfil está unida al techo de la instalación mediante soportes. Un conjunto continuo de perfiles unidos entre sí forman un cantón, que permiten la continuidad de la estructura de catenaria si se disponen uno tras otro uniéndose entre sí en las juntas de dilatación o seccionamientos. La Figura 4 a muestra un esquema de la instalación y la Figura 4 b muestra la sección del perfil de aluminio e hilo de contacto. Modelar este tipo de estructuras no es inmediato y requiere determinar muchos parámetros desconocidos a fin de poder implementarlas con técnicas de elementos finitos. De la catenaria rígida pueden ser medidos o estimados los aspectos principales de todos los componentes que forman la estructura, sin embargo, la rigidez que presentan los soportes es difícil de definir, pues depende de muchos factores: el tipo de soporte, la posición de la unión con el perfil, la altura al techo de la instalación, etc.

Para la validación de un modelo completo de catenaria rígida es necesario determinar la rigidez de cada uno de los soportes. La validación de modelos de catenaria rígida de forma manual es muy complicada, debido a la magnitud del problema y al gran número de variables desconocidas (rigidez de cada soporte). Para abordar este escenario complejo se valoró la opción de emplear técnicas evolutivas con algoritmos genéticos, que son herramientas con mucho potencial en las que se aplican los principios naturales de evolución para resolver problemas de optimización complejos. El objetivo del algoritmo genético fue, por tanto, proporcionar los valores adecuados de rigidez de los soportes para alcanzar la validación del modelo de catenaria rígida.

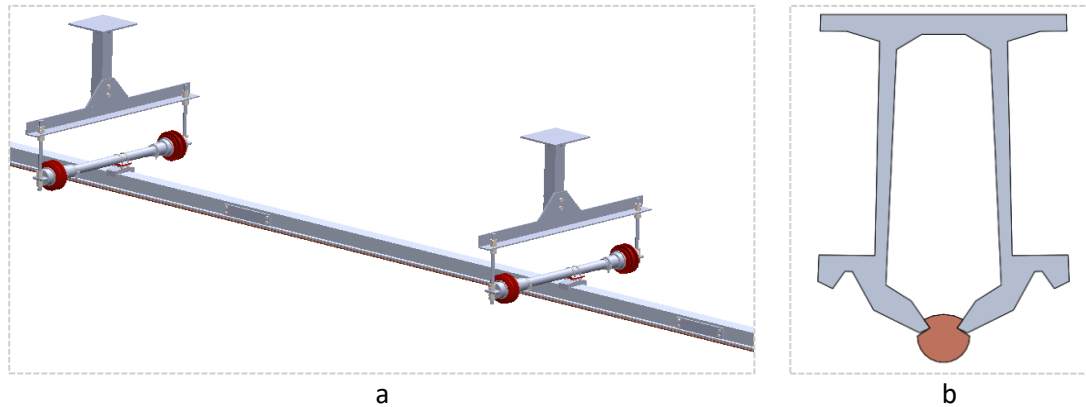


Figura 4: a) Esquema instalación catenaria rígida b) Sección perfil de aluminio e hilo de contacto

Tras confirmar el uso de algoritmos genéticos para la adecuada validación de modelos de elementos finitos de cantones de catenaria a partir de ensayos, se abordó la validación de un modelo de elementos finitos de catenaria rígida de un cantón de catenaria instalado en un túnel de la red de cercanías de Málaga en el tramo del Guadalhorce. Gracias a la colaboración de Adif, que permitió el acceso a túnel y la toma de datos en la instalación, se obtuvo el comportamiento dinámico del cantón de catenaria rígida a partir de ensayos modales experimentales. Tras los resultados obtenidos de los ensayos se procedió a la correlación entre el modelo matemático de catenaria rígida y la estructura real minimizando los errores cometidos en las frecuencias y modos de vibración propios del sistema analizado.

En lo referente al pantógrafo, decir que existe una gran variedad de pantógrafos en el mercado. Muchos de estos modelos de pantógrafo han sido estudiados y modelados por otros equipos de investigación de referencia y se encuentran publicados en la bibliografía. Una de las técnicas empleadas para describir estos pantógrafos es mediante modelos de masas concentradas que permiten describir el comportamiento dinámico real del pantógrafo. Estos modelos son usados para reproducir el movimiento vertical del pantógrafo y hacen posible el estudio de la interacción con la catenaria.

Tras obtener ambos sistemas modelados correctamente, se procedió a la simulación de la interacción entre diferentes modelos de pantógrafos seleccionados de bibliografía y el modelo de catenaria validado. Se contemplaron diferentes escenarios donde se variaba la velocidad con la que operaban los pantógrafos elegidos bajo la catenaria. Todas las configuraciones analizadas permitieron ampliar el conocimiento sobre el comportamiento de la interacción entre pantógrafo y catenaria rígida.

Tras la experiencia adquirida a lo largo de las etapas anteriores acerca del modelado de catenaria rígida e interacción, se decidió ampliar el estudio anterior con un gran número de configuraciones equivalentes a instalaciones típicas de este tipo de superestructuras. Además, se contemplaron más detalles de estas instalaciones los cuales permanecieron constantes en los estudios previos con el fin de analizar su influencia en el comportamiento de la interacción. Se examinó la influencia de la precarga aplicada en el pantógrafo, se amplió el rango de velocidad de los pantógrafos operando bajo la catenaria y se contemplaron diferentes longitudes de vanos de la superestructura de catenaria rígida comúnmente utilizados en instalaciones reales. De nuevo, los resultados obtenidos de los casos analizados permitieron extender el conocimiento acerca del funcionamiento de este tipo de instalaciones vislumbrando el camino hacia la mejora de ambos sistemas para paliar sus inconvenientes y resaltar sus aptitudes.

5. JUSTIFICACIÓN DE LA UNIDAD TEMÁTICA

Para alcanzar el objetivo planteado de la presente tesis se estableció la metodología anteriormente expuesta en la que se pueden diferenciar tres fases principales. Cada una de ellas permitió abordar distintas etapas de este trabajo las cuales convergieron en el estudio del comportamiento de la interacción entre pantógrafo y catenaria rígida. A continuación se describen brevemente cada una de las tres fases:

La primera de ellas consistió en obtener una herramienta basada en algoritmos genéticos evolutivos para automatizar el procedimiento de validación de modelos matemáticos a partir de resultados experimentales. Se particularizó en la validación de modelos basados en métodos de elementos finitos de catenaria rígida a partir de los resultados obtenidos de ensayos modales experimentales virtuales. La función del algoritmo era encontrar los valores de rigidez de los soportes de la superestructura de catenaria rígida, que eran desconocidos hasta el momento. Este trabajo formó parte de la primera publicación presentada para compendiar esta tesis. Además, la metodología expuesta, se empleó para la validación de una tipología de soporte de la catenaria rígida. Este trabajo formaba parte de un proyecto en paralelo a esta tesina realizado con Adif, el cual se presentó en un congreso de “Innovación Ferroviaria”.

➤ Primera publicación

Simarro Montserrat, Postigo S, Cabrera Juan A, Castillo Juan J. A procedure for validating rigid catenary models using evolutionary techniques. *Comput Struct* 228; 2020: 106145, ISSN 0045-7949, <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2019.106145>.

➤ Primer congreso

Simarro M, Postigo S, Torrealba D, Almenara L.F, Ania M, Simón A. (19-21 Octubre 2016). Soporte de catenaria rígida del túnel Sol-Nuevos Ministerios: modelado con elementos finitos y actualización con ensayos modales experimentales. Congreso Innovación ferroviaria, Valencia, España.

Con la ayuda del algoritmo implementado en el primer artículo se procedió a la validación de un modelo de elementos finitos de catenaria rígida a partir de los resultados obtenidos de ensayos modales experimentales realizados en la instalación de la Red de Cercanías de Málaga en el túnel del Guadalhorce. Estos ensayos permitieron obtener el comportamiento dinámico de la estructura y replicarlo en el modelo. Las validaciones previas del cantón de catenaria rígida se publicaron en un congreso de “Ingeniería Mecánica”. Además del estudio anterior, se procedió al análisis del comportamiento de la interacción pantógrafo-catenaria entre una amplia gama de pantógrafos obtenidos de bibliografía, contrastados por equipos de investigación de referencia. Todos los resultados de los casos de interacción analizados fueron expuestos en la segunda publicación de esta tesis.

➤ Segunda publicación

Simarro Montserrat, Postigo S, Prado-Novoa Maria, Pérez-Blanca A, Castillo Juan J. Analysis of contact forces between the pantograph and the overhead conductor rail using a validated finite element model, *Eng Struct*, Volume 225, 2020, 111265, ISSN 0141-0296, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111265>.

➤ Segundo congreso

Simarro M, Postigo S, Almenara L.F, Ania M, Simón A. (23-26 Octubre 2017). Modelado con elementos finitos y actualización con ensayos modales experimentales de un cantón de catenaria rígida. 13º Congreso Ibero-americano de Ingeniería Mecánica, Lisboa, Portugal.

Tras haber adquirido la experiencia de modelar las superestructuras de catenaria rígida y contrastar los resultados con otros equipos de investigación y administraciones ferroviarias, se propuso un estudio de la interacción entre pantógrafo y catenaria rígida que contemplaba un mayor número de configuraciones típicas de instalaciones reales. También se contemplaron más factores presentes en la interacción para analizar su influencia en su comportamiento. Los resultados de esta investigación formaron parte de la tercera publicación de esta tesis.

➤ Tercera publicación

Simarro Montserrat, Castillo Juan J, Cabrera Juan A, Postigo S. Evaluation of the influence of the speed, preload and span length on the contact forces in the interaction between the pantograph and the overhead conductor rail, Eng Struct, Volume 243, 2021, 112678, ISSN 0141-0296, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112678>.

6. RESUMEN GLOBAL DE RESULTADOS

Para desarrollar el algoritmo genético basado en técnicas evolutivas y obtener así una herramienta que permitiera automatizar y optimizar el procedimiento de validación de modelos matemáticos de catenaria rígida a partir de resultados de ensayos modales, se plantearon 45 escenarios equivalentes a instalaciones reales de catenaria rígida, cuya longitud total cubría el rango entre 48 y 480 metros y contemplaba diferente longitudes de vanos comprendidas entre 8 y 12 metros. Se consideró también la influencia de los posibles errores producidos durante la instalación y se contemplaron casos singulares o particularidades de algunos de los soportes. El objetivo del algoritmo genético era proporcionar los parámetros correctos del modelo de catenaria rígida, para ello evaluaba una función objetivo basada en minimizar los errores cometidos entre el modelo y la realidad en lo referente a su comportamiento dinámico. En todos los casos el algoritmo demostró su eficacia a la hora de proporcionar los parámetros del modelo. Todos los casos evaluados mostraron errores finales de la función objetivo por debajo del 0.5% después de 200 iteraciones. De acuerdo con el análisis de resultados, la herramienta fue considerada válida para la validación de modelos matemáticos de catenaria rígida.

Con la ayuda del algoritmo obtenido en la etapa anterior, se procedió a validar un cantón de catenaria rígida real mediante ensayos modales realizados en el laboratorio de la UMA (*Universidad de Málaga*) y ensayos realizados en un tramo de túnel de la red de cercanías de Málaga. Para llevar a cabo el ensayo modal en túnel la técnica de excitación empleada fue mediante martillo de impacto, recogiendo la respuesta del sistema a través de 49 puntos de medida distribuidos a lo largo de la sección, cada 2 ó 3 vanos, midiendo en el soporte y a 2 metros del mismo. Gracias a los datos obtenidos de las medidas tomadas en túnel fue posible la validación del modelo. Los resultados permitieron obtener el comportamiento dinámico del cantón cubriendo un rango de frecuencia entre 0 y 10 Hz. Los errores cometidos entre el modelo de elementos finitos de catenaria rígida y el comportamiento dinámico real obtenido a través de las pruebas modales experimentales del tramo de catenaria fueron por debajo del 2% en las frecuencias naturales y por encima del 92 % en la correlación de las deformadas modales propias del sistema analizado. Estos resultados avalaban que el comportamiento dinámico del modelo de catenaria rígida era equivalente al comportamiento medido en la realidad.

Tras la validación del modelo de catenaria rígida de un cantón completo se procedió al estudio de la interacción entre pantógrafo y catenaria. Los modelos de pantógrafos utilizados fueron extraídos de la bibliografía. Se realizó una selección amplia de pantógrafos con el objetivo de estudiar su influencia en la excitación de la catenaria y las fuerzas de contacto que se generan en la interacción entre ambos sistemas. El objetivo era estudiar la interacción de diferentes pantógrafos contrastados por otros equipos de investigación con el modelo de catenaria previamente validado. Se presentaron un total de 66 casos de simulación, obtenidos de analizar

la interacción entre 11 pantógrafos con dos modelos de cantón de catenaria a 3 velocidades de operación diferentes: baja, media y moderadamente alta, 70, 100 y 130 Km/h. Los dos modelos de cantón se definieron como modelo real e ideal, siendo el primero validado en etapas anteriores el cual presentaba unas longitudes de vano heterogéneas debido a defectos ocasionados durante la instalación; el segundo una réplica del anterior con longitudes de vano constantes a modo de cantón de referencia idealmente instalado. En todos los casos se obtuvieron las fuerzas de contacto, considerada como la magnitud más representativa de este tipo de simulaciones. El análisis de resultados reveló que las fuerzas de contacto estaban influenciadas por los defectos de montaje a velocidades del pantógrafo superiores a 100 km/h. Así, si la resonancia del pantógrafo no está presente, cuanto menor sea la dispersión de la longitud de vanos, más constantes serán las fuerzas de contacto que se producen durante la interacción entre ambos sistemas. A bajas velocidades la longitud de los vanos y los modelos de pantógrafo tenían poca influencia sobre las fuerzas de contacto. Además, las fuerzas de contacto aumentaban en el seccionamiento de la catenaria. Este fenómeno se volvía más notorio a medida que aumentaba la velocidad de funcionamiento del pantógrafo. También fue posible realizar una comparativa entre todos los modelos de pantógrafos y vislumbrar el camino para una mejor interacción entre ambos sistemas.

De los 11 pantógrafos analizados en el segundo artículo se seleccionaron 3 para un estudio en mayor profundidad en el tercer artículo. Estos 3 pantógrafos despertaron el interés de los investigadores por diferentes motivos: su comportamiento en las simulaciones del segundo artículo, su extensa aplicación en infraestructuras reales, su comportamiento dinámico, etc. El trabajo se centró en evaluar la influencia de la velocidad y precarga aplicada en el pantógrafo y las diferentes longitudes de vano de la catenaria rígida en la fuerza de contacto ejercida entre ambos sistemas durante la interacción. Se llevaron a cabo un total de 144 simulaciones, resultado de la combinación de 3 modelos de pantógrafos a 4 velocidades, 4 condiciones de precarga y 3 modelos de catenaria rígida. El rango de velocidad cubría desde baja a moderadamente alta velocidad de operación: 70, 100, 130 y 160 km/h. De las 4 precargas, 2 eran recomendadas por la normativa: 70 y 90 N y 2 por encima de las anteriores: 110 y 130 N. Los modelos de catenaria rígida, consideraban diferentes longitudes de vano: 8, 10 y 12 m, los cuales eran los más representativos de las infraestructuras reales. Para todos los casos se calcularon las fuerzas de contacto, fuerzas máximas y mínimas, la media y la desviación estándar. La casuística planteada permitió establecer la influencia entre unas variables y otras y extraer conclusiones que ayudaban a entender el comportamiento de estas instalaciones. El análisis de resultados reveló que cuanto mayor es la velocidad y la longitud de vano, mayores son las fluctuaciones de la fuerza de contacto. Por el contrario el aumento de la precarga conduce a menores oscilaciones de la fuerza de contacto siempre que no estén presentes efectos de resonancia.

