

DINACAT 1.0. Análisis mediante elementos finitos del acoplamiento dinámico catenaria-pantógrafo en líneas ferroviarias

JOSÉ ANTONIO FERNÁNDEZ MERODO (*); MANUEL PASTOR PÉREZ (**); JOSÉ CARRILLO (***)

RESUMEN El trabajo propuesto tiene como objeto analizar el comportamiento del sistema mecánico catenaria-pantógrafo. Se presenta un modelo numérico que simula en el tiempo la interacción entre ambos sistemas. Se estudia de esta manera el número y el tiempo de pérdidas de contacto entre línea de contacto y pantógrafo para garantizar, en el caso de circulaciones a alta velocidad, la correcta transmisión de corriente, manteniendo, por otra parte, un desgaste aceptable tanto en la línea como en el pantógrafo.

DINACAT 1.0, FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THE DYNAMIC CATENARY-PANTOGRAPH INTERACTION

ABSTRACT The purpose of this work is to analyse the behaviour of the mechanic system: catenary-pantograph. A numerical technique to model, in the time domain, the interaction between both systems is presented. In order to ensure the correct electric transmission, in high speed traffic, the losses of contact between the contact line and the pantograph are studied. The number of occurrences of contact losses and the time when these take place, are analyzed. The fact that the degree to which the cables and the pantograph wear out should be limited to an acceptable level, is also taken into account in the study.

Palabras clave: Catenaria; Pantógrafo; Elementos finitos; Algoritmos no lineales; Algoritmos dinámicos; Algoritmos de contacto.

1. INTRODUCCIÓN

Las condiciones de transportes actuales nos obligan a crear sistemas de transporte más rápidos y mejores. Uno de los problemas que se plantean a la hora de mejorar el ferrocarril eléctrico es el problema de la transmisión de energía; la transmisión de corriente de una línea de contacto al pantógrafo de la locomotora en el caso de circulaciones a alta velocidad es uno de los temas al que hay que dedicar una particular atención.

Para garantizar una captación satisfactoria, el número y el tiempo de pérdidas de contacto entre línea de contacto y pantógrafo no tienen que ser demasiado importantes. Toda pérdida de contacto genera además la formación de un arco voltaico y si este fenómeno se produce regularmente en puntos determinados de la catenaria, el hilo pierde sus capacidades mecánicas y eléctricas y debe ser sustituido.

El objetivo de este trabajo es el desarrollo de un modelo numérico que permita modelar el comportamiento mecánico del sistema catenaria-pantógrafo teniendo en cuenta la mayoría de factores que pueden influir en el comportamiento vibratorio de este último. Hay que crear un instrumento que

pueda simular, para una estructura de catenaria y un pantógrafo determinados, el paso de un tren y así poder obtener las apreciaciones y conclusiones necesarias sobre modificaciones constructivas sin tener que efectuar la hasta ahora necesaria, simulación real.

El modelo de los dos sistemas estudiados tiene que ser lo más general posible para acercarse lo más posible a la realidad. En este sentido, los elementos finitos pueden presentarse como una herramienta de simulación muy útil. Por ello se ha desarrollado el programa DINACAT, en el que en la actualidad se están implementando aspectos como el efecto del viento, etc.

2. ESTUDIO ESTÁTICO DE LA CATENARIA

En primer lugar, se describirá la catenaria estudiada CR220 cuyo comportamiento será a continuación modelado siendo este estudio esencial para poder continuar más tarde con el análisis dinámico y el análisis de contacto. El punto de partida es la obtención del estado de equilibrio de la catenaria, a partir del cual se realizará el estudio dinámico.

La catenaria CR220 es una catenaria simple poligonal atirantada, formada por un sustentador suspendido y dos hilos de contacto, sin péndola en Y, con flecha inicial de los hilos de contacto y regulación automática de la tensión mecánica (Figura 1).

En una primera etapa se estudian los movimientos en un plano vertical. El descentramiento lateral de ± 20 cm en todos los apoyos (del cable sustentador y de los hilos de con-

(*) Ingeniero de Caminos, Centro de Técnicas Aplicadas, CEDEX, Ministerio de Fomento.

(**) Doctor Ingeniero de Caminos, Centro de Técnicas Aplicadas, CEDEX, Ministerio de Fomento.

