



**Alberto Carnicero López**

Doctor Ingeniero Industrial. Profesor del Departamento de Ingeniería Mecánica e Investigador en el Instituto de Investigación Tecnológica de la ET-SI-ICAI. Sus campos de conocimiento están relacionados con la aplicación de métodos numéricos a la resolución de problemas de dinámica de estructuras y mecánica de medios continuos.



**Jesús R. Jiménez Octavio**

Ingeniero del ICAI de la promoción de 2004. Actualmente es Investigador en Formación en el Instituto de Investigación Tecnológica.



**Oscar López García**

Doctor Ingeniero Industrial. Profesor del Departamento de Ingeniería Aeroespacial de la Universidad de Sevilla. Sus campos de conocimiento son aerodinámica de alas rotantes, energía eólica, la mecánica del medio continuo, mecánica de la fractura y fatiga, materiales inteligentes y el método de los elementos finitos.

**Comentarios a:**  
[comentarios@icai.es](mailto:comentarios@icai.es)



## Técnicas computacionales aplicadas al estudio del sistema de captación de energía en sistemas ferroviarios

Los sistemas de transporte actuales presentan cada vez requisitos más exigentes en todos los ámbitos. Desde la puntualidad a la calidad del servicio a bordo o desde la eficiencia energética al impacto medio ambiental se requieren cada día mayores prestaciones. El aumento de estas exigencias se plasma claramente en los Planes Nacionales de Investigación que presentan subprogramas específicos para transporte ferroviario. Estos subprogramas se marcan como objetivos el incremento de competitividad y rentabilidad, la mejora de la seguridad, el desarrollo de técnicas avanzadas de fabricación, operación o mantenimiento. Estos objetivos se pretenden alcanzar mediante el desarrollo de unas líneas temáticas prioritarias entre las que se incluyen la investigación sobre los sistemas de captación de energía y el desarrollo de herramientas avanzadas.

Dentro del contexto en el campo de los sistemas ferroviarios, este artículo presenta algunos de los trabajos realizados por los autores empleando diferentes modelos avanzados de computación. Los trabajos se centran básicamente en el estudio del sistema de captación de energía catenaria-pantógrafo desde muy diversos puntos de vista.

### Técnicas de optimización mediante algoritmos evolutivos

Actualmente, la optimización multidisciplinar juega un papel fundamental en el campo de la ingeniería en general y de la ferroviaria en particular. El objetivo es el de lograr diseños con el menor coste posible cumpliendo las restricciones técnicas, económicas, de mantenibilidad, etc. exigidas en cada momento. En el ámbito de la optimización multiobjetivo la literatura científica recoge numerosos trabajos, resaltando la idoneidad de las técnicas evolutivas y algoritmos metaheurísticos como

posibles vías de solución de este tipo de problemas, ver [1].

Entre las numerosas aplicaciones en las que la optimización del diseño tiene cabida en el sector ferroviario, se presentan aquí algunos resultados de aplicación a la electrificación aplicada a trenes de alta velocidad. Este caso conjuga un alto interés práctico, para el diseño real, y académico, por la complejidad que conlleva su resolución. Concretamente, el problema es el de la optimización eléctrica y mecánica de catenarias, el cual resulta un problema de optimización no lineal entera, que tal y como se justifica [2] favorece

la aplicación de técnicas basadas en algoritmos evolutivos. EL problema se puede abordar de forma acoplada mediante el empleo de algoritmos genéticos, tal y como se explica con detalle en [3].

Así, esta técnica se ha empleado para la optimización conjunta de postes y posición de conductores de una línea de alta velocidad (Figura 1) alimentada con un sistema 2x25 kV, buscando obtener el mínimo peso y mínima impedancia de la línea. Las variables de diseño consideradas son los tipos de conductor eléctrico y las secciones transversales de las distintas vigas y barras que componen el soporte estructural de la misma (poste y ménsulas). Por otra parte, para la optimización de la configuración se consideran como variables de diseño las posiciones geométricas de los conductores y los elementos del poste. Las configuraciones inicial y óptima se muestran en la Figura 2.

El acoplamiento de las optimizaciones eléctrica y mecánica, por una parte, y de sus componentes de dimensionamiento y configuración, por otra, tiene lugar en el seno de un algoritmo genético con núcleo estándar, aunque se han introducido algunas particularidades en la programación del mismo, ver [4]. La función objetivo empleada para la minimización global del material empleado relaciona las variables de diseño mencionadas previamente y las restricciones de la línea eléctrica y los soportes: las corrientes máximas por los distintos conductores, satisfacción de la demanda eléctrica de los trenes y limitaciones geométricas de distancias entre conductores y entre conductores y tierra especificadas en los estándares y normas al respecto; y las tensiones mecánicas máximas en el poste y las ménsulas además de la garantía de estabilidad en el soporte estructural.