Las técnicas y metodología empleadas a lo largo de esta tesis para la caracterización de la superestructura de catenaria rígida y su interacción con el pantógrafo han permitido obtener resultados de alta fiabilidad. Los resultados han permitido extender el conocimiento en un amplio rango de configuraciones de este tipo de instalaciones y su funcionamiento. Estos resultados han sido contrastados con las entidades ferroviarias y son coincidentes con los principales problemas expuestos a lo largo de los últimos años. Finalmente, tras analizar el comportamiento de la catenaria rígida y su interacción con el pantógrafo será posible abordar líneas futuras que converjan en la mejora de la calidad de las instalaciones y su funcionamiento.

7. EXPOSICIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

7.1. ARTÍCULO I: “A PROCEDURE FOR VALIDATING RIGID CATENARY MODELS USING EVOLUTIONARY TECHNIQUES”

7.1.1. INTRODUCCION

Como se ha comentado a lo largo de esta memoria, los motores eléctricos que permiten el movimiento del tren son alimentados mediante la energía eléctrica captada durante la interacción entre pantógrafo y catenaria. Actualmente, hay pocos grupos de investigación analizando la catenaria rígida en comparación con los numerosos estudios encontrados en bibliografía de la catenaria convencional. Muchos de los problemas de la catenaria rígida aún no han sido estudiados, ya que muchas instalaciones muestran un inadecuado funcionamiento de la interacción entre pantógrafo y catenaria rígida, lo cual afecta a las fuerzas de contacto causando efectos negativos en la captación de corriente.

Fuerzas de contacto bajas están relacionadas con la aparición de arcos eléctricos y fusiones locales, debido a la pérdida de contacto entre ambos sistemas. En consecuencia, se producen pérdidas de material y mayor rugosidad en los materiales lo cual incrementa la fricción entre el hilo de contacto y los frotadores de pantógrafo. Por el contrario, fuerzas de contacto altas incrementan el desgaste de los materiales debido a una mayor fricción entre ambos sistemas. Por lo que ambos fenómenos son indeseados ya que causan excesivos y heterogéneos desgastes en el hilo de contacto y en los frotadores del pantógrafo. Surge la necesidad de conocer el comportamiento de la interacción entre ambos sistemas con el objetivo de mitigar los problemas mencionados. Para ello, es necesario disponer de modelos matemáticos de catenaria rígida, modelos de pantógrafo y modelos de interacción validados que permitan obtener el comportamiento de la interacción con resultados fiables y precisos.

El análisis modal experimental es una técnica ampliamente usada para la validación de modelos matemáticos. Esta es una técnica empleada en muchos sectores de la ingeniería para caracterizar el comportamiento dinámico de estructuras a través de sus frecuencias naturales, modos de vibración y amortiguamientos. En general, los resultados de este análisis modal permiten comprender cómo se comportan las estructuras bajo la acción de fuerzas dinámicas, comprobar el estado de las estructuras después de sufrir daños, ayudar en las diferentes etapas del diseño y la optimización del comportamiento dinámico de los sistemas, así como validar modelos dinámicos con precisión. El ensayo consiste en introducir una excitación dinámica a un sistema y medir su respuesta en diferentes puntos distribuidos estratégicamente por la estructura en estudio. A partir de ellos se obtienen los parámetros modales dinámicos que describen el sistema.

Para el modelado se emplea el método de los elementos finitos. Es un método numérico ampliamente usado, que permite resolver un problema ingenieril con geometrías complicadas. Está pensado para ser usado con computadoras, llevando a cabo la resolución de problemas en un menor tiempo y de forma más eficiente. De forma general, es un método de aproximación de problemas continuos, donde el continuo se divide en un número finito de elementos, permitiendo así la solución de ecuaciones diferenciales parciales complejas.

Un modelo matemático está correctamente validado cuando sus distribuciones de masa, rigidez y amortiguamiento de todos los elementos que intervienen son conocidas. De la catenaria rígida pueden ser medidos o estimados los aspectos principales de todos los componentes que forman la estructura, sin embargo, la rigidez que presentan los soportes es difícil de definir, pues depende de muchos factores: el tipo de soporte, la posición de la unión con el perfil, la altura al techo de la instalación, etc. Para la validación de un modelo de catenaria rígida es necesario

determinar la rigidez de cada uno de los soportes e introducir su valor en el modelo. Esta tarea compleja puede ser llevada a cabo en campo, con los soportes ya instalados o en el laboratorio. El procedimiento de validación de modelos matemáticos consiste en minimizar errores entre el modelo y la realidad desde un punto de vista dinámico evaluando para ello las frecuencias naturales y modos de vibración propios del sistema.

En general, el procedimiento para la validación de modelos matemáticos puede ser iterativo, costoso y complejo. En particular, la validación de modelos de catenaria rígida de forma manual es muy complicado, debido a la magnitud del problema y al gran número de variables desconocidas (rigidez de cada soporte). Para abordar este escenario complejo se valoró la opción de emplear técnicas evolutivas con algoritmos genéticos. Los algoritmos evolutivos son herramientas con mucho potencial en los que se aplican los principios naturales de evolución para resolver problemas de optimización complejos. Sus principales ventajas son el bajo coste computacional y la fácil implementación del algoritmo en el cual no es necesario conocer las características físicas de los soportes para la estimación de la rigidez.

7.1.2. OBJETIVO

Este trabajo estudia la viabilidad del uso de algoritmos evolutivos para la validación de modelos de catenaria rígida a partir de resultados modales experimentales. La función del algoritmo es proporcionar la rigidez de los soportes del modelo de catenaria rígida y minimizar los errores entre el modelo y la realidad para obtener un modelo validado. La implementación del algoritmo permite que la validación sea menos costosa y viable. Los modelos validados podrán ser usados en estudios futuros de la interacción entre pantógrafo y catenaria con un alto grado de realismo y baja incertidumbre. Además, permitirán ampliar el conocimiento de este tipo de instalaciones.

7.1.3. METODOLOGIA

La metodología general propuesta en este trabajo se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 5. El objetivo del algoritmo genético era estimar las variables de rigidez de los soportes del modelo de catenaria rígida. Para hacer esto, el algoritmo evaluaba una función objetivo de forma iterativa. La función objetivo minimizaba el error entre el modelo propuesto por el algoritmo (*modelo candidato*) y la realidad desde un punto de vista dinámico evaluando para ello las frecuencias naturales y modos de vibración propios de la estructura. Para validar la metodología era necesario presentar un rango amplio de estructuras de catenarias rígidas reales caracterizadas dinámicamente a través de ensayos modales experimentales. Debido a la dificultad de realizar este tipo de ensayos en instalaciones ferroviarias reales fue necesario recurrir a lo que se denominó ‘ensayos virtuales’, simulando los datos que se podrían haber adquirido si hubiera sido posible estudiar estructuras reales de catenaria rígida. Una vez validada la metodología propuesta, los ‘ensayos virtuales’ serán reemplazados por ensayos reales en futuras etapas.

El algoritmo fue implementado con la ayuda de Matlab® y todos los cálculos de modelos de elementos finitos se realizaron en Ansys®. La Figura 5, extraída del artículo, muestra un diagrama de flujo de las 5 etapas descritas a continuación y la interacción entre las mismas.

- En la primera etapa (*step 1*) se creó un modelo experimental (*Mod_exp*) de elementos finitos de un cantón de catenaria rígida simulando a una estructura real de cantón de catenaria rígida. En este modelo la rigidez de los soportes era conocida. A través de un análisis modal se obtuvieron sus frecuencias naturales y modos de vibración (f_n & ψ *respectivamente*) simulando los datos adquiridos de la realidad.
- En la segunda etapa (*step 2*) se creó la población inicial. Estaba compuesta por vectores aleatorios denominados individuos, donde cada vector representaba la rigidez de todos los soportes de un cantón. A cada valor de rigidez de un soporte se le denominó gen.

- En la tercera etapa (*step 3*) se generaron los modelos candidatos (*Mod_cand*). El algoritmo generaba cada modelo candidato asociándole un valor de rigidez a cada soporte. Mediante un análisis modal se obtuvieron las frecuencias naturales y modos de vibración de cada modelo candidato propuesto por el algoritmo.
- En la cuarta etapa (*step 4*) se evaluó la similitud entre el modelo experimental generado en la primera etapa con cada uno de los modelos candidatos generados en la tercera etapa. Para ello se definió una función objetivo (*G.F*), la cual evaluaba el error cometido en las frecuencias naturales y modos de vibración entre ambos modelos. El modelo candidato cuya función objetivo presentaba menor error sería la mejor solución para esta iteración.
- En la quinta etapa (*step 5*), se creó una nueva población aplicando técnicas evolutivas. Las técnicas evolutivas empleadas en el algoritmo estaban basadas en técnicas de reproducción que hacían posible crear una nueva población generando nuevos individuos en dos etapas. En la primera de ellas, cada individuo estaba generado a partir del mejor individuo de la etapa anterior y de dos individuos más seleccionados aleatoriamente. La segunda etapa de reproducción era generada mediante la combinación de genes del individuo creado en la etapa anterior y su individuo equivalente de la población potencial. Una vez creada la nueva población se retornaba a la tercera etapa y se volvía a repetir el proceso. El proceso se repitió hasta alcanzar el máximo de iteraciones preestablecido. El mejor modelo candidato de la última población sería la solución propuesta por el algoritmo a ser el modelo matemático validado para este problema.

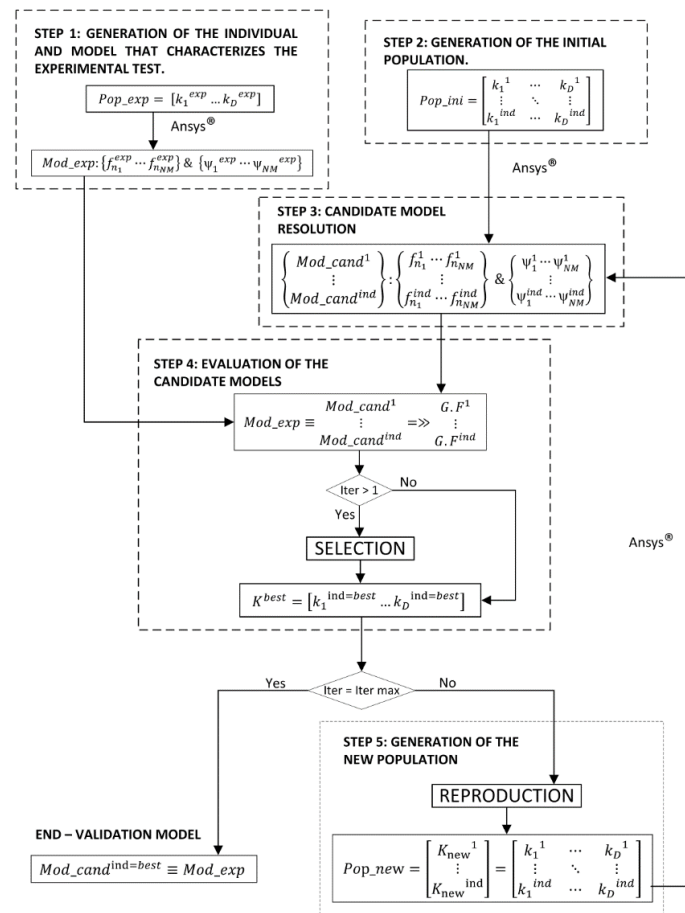


Figura 5: "Global methodology for study of the validity of the genetic algorithm" (Metodología global para el estudio de validación del algoritmo genético)

Finalmente, para determinar si el procedimiento basado en técnicas de evolución era adecuado para la validación de modelos matemáticos de catenaria rígida, se definió una casuística que contemplaba tres escenarios principales.

- El primer escenario examinó casos representativos de las instalaciones reales de catenaria rígida comúnmente empleadas por la administración, con tres secciones diferentes: 6, 20 y 40 vanos y con tres longitudes de vanos frecuentemente usadas: 8, 10 y 12 m. La combinación anterior implicó cantones con un rango de longitud de 48 a 480 m. Se contemplaron los errores de montaje de la instalación (+/- 2% de la longitud de vano) y se estimó una rigidez de soporte representativa alrededor de 400 KN/m. El espacio inicial de búsqueda del algoritmo se definió entre 350 y 450 KN/m.
- En el segundo escenario, se consideró que no era conveniente definir el espacio inicial de búsqueda tan acotado como en el escenario uno, por lo que se extendió el rango de 0 a 600 KN/m, considerando así la diferente configuración y tipología de los soportes. Este escenario contemplaba 20 vanos con las mismas longitudes de vanos y rango de rigidez de los soportes usadas en el escenario 1.
- El tercer escenario simulaba las posibles irregularidades que se podían presentar en la instalación, así como la posibilidad de que alguno de los soportes no estuviera correctamente instalado, estuviese dañado o fuese de un tipología diferente. Para reproducir esto, en cada caso se eligió un soporte al azar y se definió su rigidez en 100 KN/m. El resto de rigideces se corresponde con el mismo rango que el escenario 1, así como las longitudes de vano consideradas y el espacio de búsqueda inicial definido.

7.1.4. RESUMEN DE RESULTADOS

Se analizaron 45 casos de cantones virtuales de catenaria rígida, donde se contemplaban: diferentes números de vanos, distintas longitudes de vanos, soportes rígidos, soportes con rigideces atípicas, defectos de montaje de la instalación, etc. En todos los casos planteados, el algoritmo mostró convergencia, incluso en aquellos casos donde se definió un espacio de búsqueda inicial de rigideces amplio suponiendo un desconocimiento de las mismas (escenario 2) y donde se contemplaban irregularidades de la instalación (escenario 3). Todos los casos evaluados mostraron errores finales de la función objetivo por debajo del 0.5% después de 200 iteraciones. A continuación la figura 6, extraída del artículo, muestra la convergencia de la función objetivo para el escenario 2, donde se pudo observar que no era necesario conocer el orden de magnitud de las rigideces de los soportes para determinar el valor de las mismas, aunque el error inicial de la función objetivo era mayor y el algoritmo necesitaba mayor número de iteraciones para encontrar el valor de rigidez. La nomenclatura usada fue: $E_s-V_{xx}L_{yy}C_{zz}$, donde s representa el número de escenario, xx el número de vanos, yy la longitud de vano y zz el número de caso. De igual modo se muestra en la figura 7, extraída del artículo, la evolución de la función objetivo y su convergencia para los casos del escenario 3, donde se pudo observar la eficacia del algoritmo para encontrar el valor de la rigidez del soporte claramente fuera del rango típico de rigidez del resto de soportes.