(***) Ingeniero Industrial, INECO.

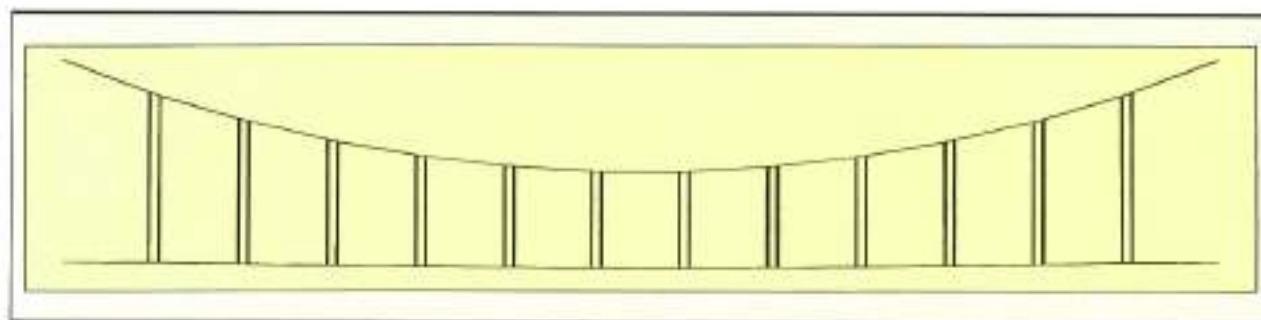


FIGURA 1. 1 vano de la catenaria CR220.

tacto) no ha sido considerado ya que su influencia en el comportamiento vibratorio vertical para una longitud de vano de 60 m es mínima.

Los hilos de contacto y el cable sustentador pueden ser representados por 2 tipos de elemento: el elemento tipo barra pretensada y el elemento tipo viga pretensada. Las péndolas son de Cu extraflexible, se representan mediante: elementos de tipo cable. Un estudio no lineal es necesario para poder introducirlos ya que estos últimos tipos de elemento sólo trabajan a tracción, las péndolas pueden quedarse desconectadas.

Condiciones de contorno: los postes situados cada 60 m, son considerados como puntos fijos del cable sustentador en el plano vertical. Si se quisiera tener en cuenta la rigidez de la consola, basta con introducir un muelle vertical que sostenga al cable sustentador. En cada extremo de los hilos de contacto y del cable sustentador se colocan las poleas de regulación de la tensión. Estas poleas son de momento modeladas por puntos fijos, ya que el pantógrafo no está en contacto con el último tramo del último vano. En realidad el estudio se hace en los vanos centrales del cantón ya que estos, como veremos, son los más representativos.

Los elementos aislantes, las grifas, pueden ser introducidos como masas puntuales. El efecto de los brazos de atirantado también puede ser incluido fácilmente.

El modelo matemático se desarrolla utilizando el método de los elementos finitos. Las ecuaciones de equilibrio estático son discretizadas en primer lugar considerando un modelo lineal clásico y a continuación, se introducen las hipótesis no lineales y se desarrolla un algoritmo no lineal.

Modelo lineal clásico:

$$[K] \cdot U = F$$

donde U es el vector con las tres componentes globales de los desplazamientos en los nodos (es de dimensión $3n$ si n es el número de nodos del elemento, 2 traslaciones y una rotación), K es la matriz de rigidez obtenida por el ensamblado y F es el vector de fuerzas aplicadas que incluye: I) el efecto de las fuerzas de masa, II) el efecto de las fuerzas de superficie, III) fuerzas puntuales aplicadas, IV) el efecto de las tensiones iniciales.

Modelo no lineal:

$$[K_t]^{(i-1)} \cdot \Delta U^{(i)} = F - F^{(i-1)}$$

con

$$U^{(i)} = U^{(i-1)} + \Delta U^{(i)}$$

donde K_t es la matriz de rigidez tangente (función también de las tensiones en los cables) y $F - F^{(i-1)}$ representa el balance entre fuerzas externas e internas.

Este modelo es un modelo iterativo que tiene que ser resuelto por un método como el de Newton-Raphson hasta obtener la convergencia de la solución deseada.