La configuración óptima que determina el algoritmo genético es la que muestra la Figura 2, la cual es notablemente cercana a la inicial. Sin duda esto responde a la mayor ponderación del coste del material estructural frente a los otros criterios acoplados, de tal forma que la búsqueda converge a una configuración esencialmente de menor peso (Figura 3). A pesar de la dificultad del problema matemático por la no linealidad del mismo y las variables acopladas, la configuración óptima se alcanza en pocas generaciones y el coste computacional es asumible para un PC.

Figura 1. Configuración típica de catenaria

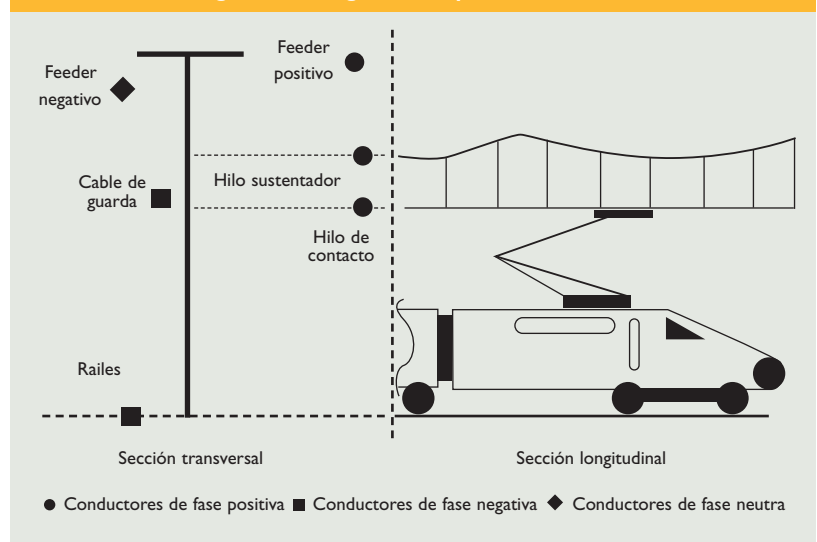
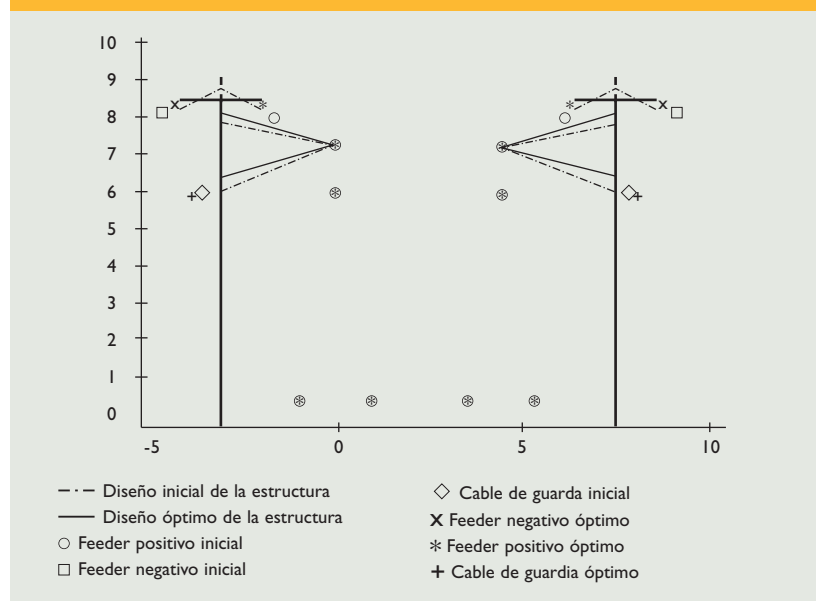


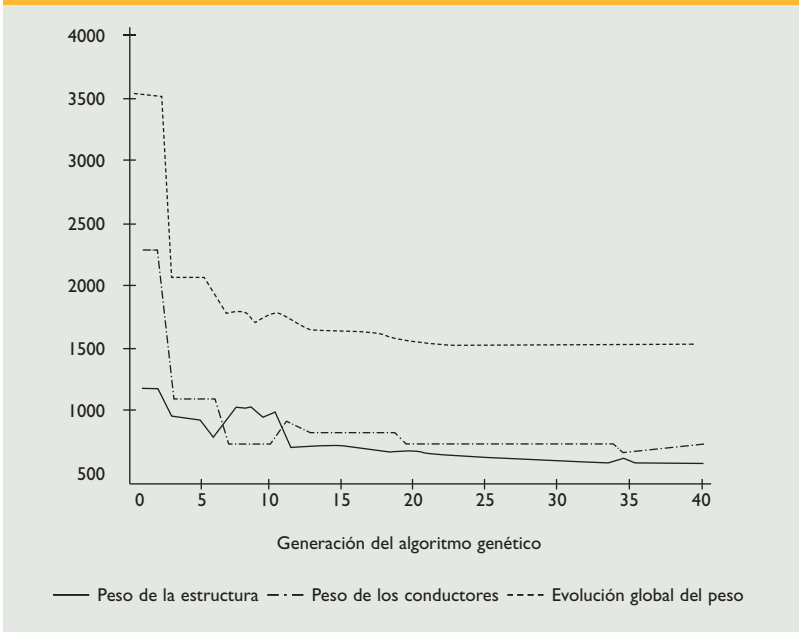
Figura 2. Configuración electromecánica inicial y óptima