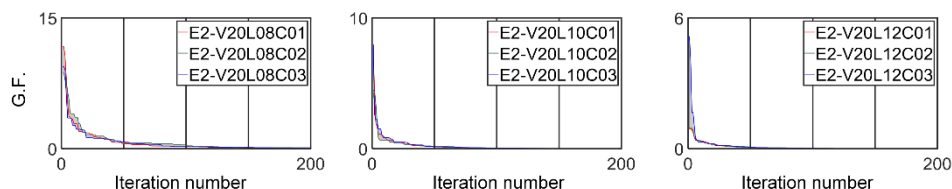


Figura 6: "Goal function evolution in the case of scenario 2" (Evolución de la función objetivo para los casos del escenario 2)

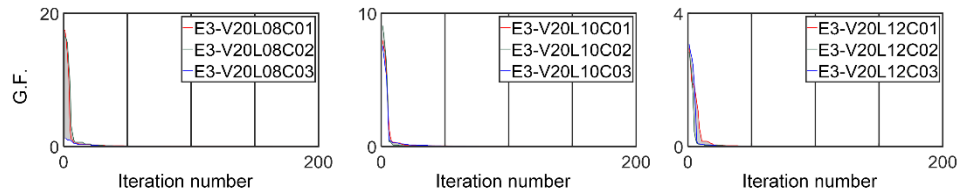


Figura 7: "Goal function evolution in the case of scenario 3" (Evolución de la función objetivo para los casos del escenario 3)

Los casos analizados para todos los escenarios presentaron un mayor error inicial cuanto menor era la longitud de vano, esto se debe a que a menor longitud de vano la influencia de la rigidez de los soportes sobre la estructura global es mayor, siendo su contribución menor en la deformación modal, lo que ralentizó el proceso de validación. En la Figura 8, extraída del artículo, se presentó la convergencia de la función objetivo de todos los casos del primer escenario donde se contemplaron diferentes secciones y diferentes longitudes de vano. Pudo observarse como la longitud de vano afectó a los valores iniciales de la función objetivo siendo mayores a menor longitud de vano.

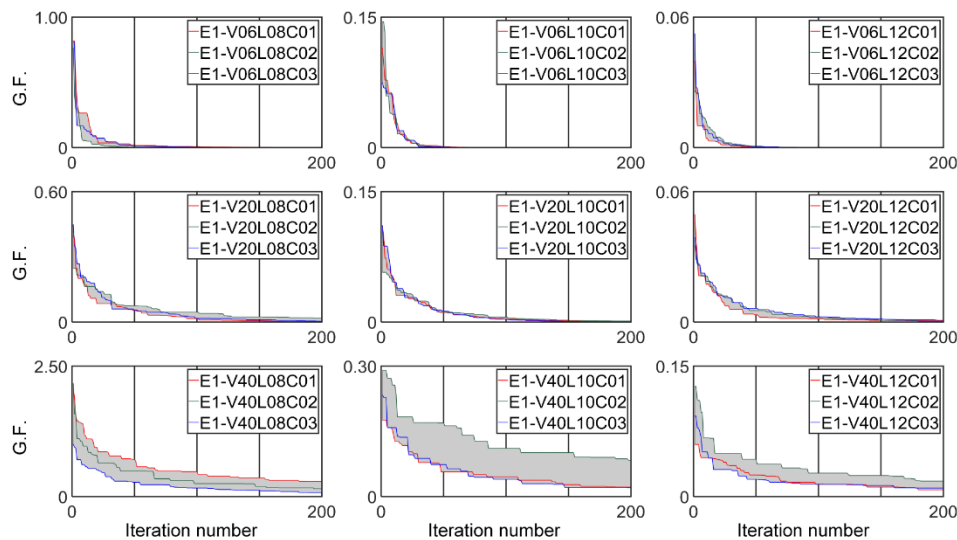


Figura 8: "Goal function evolution in the cases of scenario 1" (Evolución de la función objetivo para los casos del escenario 1)

Se observó como el espacio de búsqueda afectó a la convergencia del algoritmo. El escenario 1 presentó un valor de la función objetivo por debajo del 1% en la primera iteración, sin embargo, el escenario 2 no logró estos valores hasta la iteración 50. El escenario 3, no logró valores por debajo del 1% hasta la iteración 20. Por lo que, el método mostró una convergencia más rápida cuando se dispuso de un espacio de búsqueda inicial bien definido y sin defectos en la instalación.

En todos los casos analizados, después de 200 iteraciones, el error en frecuencia estaba por debajo del 0.01% y presentaban un MAC de 100% en todos los modos de vibración del cantón. La Figura 9, extraída del artículo, muestra la convergencia de la deformada modal formada por todos los puntos de medida distribuidos en el cantón para el caso particular E3- V20L12C01 (rojo) frente a su modo equivalente del "modelo experimental" (negro) a lo largo de las iteraciones del algoritmo. En cada iteración ploteada se indican la evolución del valor de MAC y el valor de la función objetivo (GF). Las dos últimas gráficas presentan la evolución del error relativo en rigidez del soporte 5 y la evolución del error en MAC. Para este mismo caso, se muestra en la Figura 10, extraída del artículo, la evolución y convergencia de la rigidez del

soporte 5, así como, la rigidez de los soportes 1, 10, 15 y 21 a lo largo de las iteraciones a modo comparativo. El soporte 5 presentaba una rigidez 75% menor que el resto. Las líneas discontinuas representan el valor real objetivo de la rigidez del soporte.

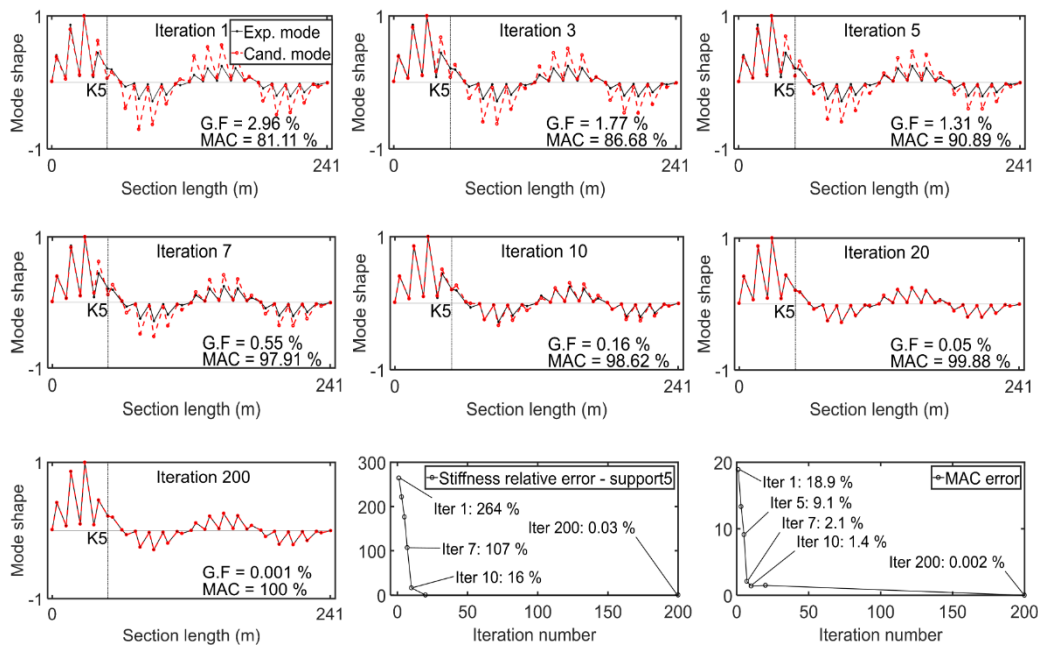


Figura 9: "Candidate and experimental mode shapes, goal function, MAC and relative error evolution of the flexible support stiffness (support 5) for case E3-V20L12C01." (Candidato y experimental modo de vibración, función objetivo, evolución del error MAC y de la rigidez del soporte (soporte5) para el caso E3-V20L12C01)

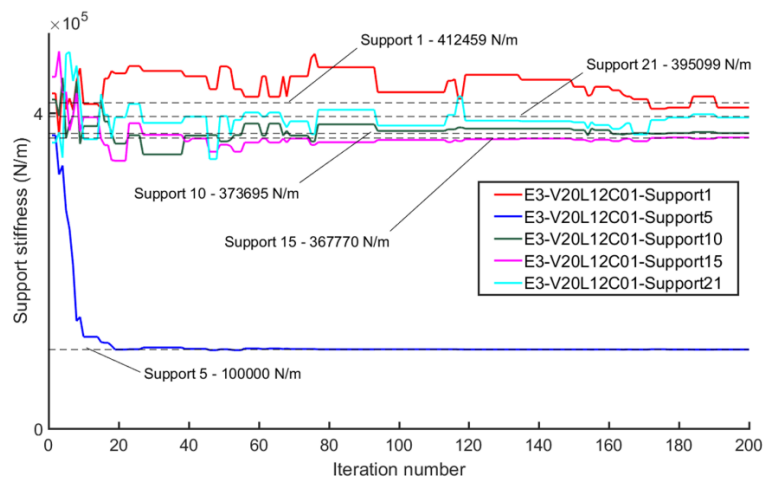


Figura 10: "Support stiffness evolution for case E3-V20L12C01." (Evolución de la rigidez del soporte para el caso E3-V20L12C01)

7.1.5. DISCUSIÓN

El procedimiento presentado en este trabajo, para la validación de modelos matemáticos de catenaria rígida utilizando algoritmos evolutivos, cumple con su objetivo. El algoritmo proporcionaba valores adecuados de rigidez de los soportes para alcanzar la validación en cada modelo de catenaria rígida estudiado. Los ensayos modales virtuales, permitieron obtener resultados del comportamiento de estructuras de catenaria equivalentes a la realidad. Con los resultados obtenidos de los ensayos fue posible obtener la validación de todos los modelos de catenaria rígida presentados en la casuística, mediante la comparativa del modelo propuesto por el algoritmo y el modelo experimental en cuestión. Sin embargo, lo ensayos modales

virtuales, deben ser reemplazados por ensayos modales en estructuras reales en futura etapas, con el fin de contemplar todos los aspectos de la estructura real.

Los resultados obtenidos de los ensayos modales virtuales, los cuales describían el comportamiento dinámico de la estructura de catenaria rígida mediante sus frecuencias naturales y modos de vibración, no contemplaban los efectos del ruido presente en los equipos de medida utilizados para realizar este tipo de ensayos. Por lo que, se considera necesario estudiar la influencia de estos errores de medida en los datos adquiridos y su efecto en la metodología presentada cuando se realicen ensayos modales en estructuras reales.

En la metodología presentada, el ensayo modal virtual contaba con puntos de medida en todos los vanos y soportes del cantón de catenaria rígida, por lo que, será necesario que el ensayo modal realizado en una estructura real, cuente con suficientes puntos de medida distribuidos a lo largo de la catenaria, que permita obtener información suficiente del comportamiento dinámico de la estructura, para ayudar al algoritmo en su búsqueda de variables de rigidez. Por el contrario, para optimizar los tiempos de ensayos y reducir los puntos de medida se cree necesario recurrir a computadores que hagan viable el coste computacional.

Según el conocimiento de los investigadores, esta técnica no había sido empleada previamente para la resolución de optimización de modelos matemáticos de cantones de catenaria rígida. Por lo que se considera una metodología novedosa en este campo y una herramienta útil de validación de modelos matemáticos a partir de ensayos modales.

Para aplicar la metodología descrita en este trabajo en la validación de modelos matemáticos de otro tipo de sistemas, será necesario actualizar la función objetivo y contemplar la similitud entre deformadas modales para diferentes frecuencias. Situación que no ocurre en las estructuras de catenaria rígida analizadas y que puede estar presente en otra tipología de estructura o mecanismo. En particular, se ha detectado este comportamiento en estudios recientes de un pantógrafo.

7.2. ARTÍCULO II: “ANALYSIS OF CONTACT FORCES BETWEEN THE PANTOGRAPH AND THE OVERHEAD CONDUCTOR RAIL USING A VALIDATED FINITE ELEMENT MODEL”

7.2.1. INTRODUCCION

El sistema de catenaria rígida, que generalmente se instala en túneles o áreas suburbanas, es comúnmente usado en la transmisión de potencia a los motores eléctricos del tren, a través de su interacción con el pantógrafo. Esta superestructura presenta numerosas ventajas frente al sistema convencional de catenaria. Entre las que destacan la seguridad de funcionamiento, ya que en la catenaria rígida se evitan situaciones de riesgo por rotura del hilo de contacto. Por el contrario, los inconvenientes que presentan este tipo de instalaciones, están relacionados con la limitación de la velocidad de paso del tren, ya que es necesario reducir la velocidad en tramos donde está instalada la catenaria rígida para garantizar una buena interacción entre pantógrafo y catenaria que permita una adecuada transmisión de potencia a los sistemas eléctricos del tren. Incrementar la velocidad de operación, es un aspecto relevante para las administraciones ferroviarias, ya que permite acortar los tiempos de servicio y aumentar la explotación de las instalaciones.

Como ya se ha comentado a lo largo de esta memoria, un adecuado funcionamiento de una instalación de catenaria rígida depende de que las fuerzas de contacto entre pantógrafo y catenaria sean adecuadas. La fuerza de contacto es la magnitud más representativa para evaluar el comportamiento de la interacción entre ambos sistemas. Un patrón adecuado de las fuerzas de contacto está relacionado con un desgaste típico de funcionamiento y una apropiada vida

útil de la instalación. Sin embargo, una inadecuada interacción, es la fuente de problemas de desgaste prematuro y heterogéneo de los materiales, presencia de arcos eléctricos, elevada fricción entre materiales en contacto y presencia de vibraciones indeseadas, todo ello genera una pobre transmisión de corriente, llegando incluso a una posible rotura del hilo de contacto en catenarias convencionales. Por ello, es importante analizar el comportamiento de este tipo de instalaciones y estudiar la fuerza de contacto de la interacción entre pantógrafo y catenaria rígida. Para conseguir una predicción adecuada de la fuerza de contacto, es necesario modelar ambos sistemas adecuadamente, los cuales deben contemplar el comportamiento real de la infraestructura de catenaria rígida y el mecanismo del pantógrafo, permitiendo así, predecir el comportamiento de la interacción.

En lo referente al pantógrafo, existe una gran variedad de pantógrafos disponibles en el mercado, los cuales difieren entre sí en la distribución de sus masas, rigideces y amortiguamientos. Muchos de estos modelos de pantógrafo, han sido estudiados por otros equipos de investigación de referencia y se encuentran publicados en la bibliografía. Una de las técnicas empleadas para describir estos pantógrafos es mediante modelos de masas concentradas. Los modelos matemáticos de masas concentradas permiten describir el comportamiento dinámico real del pantógrafo mediante sus frecuencias naturales y modos de vibración. Estos modelos son usados para reproducir el movimiento vertical del pantógrafo y hacen posible el estudio de la interacción con la catenaria.

Sin embargo, en lo referente a la catenaria rígida, según nuestro conocimiento, no existen modelos matemáticos validados y publicados que reproduzcan el comportamiento dinámico de este tipo de superestructuras ferroviarias. Por lo que, se considera necesario obtener un modelo de catenaria rígida fiel a la realidad, validado dinámicamente, que permita el estudio de la interacción con el pantógrafo para conseguir resultados rigurosos de la fuerza de contacto.