El primer objetivo del análisis es la obtención de la posición de equilibrio a partir de la cual deben efectuarse todos los cálculos posteriores.

Esta posición de equilibrio tiene que acercarse lo más posible a la posición real de la catenaria (Figura 2).

Los vanos centrales son los más representativos y en ellos la flecha es de 36 mm.

Una de las pruebas de rutina realizadas en las catenarias en funcionamiento es la obtención de los llamados diagramas de flexibilidad. Consiste en el desplazamiento debido a una carga vertical dirigida hacia arriba que recorre los hilos de contacto. De esta forma se identifican tanto las propiedades mecánicas generales como aspectos singulares como por ejemplo, puntos duros en la misma. En la Figura 3 se da un ejemplo que ilustra la flexibilidad obtenida para el caso particular estudiado.

3. ESTUDIO DINÁMICO DE LA CATENARIA

Durante el estudio dinámico las fuerzas exteriores dependen del tiempo, y el equilibrio del sistema tiene que tener cuenta tanto de las fuerzas de inercia como del amortiguamiento que disipa energía durante las vibraciones.

La ecuación de equilibrio dinámico puede escribirse ahora como:

$$M \cdot \ddot{U}(t) + C \cdot \dot{U}(t) + K \cdot U(t) = F(t)$$

donde $\ddot{U}$ y $\dot{U}$ contiene las aceleraciones y las velocidades de los nodos considerados, M es la matriz de masas y C la matriz de amortiguamiento.

El método de resolución escogido para resolver estas ecuaciones de segundo grado ha sido el método de Newmark, uno de los más utilizados por ser un método incondicionalmente estable, adecuado a problemas de propagación de ondas.

Los algoritmos de resolución han sido implementados tanto para el caso lineal como para el no lineal.

Para calcular la velocidad de propagación de una onda en la catenaria CR220 se parte del estado inicial correspondiente al equilibrio, imponiendo un desplazamiento inicial en los dos nodos céntricos de los hilos de contacto.

En la Figura 4, se da el estado de la catenaria para diferentes tiempos.

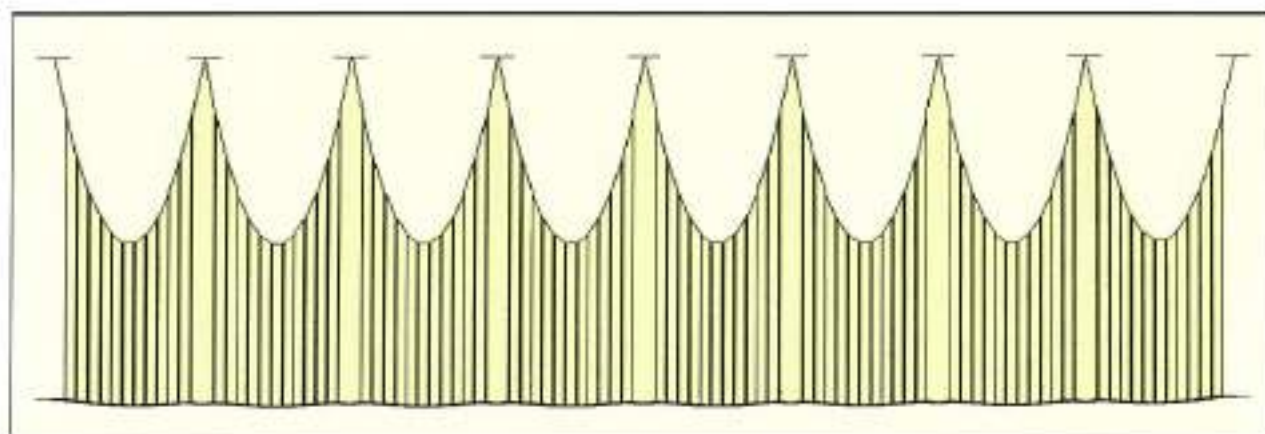


FIGURA 2. Posición de equilibrio de 8 vanos de catenaria CR220.