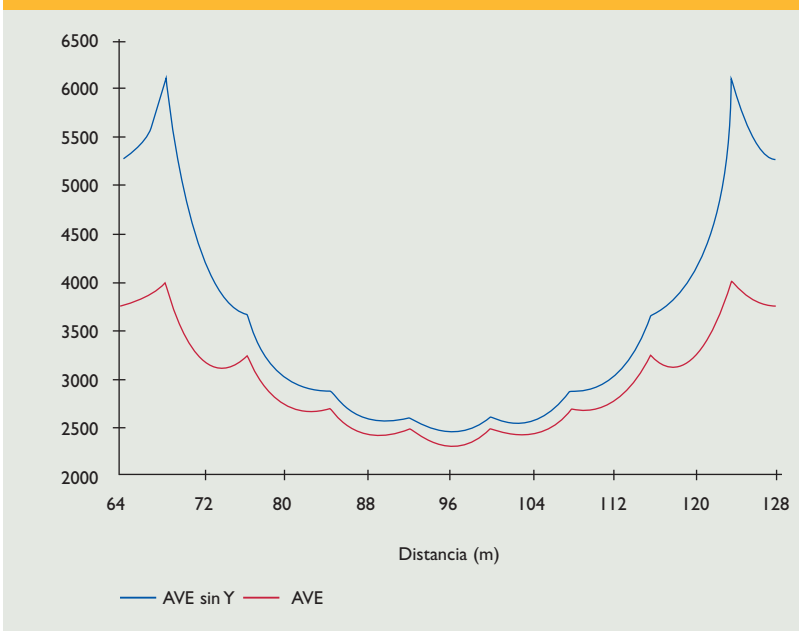
### Simulación del comportamiento estático de la catenaria

Existen una gran variedad de problemas científico-tecnológicos asociados a las catenarias ferroviarias. El primer problema técnico que uno debe abordar a la hora de diseñar una catenaria es el dimensionamiento del pendolado. Desde un punto de vista de cálculo de estructuras, éste constituye un caso de los llamados problemas de equilibrio inicial. Al contrario que en los problemas clásicos de estructuras donde la estructura de referencia es conocida, los problemas de equilibrio inicial requieren la definición de la geometría inicial y de las tensiones internas en la estructura que son a priori desconocidas.

**Figura 3. Evolución del peso de la estructura y los conductores en el proceso de optimización**



**Figura 4. Rigidez estática de la catenaria AVE**



Esto hace que las técnicas de cálculo por elementos finitos, que se muestran tremendamente eficientes en otros campos, presenten problemas de convergencia y poca robustez cuando se emplean en este tipo de cálculos. El problema se ha resuelto tradicionalmente empleando aproximaciones de tipo parabólico y diversas hipótesis sobre la posición de los extremos de la catenaria. Hoy en día el problema de equilibrio inicial de la determinación del pendolado puede

resolverse mediante la formulación exacta de la ecuaciones de la catenaria y la resolución del problema no lineal resultante [5]. Mediante esta técnica se puede realizar el cálculo del pendolado de seccionamientos, cantones no uniformes, u obtener la rigidez estática de una catenaria sin tener que realizar hipótesis simplificadoras en cuanto al comportamiento de la misma. La Figura 4 muestra la rigidez estática de la catenaria AVE y de esta misma catenaria sin falso sustentador; en ella se aprecia claramente el efecto regularizador del falso sustentador respecto de la rigidez estática de la catenaria.

### Modelos para la simulación del comportamiento dinámico del sistema catenaria-pantógrafo

La simulación de la interacción dinámica entre la catenaria y el pantógrafo es otro problema que presenta gran interés desde diversos puntos de vista. Desde el punto de vista puramente tecnológico el contacto entre el patín del pantógrafo y la catenaria es clave para un buen suministro eléctrico al material rodante. La simulación y el análisis del fenómeno permite mejorar el diseño de pantógrafos y obtener catenarias que pueden ser circuladas a velocidades más elevadas sin que aparezcan despegues entre los dos elementos u obtener mejores diseños (ya sea por simplicidad de montaje, disminución de costes, etc.) de las catenarias existentes. En cambio, desde una perspectiva computacional la simulación resulta compleja y costosa de modelar. El método más extendido para realizar este tipo de simulaciones es el método de los elementos finitos, sin embargo, este método resulta computacionalmente costoso si se quieren realizar análisis de sensibilidad, estudios paramétricos o cálculos preliminares [6]. Por esto motivo se han desarrollado modelos simplificados que tratan de capturar gran parte de la física del problema, y por lo tanto obtener resultados muy razonables sin ser computacionalmente muy exigentes.