De lo anterior surge la necesidad de obtener modelos validados de ambos sistemas donde se contemple la dinámica del pantógrafo y la catenaria rígida. De esto modo será posible modelar la interacción y predecir el comportamiento de la misma, mediante el análisis de las fuerzas de contacto. El análisis de resultados permitirá mejorar el diseño y rendimiento de este tipo de instalaciones.

7.2.2. OBJETIVO

Este trabajo se planteó como objetivo el estudio de las fuerzas de contacto de la interacción entre pantógrafos y catenaria usando modelos de elementos finitos validados a partir de los resultados obtenidos de ensayos modales experimentales en túnel y laboratorio.

7.2.3. METODOLOGIA

Este trabajo presentó el estudio de interacción entre dos modelos de catenaria rígida y 11 modelos de pantógrafo. El primer modelo de catenaria rígida fue validado con los resultados obtenidos del ensayo modal experimental llevado a cabo en una instalación real de túnel de cercanías de Málaga. A efectos de comparación, el segundo modelo de catenaria rígida reproducía el modelo anterior con longitudes de vanos constantes. Los 11 pantógrafos fueron elegidos con el fin de tener una muestra representativa de los pantógrafos utilizados actualmente en infraestructuras de Europa y Asia

Se presentaron dos modelos de catenaria rígida: el primer modelo fue validado con ensayos modales experimentales realizados en una instalación real de la red de cercanías de Málaga en el túnel del Guadalhorce y ensayos en los laboratorios del CTF (Centro de Transportes Ferroviarios) y la UMA (Universidad de Málaga). La longitud total de la sección modelada fue 390.5 metros, formada por 52 soportes y 46 bridas. El primer paso para la validación del modelo de catenaria fue caracterizar la infraestructura real del cantón de túnel mediante sus aspectos

geométricos y propiedades mecánicas. Posteriormente, se procedió al estudio del comportamiento dinámico de la estructura mediante ensayos modales experimental. La técnica de excitación empleada para los ensayos fue mediante martillo de impacto, recogiendo la respuesta del sistema a través de 49 puntos de medida distribuidos a lo largo de la sección. Los datos recogidos del ensayo permitieron obtener las frecuencias, modos y amortiguamientos de la estructura de catenaria. Finalmente, a partir de técnicas de minimización de errores y empleando el algoritmo genético descrito en el primer artículo se consiguió determinar todos los parámetros característicos del cantón ensayado. Los resultados obtenidos en la validación fueron: errores en frecuencia por debajo del 2 % y una correlación de los modos de vibración por encima del 92 %, quedando el modelo de cantón de catenaria rígida validado. El segundo modelo fue una representación ideal del modelo anterior sin considerar los ajustes de montaje de la instalación, manteniendo constante las longitudes de vano, respetando el diseño inicial del proyecto.

Los modelos de pantógrafo fueron elegidos de bibliografía considerando una muestra representativa de los modelos usados actualmente en Europa y Asia. Todos los modelos seleccionados fueron publicados en revistas de prestigio por diferentes grupos de referencia, los cuales centran sus estudios en la interacción de pantógrafo con catenaria convencional. Los pantógrafos fueron modelados mediante modelos de masas concentradas de dos y tres grados de libertad. Cabe mencionar, que se estudiaron las frecuencias naturales de cada uno de los pantógrafos, de forma libre sin restricciones y en contacto con la catenaria, con el objetivo de analizar su influencia en el análisis posterior de las fuerzas de contacto.

Finalmente, se procedió a realizar un modelo de interacción entre ambos sistemas. Para simular la interacción entre pantógrafo y catenaria se usó el método “penalty”, el cual era un método contrastado en muchos estudios publicados en la bibliografía. Para todos los pantógrafos, se fijó una precarga, una rigidez de contacto y se analizaron tres velocidades a 70, 100 y 130 Km/h. También se consideró el efecto de la gravedad y se analizaron todos los casos para frecuencias de hasta 200 Hz. Además, con el objetivo de eliminar los efectos transitorios de los primeros pasos de la simulación en el cálculo de las fuerzas de contacto, se consideró una sección inicial de catenaria rígida, unida al cantón bajo estudio, a través de un seccionamiento o junta de dilatación. Lo anterior permitió también estudiar los efectos que produce la interacción entre pantógrafo y catenaria en la unión entre ambas secciones.

7.2.4. RESUMEN DE RESULTADOS

Se estudiaron un total de 66 casos, obtenidos de analizar la interacción entre 11 pantógrafos con dos modelos de cantón de catenaria rígida a 3 velocidades de operación diferentes, 70, 100 y 130 Km/h, considerando así, los rango de baja, media y moderadamente alta velocidad respectivamente. Al modelo validado de catenaria rígida se le denominó modelo real, y a su semejante modelo ideal. Los pantógrafos fueron enumerados de forma correlativa del 1 al 11. Para todos los casos se obtuvieron las fuerzas de contacto a lo largo de todo el cantón, las fuerzas máximas y mínimas y la desviación estándar.

La Figura 11, extraída del artículo, muestra las fuerzas de contacto a lo largo del cantón ideal (*SI*) y real (*SR*) particularizado para un modelo de pantógrafo (*P04*) a una velocidad de 130 km/h (*V130*). En ambos casos, se observaron gran similitud entre las fuerzas de contacto en la sección inicial (*initial subsection*), permitiendo así la comparativa entre ambos modelos de catenaria en su sección bajo estudio (*Ideal/Real subsection*). Lo anterior ocurría en el resto de casos analizados, donde las condiciones de simulación en el modelo real e ideal, previas a la sección bajo estudio, presentaban el mismo patrón, lo que permitía la comparativa entre ambos modelos. Por otro lado, se contempló como el paso del pantógrafo por el seccionamiento (*expansión joint*) generaba grandes perturbaciones de la fuerza de contacto, las cuales se veían

incrementadas en el modelo real. Una vez pasado el seccionamiento, fue posible estudiar la interacción en la subsección (*Ideal/Real subsection*) para cada caso propuesto. De forma general, se observaron mayores perturbaciones de la fuerza de contacto a lo largo de la sección del modelo real en comparación con el modelo ideal. Para todos los casos analizados se obtuvieron gráficas análogas a la Figura 11.

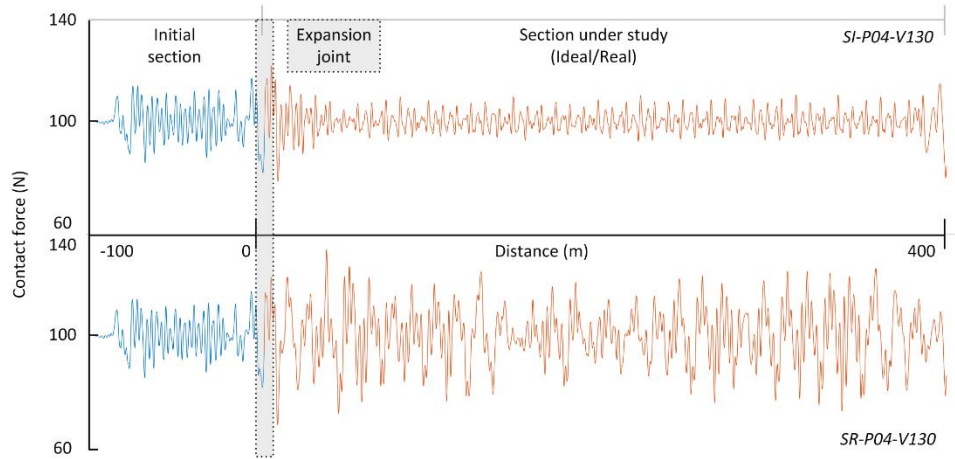


Figura 11: "Contact forces in cases SI-P04-V130 y SR- P04-V130" (Fuerzas de contacto en los casos SI-P04-V130 y SR-P04-V130)

Tras la comparativa entre el modelo real e ideal de los casos analizados, los resultados indicaron que las instalaciones de catenaria rígida con unas longitudes de vano no homogéneas, excitaban un mayor número de frecuencias durante la interacción, que afectaba negativamente a las fuerzas de contacto. La Figura 12, extraída del artículo, muestra el histograma en la sección real e ideal de la longitud de vano, donde puede apreciarse que la sección real presentaba un histograma más distribuido que en la sección ideal, donde la longitud de vano se concentraba en 8 metros. A bajas velocidades (70 km/h) no se observaron diferencias en el comportamiento de las fuerzas entre el modelo real e ideal. Sin embargo, a media velocidad (100km/h) se observó cómo algunos pantógrafos mostraban fuerzas de contacto con mayores oscilaciones en el modelo real. A alta velocidad (130km/h) todos los pantógrafos mostraban mayores fuerzas de contacto en el modelo real.

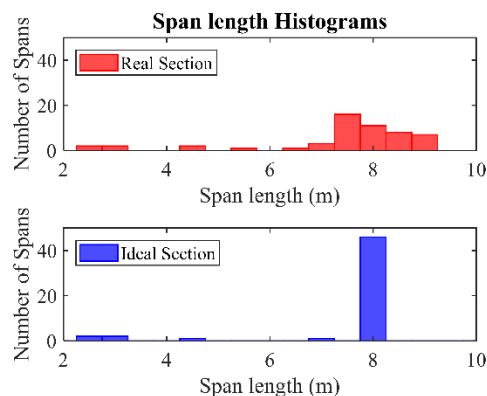


Figura 12: "Histograms of ideal and real OCR span lengths" (Histograma de las longitudes de vano de la sección ideal y real de catenaria rígida)

Analizando los resultados, sin considerar particularidades, se observó un incremento en las fuerzas de contacto a medida que aumentaba la velocidad de paso del pantógrafo. Estos

resultados coincidían con las observaciones de los responsables de las infraestructuras ferroviarias, que transmitían que a bajas velocidades no existen problemas de interacción entre pantógrafo y catenaria, pero indicaban, que un incremento de la velocidad podría causar inestabilidad en la interacción entre ambos sistemas.

Se observó cómo excepcionalmente algunos de los pantógrafos mostraban un peor comportamiento a 70 km/h frente a 100 km/h en el modelo ideal. Este hecho se relacionó con las frecuencias de resonancia del conjunto pantógrafo-catenaria. La frecuencia de paso del pantógrafo por los soporte de la catenaria a esta velocidad, estaba muy cerca de las frecuencias naturales del modelo de pantógrafo. Este hecho se observa en la Figura 13, extraída del artículo, la cual muestra las fuerzas de contacto en el modelo ideal para todos los pantógrafos a tres velocidades. Puede apreciarse cómo los pantógrafos P1, P6 y P8 muestran mayores fuerzas de contacto para velocidades a 70 km/h en comparativa con velocidades de 100 km/h.

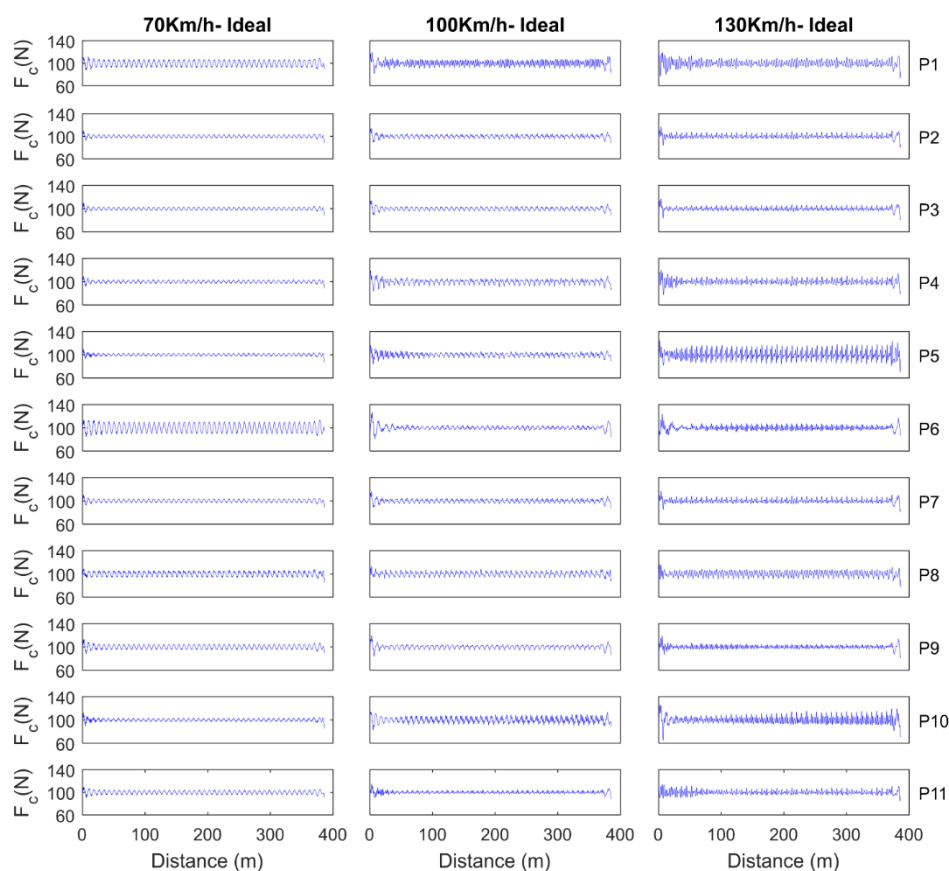


Figura 13: "Contact forces in the ideal OCR subsection" (Fuerzas de contacto en la subsección ideal de catenaria rígida)

La Figura 14, extraída del artículo, muestra la desviación estándar de las fuerzas de contacto. El análisis de resultados realizado en los apartados anteriores es coincidente con la información que se obtiene de los valores de desviación estándar calculados. El valor de la desviación estándar de las fuerzas de contacto está relacionada con el desgaste a lo largo de la vida útil del hilo de contacto y de los frotadores de pantógrafo. Fuerzas de contacto con desviaciones estándar menores corresponden a oscilaciones de baja amplitud y, en consecuencia, el desgaste será más homogéneo y pausado. De forma general, se observaron mayores perturbaciones de la fuerza de contacto a lo largo de la sección del modelo real en comparación con el modelo ideal, causando una mayor desviación estándar. Las longitudes de vano no homogéneas

presentes en el modelo real, generaban un peor comportamiento dinámico, afectando negativamente a las fuerzas de contacto, quedando contrastado con los valores de la desviación estándar. Además, con el incremento de velocidad se incrementaba la desviación estándar, especialmente en la sección real. Particularizando, se observó cómo algunos pantógrafos (P2, P3 y P7) tenían una baja y casi constante desviación estándar en todo el rango de velocidades. También se confirman el efecto de las frecuencias de resonancia del conjunto pantógrafo-catenaria, el cual puede observarse para el pantógrafo P6.

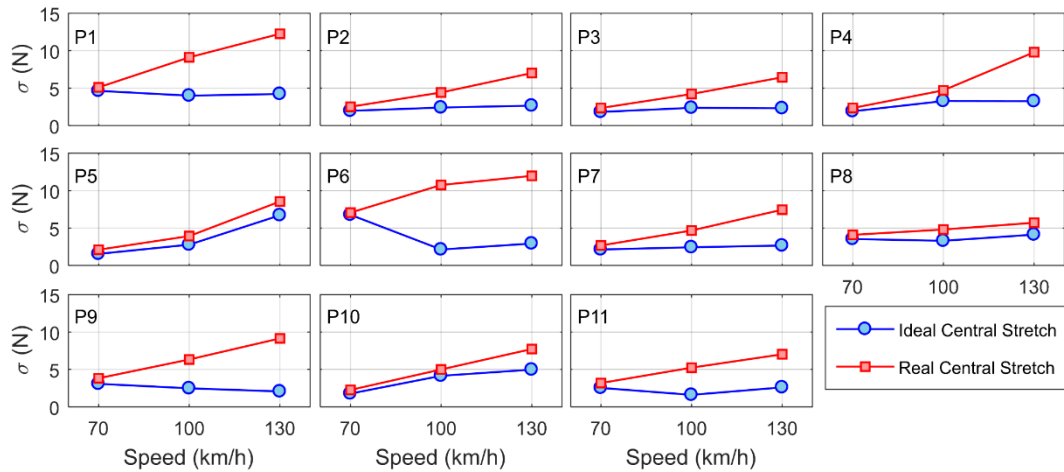


Figura 14: "Standard deviations of the contact forces" (Desviación estándar de las fuerzas de contacto)

7.2.5. DISCUSIÓN

Este trabajo presentaba el estudio de las fuerzas de contacto de la interacción entre pantógrafos y catenaria usando modelos de elementos finitos de catenaria validados a partir de los resultados obtenidos de ensayos modales experimentales. Gracias a los modelos contrastados de pantógrafos y a modelos validados de catenaria rígida fue posible analizar la interacción entre ambos y obtener resultados fiables.

Localmente, se observó en la unión entre ambas secciones de catenaria rígida, una mayor fluctuación de las fuerzas de contacto. Así mismo, el incremento de velocidad, agudizaba la inestabilidad de las fuerzas de contacto en el seccionamiento. Este hecho se justifica con la adaptación del pantógrafo en movimiento a una sección de catenaria en reposo, esta transición producía perturbaciones indeseadas e incremento de las fuerzas de contacto. Además, la distribución de los soportes en los extremos del cantón difería del resto de la sección, haciendo la estructura más rígida debido a la proximidad de los soportes entre sí, lo que dificultaba la suavidad en la transición.

En general, se observó un peor comportamiento de las fuerzas de contacto en el modelo real cuyas longitudes de vano eran no homogéneas. Este fenómeno se argumenta con la excitación en un mayor número de frecuencias durante la interacción, debido a la irregularidad en las longitudes de vanos de la catenaria rígida real. Además, el modelo real, presentaba longitudes de vanos mayores, lo que producía una mayor flecha de caída de vano, afectando negativamente a las fuerzas de contacto. Por el contrario, el modelo ideal con longitudes de vano homogéneas, centraba su excitación en un rango de frecuencias, lo que podría ser perjudicial si el pantógrafo presentaba frecuencias naturales en ese rango. Este fenómeno debería ser considerado durante las fases de diseño de este tipo de instalaciones, con el objetivo de lograr una óptima interacción entre catenaria rígida y pantógrafo.

El estudio de la interacción contemplaba la posibilidad de analizar el comportamiento dinámico hasta una frecuencia de 200 Hz, sin embargo, los pantógrafos usados en este trabajo, estaban

limitados a 20 Hz respetando la norma vigente, por lo que no se contemplaban fenómenos de vibración por encima de este rango. Para estudios posteriores se propone un modelo de pantógrafo 3D que contemple una dinámica de mayor rango de frecuencias con el objetivo de analizar su influencia en la interacción con catenaria rígida.

Los resultados de esta investigación coincidían con lo descrito por las administraciones ferroviarias, sin embargo, tras el análisis de los mismos, surgió el interés y necesidad de realizar más estudios que contemplaran otros aspectos importantes de este tipo de instalaciones. Cabe mencionar, la necesidad de analizar un rango superior de velocidades; incorporar el desgaste producido en el hilo de contacto y frotadores de pantógrafo debido a la interacción; o la posibilidad de incorporar estudios de doble pantógrafo.

7.3. ARTÍCULO III: “EVALUATION OF THE INFLUENCE OF THE SPEED, PRELOAD AND SPAN LENGTH ON THE CONTACT FORCES IN THE INTERACTION BETWEEN THE PANTOGRAPH AND THE OVERHEAD CONDUCTOR RAIL”

7.3.1. INTRODUCCIÓN

La catenaria rígida es uno de los sistemas para transmitir energía a los sistemas eléctricos de un tren en movimiento. Este sistema de alimentación presenta algunas ventajas frente al sistema de catenaria convencional. Sin embargo, su uso sigue limitado a infraestructuras subterráneas y túneles, posiblemente debido al desconocimiento de este tipo de infraestructuras. Entre las ventajas que ofrece la catenaria rígida frente a la convencional cabe mencionar:

- Mayor robustez y menores costes de mantenimiento
- Mejor adaptabilidad a gálibos reducidos
- Gran sección transversal que permite altas corrientes eléctricas y mejor refrigeración en caso de sobrecalentamiento
- Ausencia de las fuerzas de tracción que permite una mayor durabilidad del hilo de contacto
- Evita situaciones de riesgo provocadas por la rotura del hilo de contacto

Estas ventajas son suficientemente relevantes para considerar la catenaria rígida una buena candidata para ser incorporada en nuevas instalaciones. Surge la necesidad de disponer de simulaciones que permitan ampliar el conocimiento del comportamiento de la interacción entre pantógrafo y catenaria rígida y demostrar la viabilidad y beneficios de la instalación. Este conocimiento permitirá mejorar este tipo de instalaciones, mejorando la calidad de captación de corriente y abordando algunas de la problemáticas presentes en la interacción entre ambos sistemas.

El conocimiento adquirido en los dos artículos anteriores ha permitido emprender un segundo estudio de la interacción entre pantógrafo y catenaria rígida en mayor profundidad, contemplando un gran número de escenarios equivalentes a la realidad, que no han sido considerados en estudios previos.

7.3.2. OBJETIVO

Este trabajo se centra en evaluar las fuerzas de contacto que se producen durante la interacción entre el pantógrafo y la catenaria rígida en instalaciones comúnmente empleadas en Europa. Para este estudio se contemplan diferentes tipos de instalaciones y condiciones de operación, donde se tienen en cuenta la influencia de la velocidad y la precarga del pantógrafo, así como la longitud de vano de la catenaria rígida.

7.3.3. METODOLOGÍA

El tercer artículo se centró en evaluar la influencia de la velocidad del pantógrafo, la precarga del pantógrafo y la longitud de vano de la catenaria rígida en la fuerza de contacto en la interacción entre el pantógrafo y catenaria.

A partir del aprendizaje obtenido en el modelado de la catenaria rígida, presentado en el segundo artículo de esta tesis, se modelaron 3 secciones de catenaria rígida que contemplaban tres longitudes de vano diferentes, 8, 10 y 12 metros. La catenaria fue dividida en dos secciones con el objetivo de eliminar los efectos transitorios de los primeros pasos de la simulación en el cálculo de las fuerzas de contacto. La longitud de la sección inicial fue 120 metros y la longitud total de 507.61 m. Ambas secciones se unían en el seccionamiento asegurando la transición eléctrica y mecánica entre el pantógrafo y la catenaria.

Para la simulación de los pantógrafos se tomaron 3 de los 11 pantógrafos empleados en el segundo artículo. Cabe mencionar de nuevo que los modelos elegidos fueron contrastados por equipos de investigación de referencia centrados en el estudio de interacción entre pantógrafo y catenaria convencional. Este estudio también incorporó la contribución de las fuerzas aerodinámicas en el pantógrafo, con el objetivo de no despreciar su influencia en las fuerzas de contacto.

Se estudiaron un total de 144 simulaciones procedentes de combinar: 4 velocidades de circulación de pantógrafo: 70, 100, 130 y 160 km/h, donde cada velocidad contemplaba 4 niveles de precarga: 70, 90, 110 y 130 N, con 3 modelos de catenaria rígida con diferentes longitudes de vano: 8, 10 y 12 m.

7.3.4. RESUMEN DE RESULTADOS

La Figura 15, extraída del artículo, muestra las fuerzas de contacto obtenidas para los pantógrafos 1 y 2 con una velocidad de 70 km/h, con una precarga de 70 N y una longitud de vano de 10 m. Pudo observarse que la media de las fuerzas era casi coincidente con la precarga nominal y estaba concentrada en una banda estrecha entorno a la precarga como se muestra en el histograma. Analizando el resto de casos para bajas velocidades, se observó una mayor fluctuación en las fuerzas de contacto a medida que aumentaba la longitud de vano, pero en ningún caso se detectaron despegues.

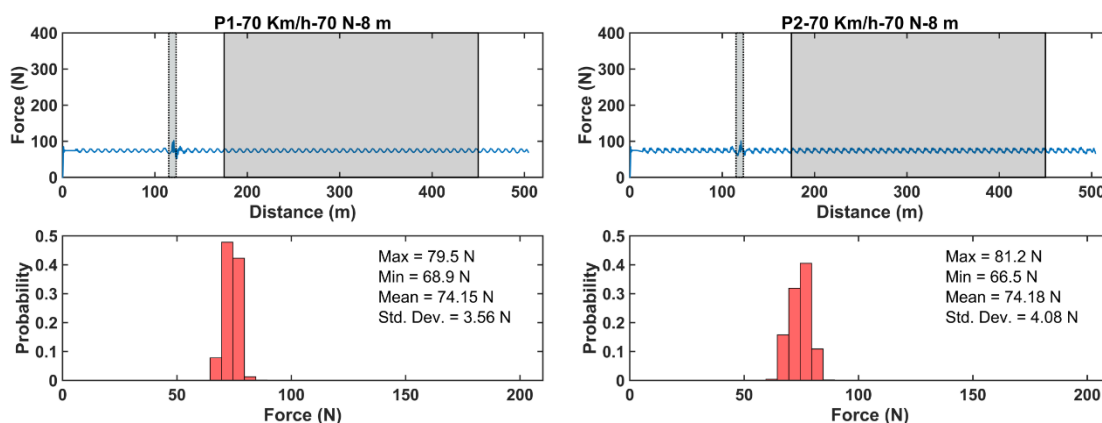


Figura 15: "Measured forces (top) and histogram (bottom). Pantograph 1 (left), pantograph 2 (right). 70 km/h" (Medida de las fuerzas de contacto (arriba) e histograma (abajo). Pantógrafo 1 (izquierda), pantógrafo 2 (derecha). 70 km/h)

La Figura 16, extraída del artículo, muestra las fuerzas de contacto obtenidas para los pantógrafos 1 y 2 con una velocidad de 100 km/h, para una precarga de 90 N y una longitud de vano de 12 m. Se observó como un incremento de velocidad inducía a una mayor variación de

las fuerzas de contacto, en especial para longitudes de vano mayores. La diferencia entre la precarga nominal y la fuerza media era debido a la fuerza aerodinámica que actúa en el pantógrafo, se observa una mayor distribución de las fuerzas de contacto como se refleja en el histograma. Analizando el resto de casos para esta velocidad, se observó como el pantógrafo 2 estuvo cerca de la pérdida de contacto cuando la precarga aplicada fue 70 N y la longitud de vano era 12 m.

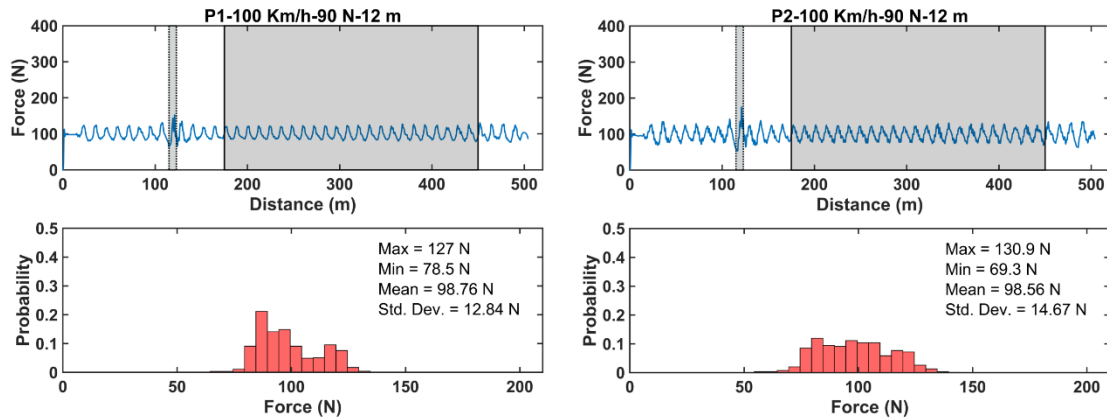


Figura 16: "Measured forces (top) and histogram (bottom). Pantograph 1 (left), pantograph 2 (right). 100 km/h" (Medida de las fuerzas de contacto (arriba) e histograma (abajo). Pantógrafo 1 (izquierda), pantógrafo 2 (derecha). 100 km/h)

La Figura 17, muestra las fuerzas para el pantógrafo 3 a la velocidad de 130 km/h, precarga de 90 N y longitudes de vano de 8, 10 y 12 m. Pudo observarse que el incremento de la longitud de vano induce a una peor interacción entre el pantógrafo y catenaria, lo que provocaba una mayor distribución de las fuerzas de contacto como puede verse en el histograma. De nuevo, una longitud de vano de 12 m generaba una mayor inestabilidad de las fuerzas de contacto, lejos de la precarga nominal y cerca de la pérdida de contacto. De hecho, la influencia del paso del pantógrafo por los seccionamientos es perceptible incluso tras 50 metros después del paso por el seccionamiento entre cantones.

La Figura 18, extraída del artículo, muestra las fuerzas para los pantógrafos 1, 2 y 3 a la velocidad de 160 km/h, precarga de 130 N y longitud de vano de 12 m. Para el pantógrafo 3 se observaron altas fluctuaciones incluso antes del seccionamiento. Se detectaron pérdidas de contacto debido a la presencia de resonancias. Para todos los casos analizados a esta velocidad, la inestabilidad de las fuerzas era demasiado alta e inaceptable.

La Figura 19, 20, 21 y 22 muestran la desviación estándar de la fuerza de contacto para diferentes longitudes de vano y precarga. Cada figura recoge el comportamiento de los 3 pantógrafos y contempla una velocidad de operación. En términos generales se observó que a medida que aumentaban las longitudes de vano y la velocidad, se incrementaban los valores de la desviación estándar de las fuerzas de contacto. De igual modo, se observó como una precarga mayor, conducía a unos valores más bajos de la desviación estándar, excepto para los casos analizados a 160 km/h.