Dada la importancia que ha adquirido la simulación de la interacción dinámica catenaria-pantógrafo en el proceso de diseño de nuevas catenarias, CELENEC elaboró la norma EN-50318 para la validación de programas de simulación de la interacción dinámica. Por otro lado, la nueva Especificación Técnica de Interoperabilidad (ETI), exige la simulación del comportamiento del sistema catenaria-pantógrafo con programas validados según la norma anterior.

## Modelos simplificados

Básicamente la mayoría de los modelos simplificados que existen representan la catenaria como un sistema de masa y rigidez variable y el pantógrafo como un sistema masa-muelle-amortiguador de uno o dos grados de libertad (Figura 5). Son por lo tanto sistemas unidimensionales en los que básicamente se pierde información sobre la propagación de ondas transversales en el hilo de contacto. La descripción de la variación de rigidez y masa y el método de contacto empleado son claves para una formulación realista del problema tal y como se pone de manifiesto en [7] al comparar resultado con [8]. Estos modelos pueden aportar información de tipo cualitativo y cuantitativo sobre el comportamiento de la catenaria.

En la Figura 6 se presenta la comparación entre los resultados obtenidos con un modelo simplificado como el de la Figura 5 y un modelo matemático completo desarrollado en [9]. Como se puede ver, las tendencias en las fuerzas de contacto están perfectamente capturadas por este modelo y el tiempo de simulación es de varios ordenes de magnitud menor. Empleando estos modelos se puede predecir con relativa exactitud el valor de la fuerza de contacto máxima en función de la velocidad de circulación, en un cálculo de apenas un minuto, identificando las velocidades a las que se puede realizar un estudio mas detallado con modelos mas complejos (Figura 7).

Existen otro tipo de modelos simplificados, más complejos que los unidimensionales comentados hasta ahora, y que intentan resolver el principal problema de éstos: el modelado de la propagación de las ondas transversales [10]. Estos modelos se encuentran a caballo entre los completos de elementos finitos y los sencillos de masas y muelles unidimensionales variables con el tiempo. La Figura 8 muestra uno de estos modelos, apreciando cómo las péndolas y el hilo sustentador se sustituyen por muelles que recogen la información de rigidez y de masa existente en esos puntos del hilo de contacto. La principal ventaja es que reducen el tiempo de cálculo, respecto a los modelos completos, y recogen más fielmente la física del problema que los modelos unidimensionales. Los resultados (Figura 9) se asemejan bastante a los obtenidos mediante el modelo complejo propuesto por [9].