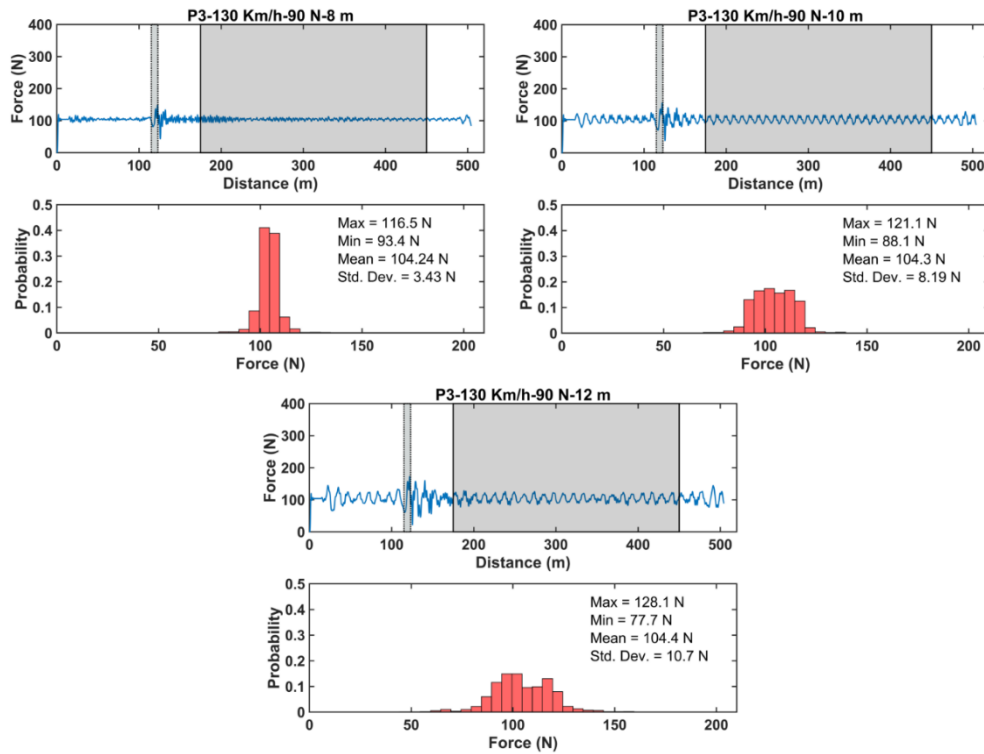


Figura 17: "Measured forces (top) and histogram (bottom). Pantograph 3. 130 km/h" (Medida de las fuerzas de contacto (arriba) e histograma (abajo). Pantógrafo 3. 130 km/h)

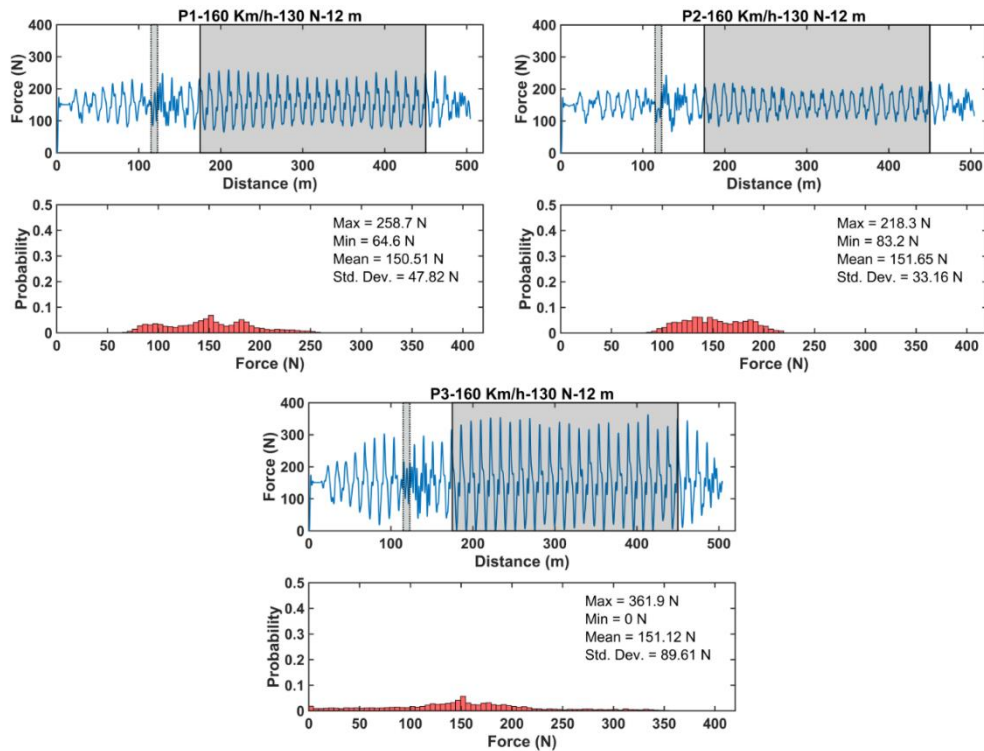


Figura 18: "Measured forces (top) and histograms (bottom). Pantograph 1 (top-left), pantograph 2 (top-right) and pantograph 3 (bottom-center). 160 km/h" (Medida de la fuerza (arriba) e histograma (abajo). Pantógrafo 1 (arriba-izquierda), pantógrafo 2 (arriba-derecha) y pantógrafo 3 (abajo-centro). 160 km/h)

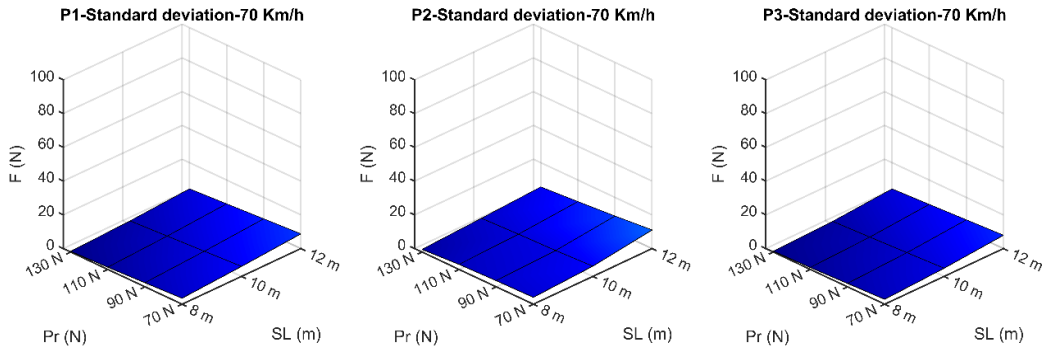


Figura 19: "Standard deviations vs span length (SI) and preload (Pr). 70 km/h" (Desviación estándar vs longitud de vano (SI) y precarga (Pr). 70 km/h)

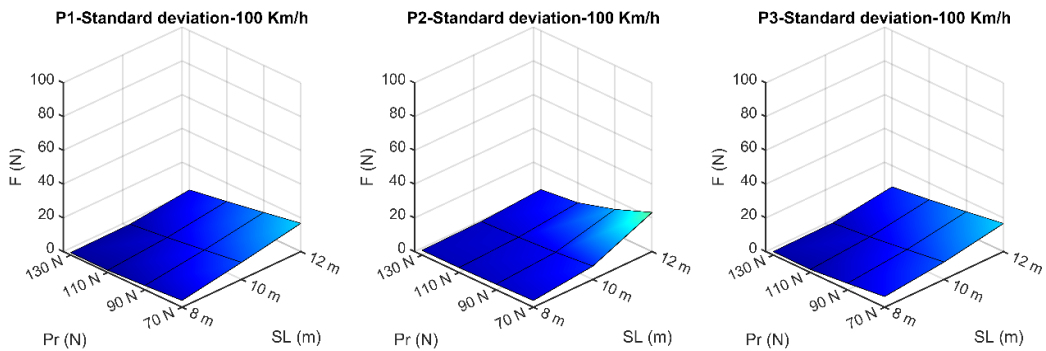


Figura 20: "Standard deviations vs span length (SI) and preload (Pr). 100 km/h" (Desviación estándar vs longitud de vano (SI) y precarga (Pr). 100 km/h)

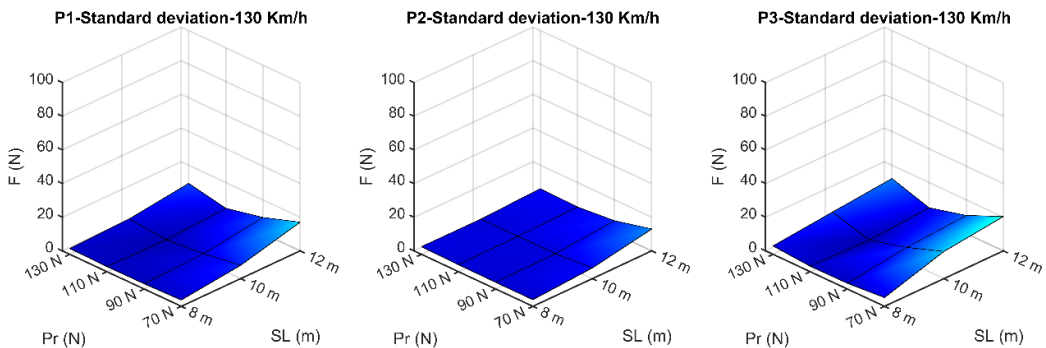


Figura 21: "Standard deviations vs span length (SI) and preload (Pr). 130 km/h" (Desviación estándar vs longitud de vano (SI) y precarga (Pr). 130 km/h)

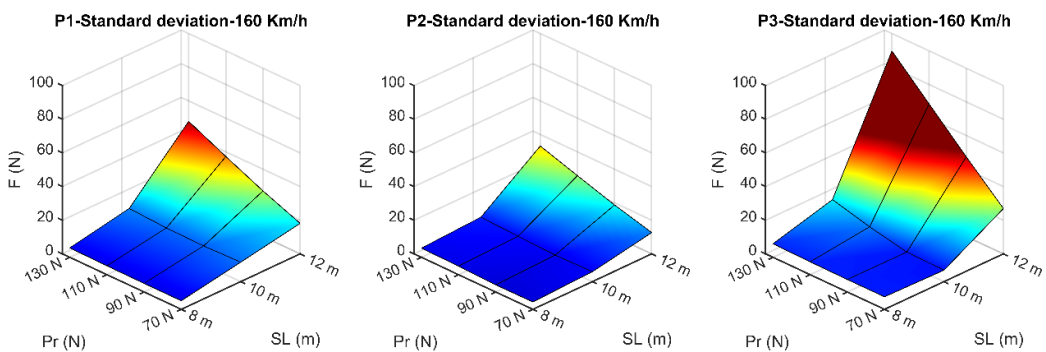


Figura 22: "Standard deviations vs span length (SI) and preload (Pr). 160 km/h" (Desviación estándar vs longitud de vano (SI) y precarga (Pr). 160 km/h)

La Figura 23, muestra el espectro de frecuencias para algunos casos significativos analizados, junto con los armónicos de la frecuencia de paso del tren ($2xf_t$, $3xf_t$, $4xf_t$, y $5xf_t$) y las frecuencias del pantógrafo (fp_1 , fp_2 y fp_3). En estos casos se observaron desviaciones estándar de las fuerzas de contacto altas, llegando incluso a la pérdida de contacto en el peor de los casos. Este hecho se justificó con las frecuencias de resonancia del conjunto pantógrafo-catenaria. Como pudo observarse en la Figura 23, donde la frecuencia de excitación del paso del tren por la catenaria estaba muy cerca de las frecuencias propias del pantógrafo.

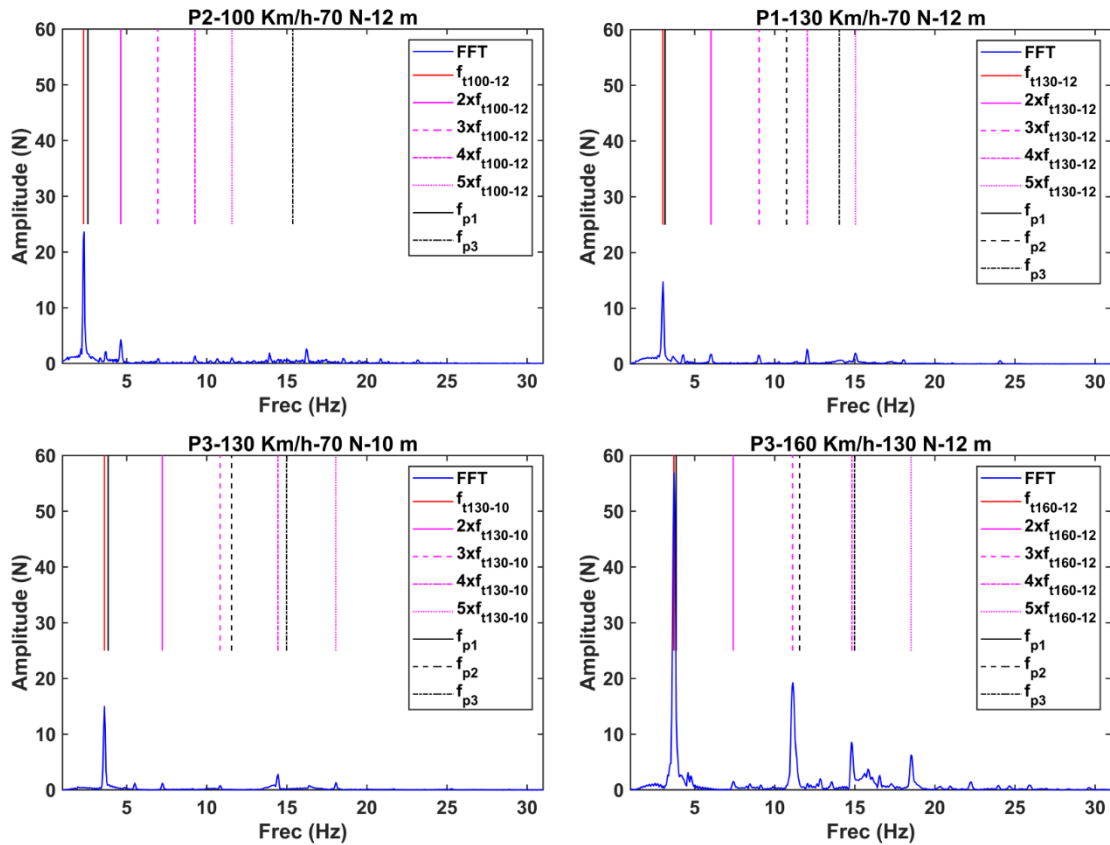


Figura 23: "Test spectrums" (Resultados de espectro)

La Figura 24, muestra las frecuencias naturales de catenaria rígida para las diferentes longitudes de vano. Las frecuencias naturales mostradas estaban divididas en dos grupos principalmente. El primero estaba compuesto por las deformadas a bajas frecuencias, equivalentes al primer modo de vibración de viga biapoyada. El segundo grupo incluía las frecuencias naturales propia del segundo modo de vibración de viga biapoyada. En la Figura 24, también pudo observarse como a medida que incrementaba la velocidad, la frecuencia de paso del tren estaba más concentrada en el primer grupo de frecuencias naturales de catenaria rígida. Se observó como la combinación de alta velocidad y alta longitud de vano tiene una notable influencia en el nivel de vibración del conjunto pantógrafo-catenaria.

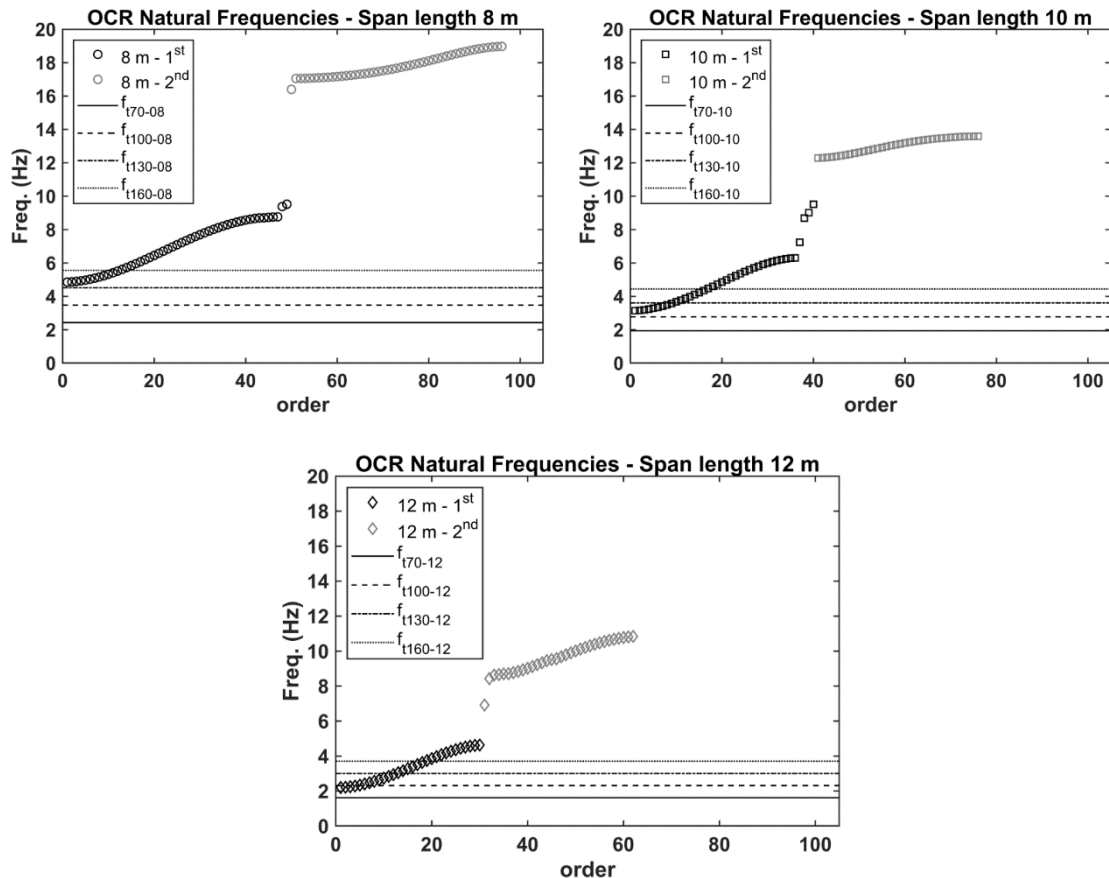


Figura 24: “OCR natural frequencies. Span length 8 m (top-left) – Span length 10 m (top-right) – Span length 12 m (bottom)” (Frecuencias naturales de catenaria rígida. Longitud de vano de 8 m (arriba-izquierda) – Longitud de vano 10 m (arriba-izquierda) – Longitud de vano 12 m (abajo))

7.3.5. DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos en los casos de estudio, la combinación de alta longitud de vano con bajas precargas puede ser apropiada si la instalación es para bajas velocidades de operación. Por el contrario, si la velocidad incrementa, debería considerarse la reducción de la longitud de vano. Esta conclusión coincide con las distancias de la mayoría de instalaciones de catenaria rígida que se han instalado hasta ahora.

Analizando la precarga se observó que con valores bajos no se producían pérdidas de contacto en ningún rango de velocidad. Sin embargo, a bajas precargas se producían mayores fluctuaciones en la fuerza de contacto a baja y media velocidad de operación, lo que hacía el comportamiento de la interacción más inestable. Por lo que para llegar al punto óptimo de funcionamiento, habría que estudiar en detalle la interacción con la ayuda de modelos que contemplaran la evolución del desgaste de los materiales o con ensayos experimentales.

Cabe destacar el comportamiento de algunos casos cuyas fuerzas de oscilación eran muy altas para alguno de los pantógrafos, observando incluso pérdidas de contacto. Este hecho se relacionó con las frecuencias de resonancia del conjunto pantógrafo-catenaria. Se pudo observar un alto nivel de vibración cuando la frecuencia de paso del tren por los soportes y sus armónicos estaba cerca de las frecuencias de resonancia del pantógrafo. Este hecho era más evidente en longitudes de vano mayores y a medida que incrementaba la velocidad, ya que la frecuencia de paso estaba más centrada en el primer grupo de frecuencias naturales de la catenaria rígida. Por lo que surge la posible necesidad de tener una regulación específica de este

tipo de instalaciones que establezca la relación apropiada entre ambos sistemas que garantice un buen comportamiento dinámico del conjunto pantógrafo-catenaria rígida.

Se observó la influencia del seccionamiento en las fuerzas de contacto a alta velocidad. Los efectos del paso del pantógrafo por el seccionamiento perduraban tras 50 m del inicio del contacto. Lo que sugiere un estudio en detalle del seccionamiento y su optimización para mejorar la captación de corriente a altas velocidades en el entorno de los seccionamientos.

8. CONCLUSIONES GLOBALES

Esta tesis ha logrado alcanzar su objetivo. Mediante la metodología propuesta ha sido posible ampliar el conocimiento de la interacción entre el pantógrafo y la catenaria rígida. Gracias al desarrollo de modelos de elementos finitos validados de catenaria rígida a partir de ensayos modales en laboratorio y en la superestructura real, empleando además modelos de pantógrafos contrastados por otros equipos de investigación, ha sido posible realizar simulaciones de la interacción entre ambos sistemas en múltiples configuraciones típicas de este tipo de instalaciones. Los resultados obtenidos de la casuística planteada han permitido ampliar el conocimiento acerca del funcionamiento de este sistema de alimentación eléctrica del sistema ferroviario.

La primera etapa de esta tesis consistía en obtener una herramienta basada en algoritmos genéticos evolutivos para automatizar el procedimiento de validación de modelos matemáticos a partir de resultados experimentales. El objetivo del algoritmo genético era proporcionar los parámetros correctos del modelo de catenaria rígida, para ello evaluaba una función objetivo basada en minimizar los errores cometidos entre el modelo y la realidad en lo referente a su comportamiento dinámico. En todos los casos planteados el algoritmo demostró su eficacia a la hora de proporcionar los parámetros del modelo.

La segunda etapa de esta tesis trató de obtener un modelo de elementos finitos de catenaria rígida validado a partir de ensayos modales realizados en una instalación real de la Red de Cercanías de Málaga en el túnel del Guadalhorce. Los errores cometidos entre el modelo de elementos finitos de catenaria rígida y el comportamiento dinámico real obtenido a través de las pruebas modales experimentales del tramo de catenaria fueron mínimos. Por ello, estos resultados avalaban que el comportamiento dinámico del modelo de catenaria rígida era equivalente al comportamiento medido en la realidad.

Una vez superadas las etapas anteriores, se procedió al estudio de la interacción entre pantógrafo y catenaria en múltiples configuraciones. Este estudio se dividió a su vez en dos fases. En la primera fase se contemplaron diferentes escenarios donde se variaba la velocidad con la que operaban los pantógrafos elegidos bajo la catenaria. Tras haber adquirido experiencia por parte del equipo investigador se decidió ampliar el estudio anterior. En la segunda fase se examinó la influencia de la precarga aplicada en el pantógrafo, se amplió el rango de velocidad de los pantógrafos operando bajo la catenaria y se contemplaron diferentes longitudes de vanos de la superestructura de catenaria rígida comúnmente utilizados en instalaciones reales. Los resultados obtenidos de todos los casos analizados permitieron extender el conocimiento acerca del funcionamiento de este tipo de instalaciones vislumbrando el camino hacia la mejora de ambos sistemas para paliar sus inconvenientes y resaltar sus aptitudes.

Las técnicas y metodología empleadas para la caracterización de la superestructura de catenaria rígida y su interacción con el pantógrafo fueron validas gracias a la experiencia adquirida por los investigadores a lo largo de estos años, a la comparativa con otros equipos de investigación y a contrastar resultados con las entidades ferroviarias.

9. LÍNEAS FUTURAS

A la vista del trabajo realizado en esta tesis y las conclusiones de las simulaciones realizadas con los modelos de la interacción entre pantógrafo y catenaria rígida validados con ensayos experimentales, podemos destacar las siguientes líneas futuras agrupadas en la Tabla 4 y descritas a continuación:

Temática	Item
Evolución del algoritmo	I - Algoritmo y supercomputador III – Algoritmo adaptado a otros elementos mecánicos
Caracterización dinámica de pantógrafo 3D	II - Modelo 3D de pantógrafo validado
Interacción pantógrafo - catenaria	IV – Interacción en juntas de dilatación V – Estudio de desgaste en hilo de contacto

Tabla 4: Líneas futuras clasificadas por temáticas de estudio

- I. Nuevas validaciones de cantones de catenaria rígida a partir de ensayos modales en condiciones restringidas.

Las actividades de trabajo diario por mantenimiento u otras tareas comunes de los túneles, provocan que las ventanas temporales para la realización de los ensayos en túnel no siempre son lo amplias que se necesitarían. Debido a esta limitación temporal, no es siempre posible obtener el número de registros requeridos para realizar las validaciones futuras de modelos en condiciones normales. Este hecho complica el proceso de validación de los algoritmos genéticos y se requieren más iteraciones de las presentadas en este trabajo. Es por ello que se requiere recurrir en estos casos al empleo de supercomputadores que acorten los tiempos de validación. Actualmente, nuestro grupo de trabajo está trabajando en esta línea con la validación de un modelo de cantón de catenaria empleando el supercomputador de la Universidad de Málaga. Los resultados obtenidos hasta el momento muestran el camino hacia la convergencia.

- II. Ampliación de la banda de frecuencia de estudio a partir de modelos de pantógrafo 3D.

La normativa que rige actualmente el estudio de la interacción entre pantógrafo y catenaria contempla una banda de frecuencia comprendida entre 0 y 20 Hz, sin embargo, está orientada principalmente al estudio de interacción con catenaria convencional. La mayoría de los trabajos publicados sobre interacción entre pantógrafo y catenaria centran sus estudios en esta banda de frecuencia. A pesar de lo anterior, la catenaria rígida, es un sistema que presenta una mayor rigidez que el sistema convencional y muestra un comportamiento dinámico diferente, por lo que el equipo de trabajo considera necesario ampliar la banda de frecuencia y contemplar la dinámica que presenta la interacción a mayores frecuencias. Es por ello que se requiere un modelo 3D de pantógrafo que contemple en detalle los frotadores de pantógrafo y la dinámica propia de este sistema. Este modelo permitirá realizar simulaciones de la interacción con el modelo de catenaria rígida validado y presentado en esta memoria, contemplando una banda de frecuencia comprendida entre 0 y 100 Hz. Además, se posibilitará la comparativa entre metodologías de modelado de pantógrafos de masas concentradas y modelado en 3D.

III. Mejora y adaptación de los algoritmos genéticos a la validación de otros elementos mecánicos presentes durante la interacción entre la catenaria rígida y el pantógrafo.

Para llevar a cabo el trabajo presentado en el punto anterior, se hace necesario obtener un modelo de elementos finitos de pantógrafo validado a partir de los resultados obtenidos de ensayos modales. Para ello se cuenta con el algoritmo implementado en las primeras etapas de esta tesis. Sin embargo, debido a la complejidad del mecanismo del pantógrafo, se requiere mejorar y adaptar el algoritmo para automatizar el proceso de validación de modelos de este tipo de sistema. El comportamiento dinámico del pantógrafo difiere del de la catenaria ya que aparecen muchas similitudes entre sus deformadas modales a diferentes frecuencias, por lo que el algoritmo deberá contemplar este comportamiento y desarrollar una función objetivo de mayor complejidad. Actualmente, se está llevando a cabo una campaña de ensayos modales en el laboratorio de la UMA sobre un pantógrafo de la compañía Schunk. Con los resultados obtenidos de estos ensayos se alimentará al algoritmo para que proceda a la validación del modelo de elementos finitos del pantógrafo.

IV. Análisis de las fuerzas de contacto durante el paso por juntas de dilatación entre cantones de catenaria rígida.

En la casuística planteada a lo largo de esta tesis para el estudio de la interacción, se observó cómo las juntas de dilatación o seccionamientos influían perjudicialmente sobre las fuerzas de contacto originadas durante la interacción entre el pantógrafo y catenaria rígida. En algunos de los casos analizados, la influencia negativa del seccionamiento perduraba en las fuerzas de contacto durante un largo tramo a lo largo del cantón. Es por ello que el equipo de trabajo se propone centrar su atención en esta sección de la estructura con el objetivo de conocerla en detalle para poder intervenir sobre las perturbaciones originadas durante la transición entre cantones.

V. Estudio de los desgastes del hilo de contacto

Uno de los aspectos que más preocupa a las administraciones ferroviarias debido a los costes de mantenimiento son los desgastes prematuros sobre los materiales en contacto durante la interacción. Actualmente, no está aún modelada la relación entre las fuerzas de contacto y el desgaste, pero si se sabe de su influencia y las consecuencias que originan. Los estudios de desgaste publicados hasta el momento no contemplan la influencia de las fluctuaciones de las fuerzas de contacto. Por lo anterior, nuestro equipo de trabajo se plantea estudiar modelos de desgaste del hilo de contacto de catenaria rígida que contemplen las fuerzas de contacto originadas durante la interacción. Estos estudios permitirán predecir el mantenimiento necesario del hilo de contacto y mejorar la explotación de la vía.

10. BIBLIOGRAFIA

- [1] Bommart PT, inventor, Bommart PT, assignee, Overhead rigid power conductor, U.S., Patent, No. US3985211A, 1976-10-12.
- [2] Oya A, Shimizu M, Mandai T, Nishi K, Tago M. Application of overhead rigid conductor line to mountain tunnel of conventional lines. In: Proceedings of the IEEE international conference on industrial technology, Hong Kong, People's Republic of China, 14–17December. p. 170–4. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2005.1600630>.
- [3] Vera C, Suarez B, Paulin J, Rodríguez P. Simulation model for the study of overhead rail current collector systems dynamics, focused on the design of a new conductor rail. *Veh Syst Dyn* 2007;44(8):595–614. <https://doi.org/10.1080/00423110500165499>.
- [4] Calleja V, Fernández RA, Barreiro J, Calvo A. Development and testing of a tuned mass damper for overhead contact rail systems. *Dyna* 2017;92 (6):680–7. <https://doi.org/10.6036/8498>.
- [5] Bautista A, Montesinos J, Pintado P. Dynamic interaction between pantograph and rigid overhead lines using a coupled FEM – multibody procedure. *Mech Mach Theory* 2016;97:100–11. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2015.10.009>.
- [6] Juan de Dios Sanz, ´Alvaro Calvo, David Barbado, Analysis of the capability of non-specific simulation software for studying the dynamic interaction between pantograph and rigid overhead conductor rail, *Transportation Research Procedia*, Volume 33, 2018, Pages 187-194, ISSN 2352-1465, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.10.091>.
- [7] Takemura T, Fujii Y, Shimizu M. Characteristics of overhead rigid conductor line having T-type cross section. In: Proceedings of the IEEE international conference on developments in mass transit systems. p. 173–7. <https://doi.org/10.1049/cp:19980115>.
- [8] Huang H-H, Chen T-H. Development of method for assessing the current collection performance of the overhead conductor rail systems used in electric railways. *Proc Inst Mech Eng, Part F: J Rail Rapid Transit* 2008;222(2):159–68. <https://doi.org/10.1243/09544097JRRT158>.
- [9] Chen L, Liu Z, Zhang J, Hu Z. Influence of key parameters on high speed overhead conductor rail and pantograph system. In: Klomp M., Bruzelius F., Nielsen J., Hillemyr A. (Eds.) *Advances in Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks. IAVSD 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-38077-9_25.
- [10] Railway Gazette. Rigid catenary speed record [EB/OL]. <http://www.railwaygazette.com/news/infrastructure/single-view/view/rigid-catenary-speed-record.html>. Accessed 07 October 2020.
- [11] Wei XK, Meng HF, He JH, Jia LM, Li ZG. Wear analysis and prediction of rigid catenary contact wire and pantograph strip for railway system, *Wear*, Volumes 442–443, 203118, 2020, ISSN 0043-1648, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203118>.