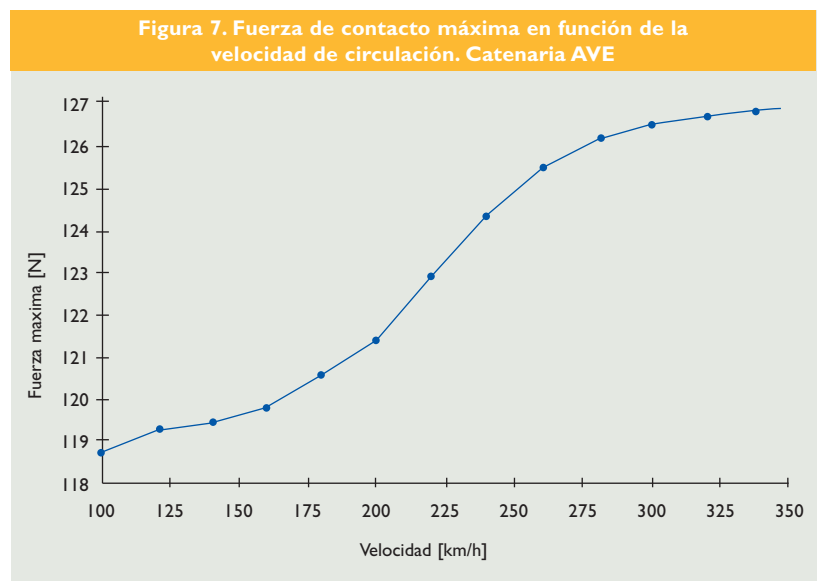
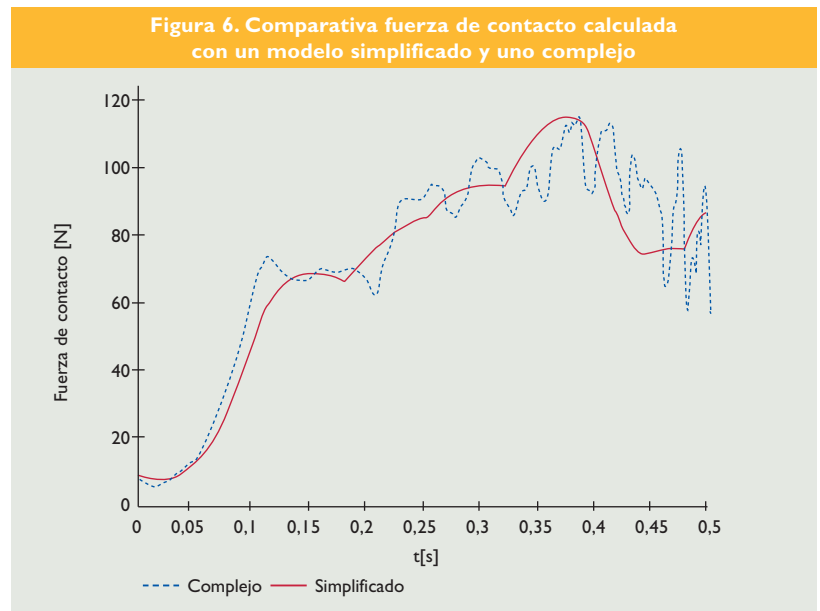
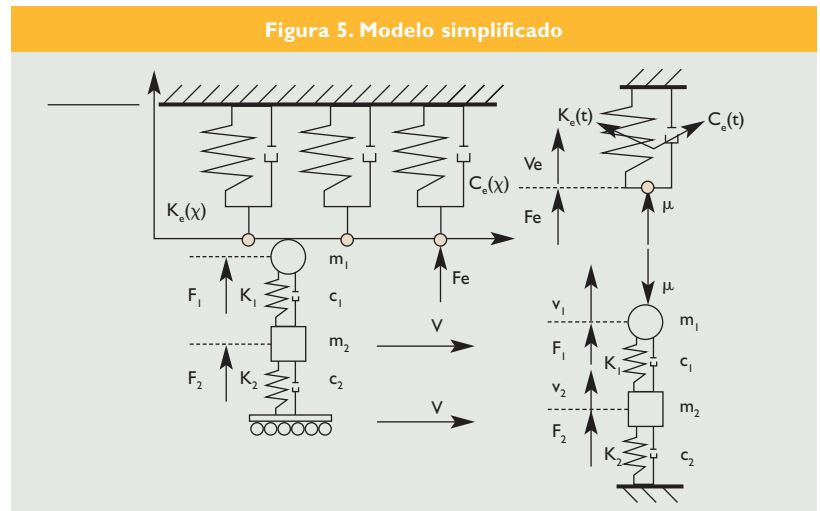