- [12] Guiming Mei, Tribological performance of rigid overhead lines against pantograph sliders under DC passage, *Tribology International*, Volume 151, 2020, 106538, ISSN 0301-679X, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106538>.
- [13] Carnevale M, Collina A, Zuin A. A rolling stock-based system for catenary condition monitoring: Validation through numerical simulations on a rigid catenary. *Proceedings of the Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies*, 2019-November, pp. 209-217.
- [14] Man M. Adoption of overhead rigid conductor rail system in MTR extensions. *J Int Council Electr Eng* 2012;2(4):463–6. <https://doi.org/10.5370/JICEE.2012.2.4.463>.

11. TRABAJOS PARA COMPENDIO

➤ Artículos científicos

Simarro Montserrat, Postigo S, Cabrera Juan A, Castillo Juan J. A procedure for validating rigid catenary models using evolutionary techniques. *Comput Struct* 228; 2020: 106145, ISSN 0045-7949, <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2019.106145>.

Simarro Montserrat, Postigo S, Prado-Novoa Maria, Pérez-Blanca A, Castillo Juan J. Analysis of contact forces between the pantograph and the overhead conductor rail using a validated finite element model, *Eng Struct*, Volume 225, 2020, 111265, ISSN 0141-0296, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111265>.

Simarro Montserrat, Castillo Juan J, Cabrera Juan A, Postigo S. Evaluation of the influence of the speed, preload and span length on the contact forces in the interaction between the pantograph and the overhead conductor rail, *Eng Struct*, Volume 243, 2021, 112678, ISSN 0141-0296, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112678>.

➤ Congresos

Simarro M, Postigo S, Torrealba D, Almenara L.F, Ania M, Simón A. (19-21 Octubre 2016). Soporte de catenaria rígida del túnel Sol-Nuevos Ministerios: modelado con elementos finitos y actualización con ensayos modales experimentales. Congreso Innovación ferroviaria, Valencia, España.

Simarro M, Postigo S, Almenara L.F, Ania M, Simón A. (23-26 Octubre 2017). Modelado con elementos finitos y actualización con ensayos modales experimentales de un cantón de catenaria rígida. 13º Congreso Ibero-americano de Ingeniería Mecánica, Lisboa, Portugal.

➤ Modelo de utilidad

Cuenca Gonzále L, Cortijo Fernández S, Ania Garcia M, Almenara Campo L.F, Peregrin Garcia E, Postigo Pozo S, Torrealba Palacios D, Simarro Vega M, Simón Mata A. (2017). Dispositivo Absorvedor de vibraciones para catenarias rígidas bajo cubierta. España, 1 193 487. Oficina Española de patentes y marcas.



Contents lists available at ScienceDirect

Computers and Structures

journal homepage: www.elsevier.com/locate/compstruc

A procedure for validating rigid catenary models using evolutionary techniques



Montserrat Simarro, S. Postigo*, Juan A. Cabrera, Juan J. Castillo

Department of Mechanical Engineering, Thermal and Fluid Mechanics, University of Malaga, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 28 May 2019

Accepted 25 October 2019

Available online 21 November 2019

Keywords:

Overhead conductor rail
Finite element
Experimental modal analysis
Evolutionary algorithms
Rigid catenary
Genetic algorithm

ABSTRACT

This paper describes a method to validate rigid catenary finite element models from modal tests. The model parameters are obtained by means of an optimization process using evolutionary techniques. The validation of rigid catenary sections is a complicated process due to the large number of parameters to be tuned. Three different scenarios have been studied to reproduce the most common assemblies of real rigid catenary sections. The performance of the algorithm has been evaluated using 45 virtual models of rigid catenary assemblies with section lengths from 48 up to 480 m and span lengths ranging from 8 to 12 m. The influence of errors in the installation of the supports has also been studied. In all cases, the algorithm has demonstrated its effectiveness in providing the correct model parameters even when a singularity in some of its supports has been introduced. According to the results, the proposed method is a valid tool to validate rigid catenary mathematical models.

© 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Nowadays, railway traction is commonly carried out by electric motors that are fed by pantograph-catenary contact. The overhead contact system (OCS) or conventional catenary is the most widespread power system in medium and long distances, while the rigid overhead catenary (ROC) is the most widely used system in underground metropolitan areas. ROC has important advantages compared to OCS. Among them are robustness, safety during operation, easy assembly and low maintenance costs. Despite the fact that the first patents date back to more than 40 years ago [1–3], ROC is a recent product from a technological point of view. The main problems associated with ROC have not been studied. Few research groups have been involved in the development of this technology. Some of the problems to be solved are improving the pantograph-rigid catenary interaction and increasing the limits in its operational speed.

At present, many installations show an inadequate functioning due to poor contact between the pantograph and the ROC, which affects electrical feeding. It is well known that contact forces fluctuate between 0 and 300 N, with a mean value of around 120 N.

Low contact forces are related to the appearance of electrical arcs and local surface melting. As a consequence, local loss of material and an increase in roughness and the friction coefficient are also observed. On the other hand, high forces increase friction wear. Both phenomena cause excessive and heterogeneous wear of the contact wire and the pantograph registration strips. Consequently, it would be necessary to know the dynamic behavior of the interaction between the pantograph and the ROC to mitigate the problem, which requires a thorough knowledge of the whole system.

Research conducted on the OCS has focused on topics such as the modeling of the interaction between the pantograph and the catenary [4–8], as well as the study of interaction with different types of pantographs or different configurations [6,8–10]. As it has been shown, OCS has been studied in depth by several research groups who have addressed the main problems associated with this system. However, several challenges regarding ROC need to be studied and solved to extend its use.

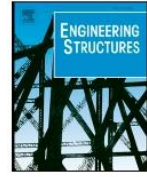
To the best of our knowledge, there are not many research papers related to ROC that contemplate the validation of the models used. C. Vera et al. [11] designed a new ROC cross section with improved performance compared to previous existing systems, allowing higher speeds and longer distances between supports. A. Bautista et al. [12] presented an algorithm to perform co-simulation between a pantograph and a ROC. The pantograph was modeled by a multibody procedure and the ROC by means of finite elements. The algorithm allowed optimizing both the design of the infrastructure and the configuration of pantographs.

* Corresponding author at: Departamento de Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos [Department of Mechanical Engineering, Thermal and Fluid Mechanics], Universidad de Málaga, Escuela de Ingenierías, C/ Doctor Ortiz Ramos S/N, Campus de Teatinos, 29071 Málaga, Spain.

E-mail addresses: msimarro@uma.es (M. Simarro), spostigo@uma.es (S. Postigo), jcabrera@uma.es (J.A. Cabrera), juancas@uma.es (J.J. Castillo).

<https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2019.106145>
0045-7949/© 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved.





Analysis of contact forces between the pantograph and the overhead conductor rail using a validated finite element model



Montserrat Simarro, S. Postigo*, Maria Prado-Novoa, A. Pérez-Blanca, Juan J. Castillo

Department of Mechanical Engineering, Thermal and Fluid Mechanics, University of Malaga, Spain

ARTICLE INFO

Keywords:

Contact forces
Overhead conductor rail (OCR)
Rigid overhead line
Pantograph
Finite element
Experimental modal analysis
Evolutionary algorithms
Genetic algorithm
Dynamic interaction

ABSTRACT

This work presents the study of the interaction between 11 models of pantographs and 2 models of overhead conductor rails (OCR). All the models have been analysed at speeds of 70, 100 and 130 km/h. Furthermore, one of the OCR models used to carry out this study has been previously validated with experimental modal tests. The contact forces between each pantograph and catenary model is obtained in all cases. The analysis of the results reveals the contact forces are influenced by the dispersion in the length of the spans of the OCR sections and the pantograph model for speeds above 100 km/h. Thus, if pantograph resonance is not present, the lower the dispersion, the more constant the forces are. On the contrary, span length variations and the pantograph model have little influence on contact forces at low speeds. In addition, contact forces increase in the transitions between two sections of the overhead conductor rail. This phenomenon becomes more noticeable as the speed of pantograph operation increases.

1. Introduction

The Overhead Conductor Rail (OCR) system is commonly used as a power supply system for trains in railway infrastructures. This system was patented in 1972 by the French firm Delachaux [1]. It has mainly been used in tunnels, for urban and suburban facilities for more than 40 years. The OCR has several advantages compared to the conventional Overhead Catenary System (OCS). Among them, we can highlight:

- greater robustness and lower maintenance costs
- reduced installation height requirements
- its large cross-section allows high electrical currents and a better cooling in the event of overheating
- the absence of tensile forces allows a greater use of the contact wire
- it avoids risk situations caused by the breaking of the contact wire in confined areas.

However, one of the main drawbacks of OCRs is related to poor performance at high operational speeds. This is due to higher contact force oscillations during the interaction between the OCR and the pantograph compared to OCS, which gives rise to unwanted wear of the

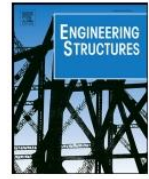
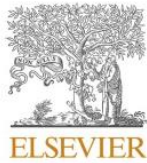
contact wire and the pantograph strips. Besides, shorter span lengths are also required in OCR facilities. Despite these drawbacks, the advantages of OCRs are relevant enough to consider delving into the knowledge of its behaviour. This is why many research groups are putting a lot of effort into studying the OCR and extend the use of this power feeding system. Thus, C. Vera et al. [2] designed a new OCR cross section with improved performance compared to previous existing systems, allowing higher speeds and longer distances between supports. A. Bautista et al. [3] presented an algorithm to perform co-simulation between a pantograph and an OCR. Calleja et al. [4] presented the design, development and validation of a tuned mass damper prototype. Mak Man [5] studied the acceptable dynamic performance of the overhead rigid conductor rail and pantograph interface for line operating speeds up to 130 km/h. Takemura et al [6] installed a 100 m aluminium overhead rigid conductor line T-type cross section and carried out tests in order to study the effect of span length, expansion joint structures and pantograph type on the current collection performance. Oya et al [7] measured the quality of current collection in a new rigid conductor line applicable to moderately high speed operation. Carnevale et al [8] carried out numerical simulations of a healthy and a defective line to address the problem of signature definition for the identification of defects in a rigid overhead contact line. Despite the

* Corresponding author at: Departamento de Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos [Department of Mechanical Engineering, Thermal and Fluid Mechanics], Universidad de Málaga [University of Malaga], Escuela de Ingenierías [School of Engineering], C/ Doctor Ortiz Ramos S/N, Campus de Teatinos, 29071 Málaga, Spain.

E-mail addresses: msimarro@uma.es (M. Simarro), spostigo@uma.es (S. Postigo), maria.prado@uma.es (M. Prado-Novoa), anaperez@uma.es (A. Pérez-Blanca), juancas@uma.es (J.J. Castillo).

<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111265>

Received 19 December 2019; Received in revised form 19 June 2020; Accepted 17 August 2020
0141-0296/ © 2020 Elsevier Ltd. All rights reserved.



Evaluation of the influence of the speed, preload and span length on the contact forces in the interaction between the pantograph and the overhead conductor rail

Montserrat Simarro, Juan J. Castillo, Juan A. Cabrera, S. Postigo*

Department of Mechanical Engineering, Thermal and Fluid Mechanics, University of Malaga, Spain

ARTICLE INFO

Keywords:

Contact forces
Overhead conductor rail (OCR)
Rigid overhead line
Speed
Span length
Preload
Pantograph
Dynamic interaction

ABSTRACT

The Overhead Conductor Rail is one of the methods to transmit energy to a moving train. This power feeding system has some advantages compared to the conventional overhead catenary system. However, its use is still mainly limited to underground and tunnel train infrastructures, probably due to a lack of knowledge of the performance of this method in some operating conditions. This work is devoted to the study of the influence of the speed, preload, and span length on the contact forces in the interaction between the pantograph and the overhead conductor rail. Three different lumped-element models of commercially available pantographs and a finite element model of the overhead conductor rail have been used to carry out the simulations. The contact forces between each pantograph and the catenary have been obtained in all cases. The analysis of the results reveals that the higher the speed and span length are the higher the contact force fluctuations are. On the contrary, the increase in the preload leads to lower contact force oscillations provided no resonance effects are present.

1. Introduction

The Overhead Conductor Rail (OCR) system was patented in 1972 by the French firm Delachaux [1]. This power system has gained attraction in recent times. Recent studies have contributed to achieving a better knowledge of this power supply system for trains. However, despite these recent advances, its use is still mainly confined to tunnels for urban and suburban facilities. On one hand, OCR drawbacks are related to the scarce use of this system compared to conventional Overhead Catenary Systems (OCS). Among them, we can mention:

- poor performance at high speed
- higher initial cost of installation in open routes
- shorter span length
- less knowledge of the behaviour of this system compared to OCS

On the other hand, OCR has several advantages compared to the conventional Overhead Catenary System (OCS). Some of them are the following:

- greater robustness and lower maintenance costs
- reduced installation height requirements
- its large cross-section allows high electrical currents and better cooling in the event of overheating
- the absence of tensile forces allows greater use of the contact wire
- it avoids risk situations caused by the breaking of the contact wire in confined areas.

These advantages are relevant enough to consider OCR as a feasible solution in many new installations. However, a better knowledge of the performance of OCR and its interaction with the pantograph is required. Compared to OCS, fewer studies have been devoted to these kinds of facilities. In recent times, some research groups have been making big efforts to study the OCR to extend the use of this power feeding system. This paper is devoted to evaluating operational and design factors that have a big influence on the behaviour of OCR. These factors are speed, preload, and span length.

Most OCR facilities have been installed in low to medium speed rails. As mentioned before, the poor performance of pantograph-OCR

* Corresponding author at: Departamento de Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos [Department of Mechanical Engineering, Thermal and Fluid Mechanics], Universidad de Málaga [University of Malaga], Escuela de Ingenierías [School of Engineering], C/ Doctor Ortiz Ramos S/N, Campus de Teatinos, 29071 Málaga, Spain.

E-mail addresses: msimarro@uma.es (M. Simarro), juancas@uma.es (J.J. Castillo), jcabrera@uma.es (J.A. Cabrera), spostigo@uma.es (S. Postigo).

<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112678>

Received 23 December 2020; Received in revised form 13 May 2021; Accepted 3 June 2021

Available online 13 June 2021

0141-0296/© 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE
INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



iMMA
Ingeniería Mecánica Málaga

UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



Tesis Doctoral

Autora: Montserrat Simarro Vega

Email: msimarro@uma.es