Figura 8. Modelo simplificado bidimensional

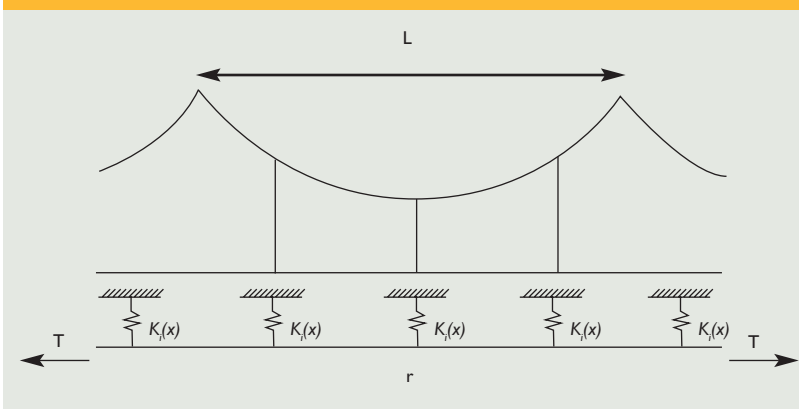


Figura 9. Comparativa modelo simple bidimensional con modelo complejo

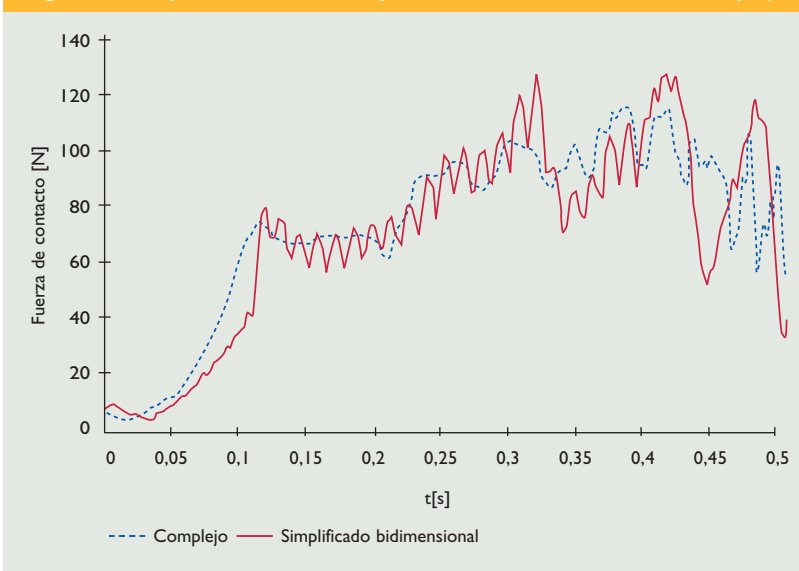
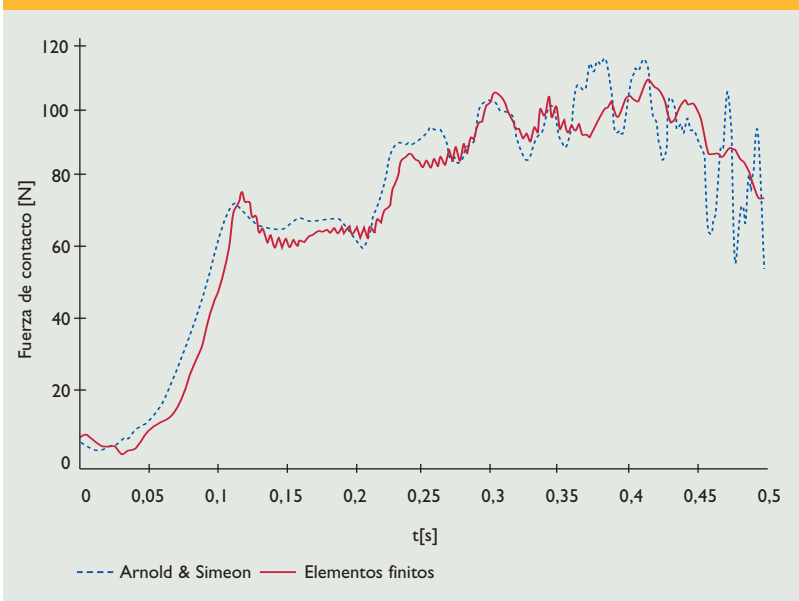


Figura 10. Comparativa elementos finitos modelo propuesto por [9]



## Modelos completos

Tal y como se ha dicho anteriormente, la mayoría de los modelos completos que se utilizan emplean la técnica de los elementos finitos. No obstante, y de forma especialmente incipiente en los últimos años, existen otras formas de afrontar la resolución de este problema mediante soluciones analíticas [11], planteamientos de dinámica multicuerpo [12] o resolución de sistemas de ecuaciones diferenciales algebraicas [9]. Esta última herramienta ha sido empleada para contrastar los diferentes modelos que se presentan en este artículo. La limitación principal de estos nuevos métodos tiene que ver con las condiciones de contorno empleadas para la integración de las ecuaciones diferenciales que modelan el problema. Éstas no siempre coinciden con las existentes en las catenarias reales y a día de hoy los métodos propuestos no son suficientemente flexibles como para su empleo de forma generalizada. Por ello, cabe prever que el método de los elementos finitos permanecerá durante muchos años como el único método 'industrialmente empleado' para este tipo de simulaciones.

El principal problema de los modelos de elementos finitos es su elevado coste computacional. En un potente PC actual, la simulación del comportamiento de todo un cantón puede consumir de 8 a 10 horas de cálculo. Estos tiempos de cálculo aunque resultan perfectamente asumibles en las fases finales del diseño, resultan completamente inadmisibles en las fases preliminares del mismo.

Como ya se ha mencionado, un problema subyacente al empleo del método de los elementos finitos es que estos no resultan apropiados para la resolución de problemas de equilibrio inicial. Esto hace que el tiempo de computación, ya de por sí elevado, se incremente por la necesidad de resolver este problema. Los autores de este artículo han desarrollado un algoritmo híbrido (semianalítico-elementos finitos) que reduce sustancialmente el tiempo de cálculo (Figura 11) de una malla de elementos finitos solución del problema de equilibrio inicial y permite por lo tanto abordar directamente el problema de la interacción dinámica [13].

Para la realización del modelo de elementos finitos se emplean elementos tipo barra con una formulación basada en grandes desplazamientos para el modelado de las péndolas y, a veces, del hilo sustentador;

Figura 11. Tiempo de cálculo del equilibrio inicial en función del número de elementos del empleando elementos finitos y utilizando la formulación propuesta en [9]

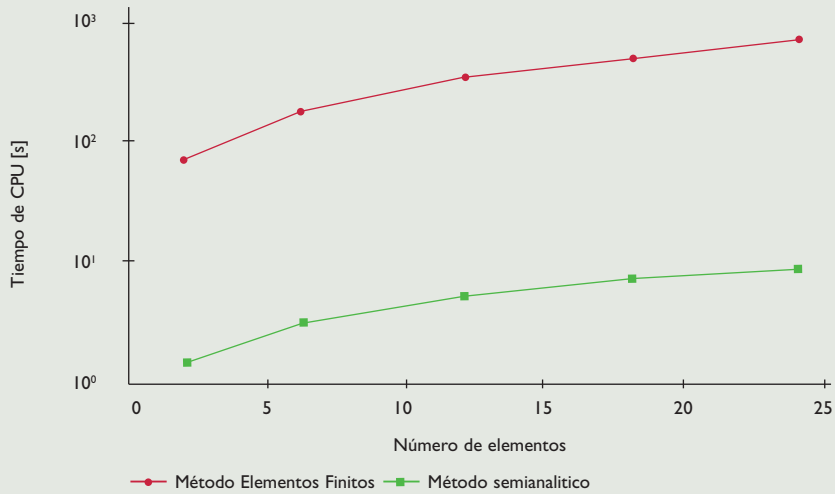


Figura 12. Desgaste en función de la fuerza de contacto y la intensidad

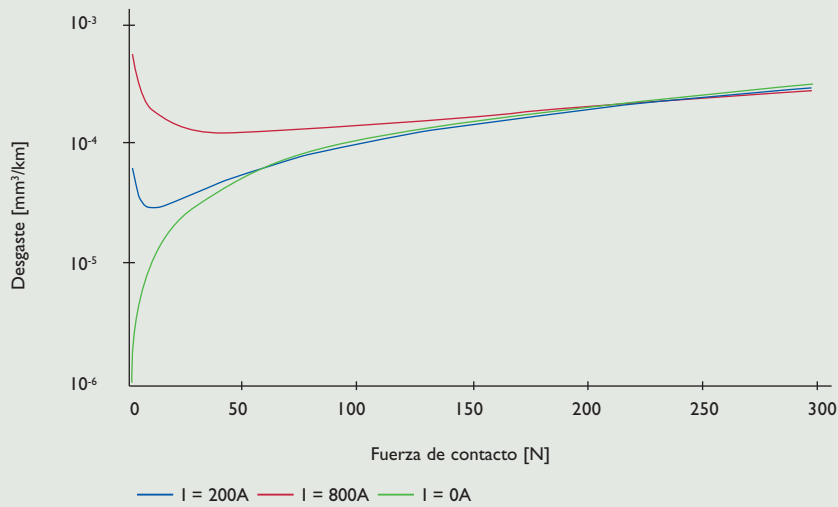
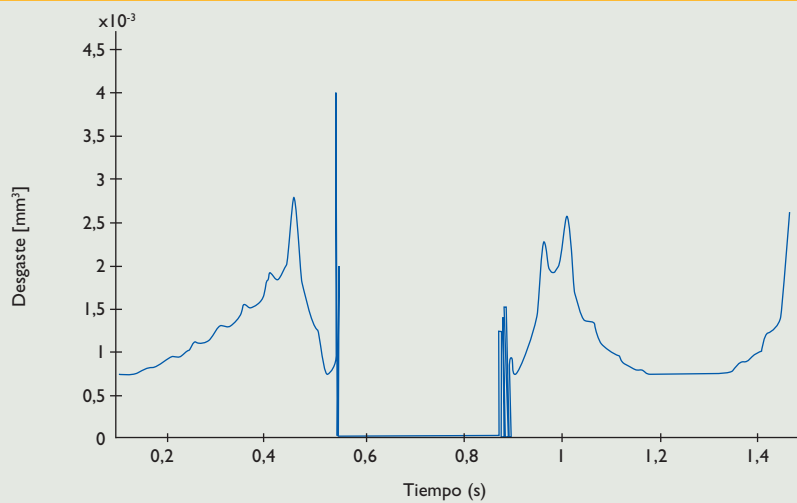


Figura 13. Valores de desgaste en un cantón con pérdida de contacto



y elementos tipo viga con grandes desplazamientos para el modelado del hilo de contacto. Dado el bajo momento inercia de los cables la matriz de rigidez resulta en numerosas ocasiones mal condicionada, lo que dificulta la búsqueda de la solución. Todo ello da lugar a un problema dinámico no lineal de tipo geométrico que introduce además una no linealidad adicional de tipo contacto entre el pantógrafo (modelado casi siempre como un sistema de masas y muelles) y el hilo de contacto.

### Evaluación de desgaste

El mecanismo de desgaste en el sistema catenaria pantógrafo presenta la particularidad de que a través del par de contacto está circulando una corriente eléctrica. Esto hace que si la fuerza de contacto disminuye en exceso, a parte de la posible interrupción del suministro eléctrico, se produzcan arcos eléctricos entre la catenaria y el patín del pantógrafo con un gran desgaste de ambos elementos. Si la fuerza de contacto es excesiva el propio rozamiento mecánico y sus mecanismos de desgastes asociados serán los responsables del desgaste del par (Figura 12).

Existen diversos modelos que permiten estimar el contacto en función de la intensidad de corriente eléctrica y la fuerza de contacto, ver por ejemplo [14]. Como todo modelo numérico, los resultados obtenidos pueden facilitar información que permita tomar decisiones de cara al diseño o a la estimación de parámetros de operación. La Figura 13 presenta el valor del desgaste en un vano de una catenaria empleando el modelo definido en [14], como se puede apreciar en los momentos de en los que se pierde y recupera el contacto, aparecen picos de desgaste muy acusados debido a la aparición de arcos eléctricos.

### Agradecimientos

Los resultados que se exponen en este artículo han sido obtenidos en proyectos financiados parcialmente por el Ministerio de Educación y Ciencia, Ministerio de Fomento y la Sociedad Española de Montajes Industriales (SEMI). En el desarrollo de las diversas herramientas, además de los autores del artículo han participado a lo largo de varios años en mayor o menor medida otras muchas personas: José Luis Galindo, Cristina Asenjo, Víctor Torres, José Luis Maroño, Sabino Ochandiano, Miguel Such y Pablo Ayala, nuestro agradecimiento a todos ellos. Tam-

bién quisiéramos agradecer a los profesores M. Arnold (German Aerospace Centre) y B. Simeon (TU Darmstadt) los resultados facilitados para la contrastación de los diferentes modelos. ■

### Bibliografía

- [1] C.A.C. Coello, "An updated survey of evolutionary multiobjective optimization techniques: state of the art and future trends", presented at Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99 (Cat. N° 99TH8406), USA. Piscataway, NJ, 1999.
- [2] M. Papadrakakis, Y. Tsompanakis, and N. D. Lagaros, "Structural Shape Optimization Using Evolution Strategies", *Engineering Optimization*, vol. 31, pp. 515-40, 1999.
- [3] J.R. Jiménez-Octavio, O. López-García, E. Pilo and A. Carnicero, "Coupled Electromechanical Optimization for Power Transmission Lines," *Computer Modeling in Engineering and Sciences*, Submitted for publication.
- [4] J.R. Jiménez-Octavio, E. Pilo, O. López-García and A. Carnicero, "Coupled Electromechanical Cost Optimization of High Speed Railway Overhead," presented at Proceedings of the Joint Rail Conference, Atlanta, USA, 2006.
- [5] O. López-García, A. Carnicero and V. Torres. "Computational of the Initial Equilibrium of Railway Overheads Based on the Catenary Equation". *Engineering Structures*. 28, 1387-1394. 2006.
- [6] A. Carnicero, O. López-García, J.L. Maroño. "Modelo simplificado para la simulación de la interacción dinámica catenaria-pantógrafo". *Anales de Mecánica y Electricidad*. LXXXIII - III. Mayo-Junio. 30-35. 2006.
- [7] O. López-García, A. Carnicero, J.L. Maroño. "Influence of Stiffness and Contact Modelling on Catenary-Pantograph System Dynamics". *Journal of Sound and Vibration*. 299, 806-821. 2007.
- [8] T.X. Wu, M.J. Brennan, "Basic Analytical Study of Pantograph-Catenary System Dynamics", *Vehicle System Dynamics* 30, 443-56. 1998.
- [9] M. Arnold, B. Simeon, "Pantograph and Catenary Dynamics: A Benchmark Problem and its Numerical Solution", *Applied Numerical Mathematics* 34 (4), 345-62. 2000.
- [10] T.X. Wu, M.J. Brennan, "Dynamic Stiffness of a Railway Overhead Wire System and its Effect on Pantograph-Catenary System Dynamics", *Journal of Sound and Vibration* 219 (3) 483-502. 1999.
- [11] A.V. Metrikine, A.L. Bosch. "Dynamic Response of a Two-Level Catenary to a Moving Load. *Journal of Sound and Vibration*. 292, 676-693. 2006.
- [12] A. Shabana, J.R. Sany, "A Survey of Rail Vehicle Track Simulations and Flexible Multibody Dynamics", *Nonlinear Dynamics* 26, 179-210. 2001.
- [13] A. Carnicero, O. López-García, V. Torres, J.R. Jiménez-Octavio. "An Algorithm Based on Finite Element Method and the Catenary Equation to Compute the Initial Equilibrium of Railway Overhead". Proceedings of the Eighth International Conference on Computational Structures Technology. Las Palmas. 2006.
- [14] A. Collina, S. Melzi, A. Facchinetti. "On the Prediction of Wear of Contact Wire in OHE Lines: A Proposed Model. *Vehicle System Dynamics Supplement*, 37, 579-592. 2002.