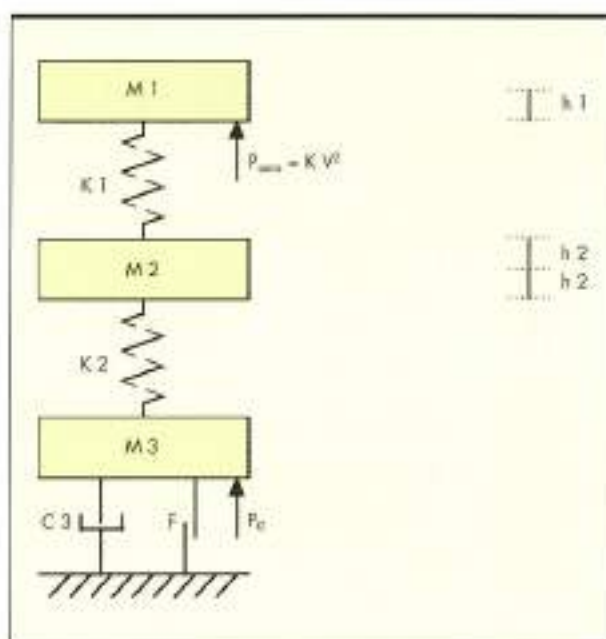
La velocidad de propagación de una onda en la catenaria CR220 calculada por el programa DINACAT es de 120 m/s, siendo esta velocidad idéntica a la obtenida por la aproximación analítica.

$$v = \sqrt{\frac{\sum \text{tensiones}}{\text{masa lineal}}}$$

4. ESTUDIO DEL PANTÓGRAFO

Los pantógrafos tienen que cumplir la misión de establecer y mantener el contacto con la catenaria. El diseño de estos pantógrafos tiene como objetivo mantener lo más constante posible la fuerza estática que estos realizan sobre la catenaria. Por eso suelen ser divididos en dos partes, una parte inferior, bastante más pasiva, que compensa las diferencias de altura de la catenaria a lo largo de grandes distancias (paso a nivel, túnel...) y una parte superior, más ligero, que tiene que amortiguar los movimientos de pequeña amplitud pero rápidos, de los hilos de contacto (imperfecciones de la altura del cable, flecha, vibraciones del techo de la locomotora, proceso de despegues...).

El pantógrafo estudiado, modelo FAIVELEY GPU, es un pantógrafo pasivo a dos pisos que se puede idealizar como un sistema con varias masas, muelles y amortiguadores:



Pantógrafo modelo Faiveley GPU.

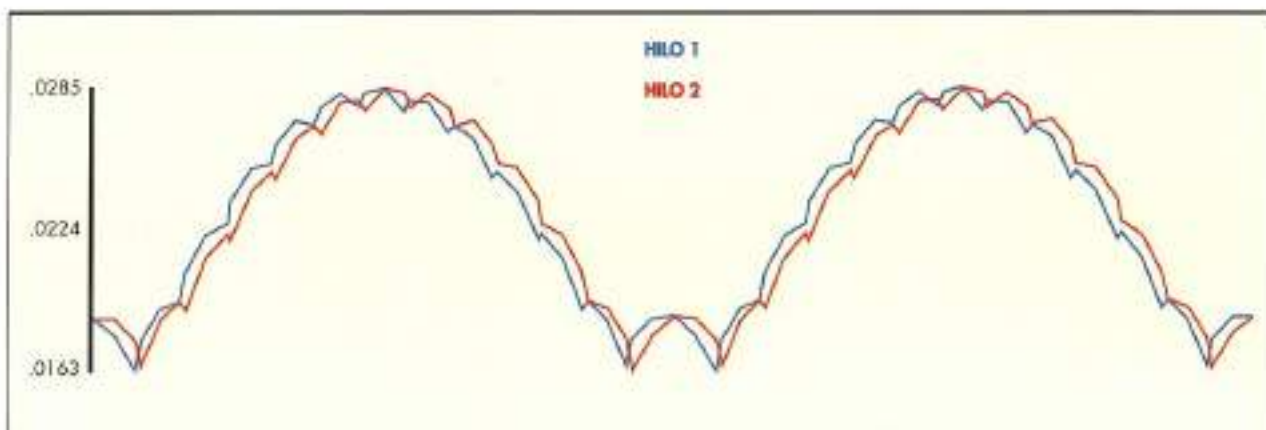


FIGURA 3. Diagrama de flexibilidad de la catenaria CR220 con una fuerza de 100N. Desplazamiento en m (2 vanos).

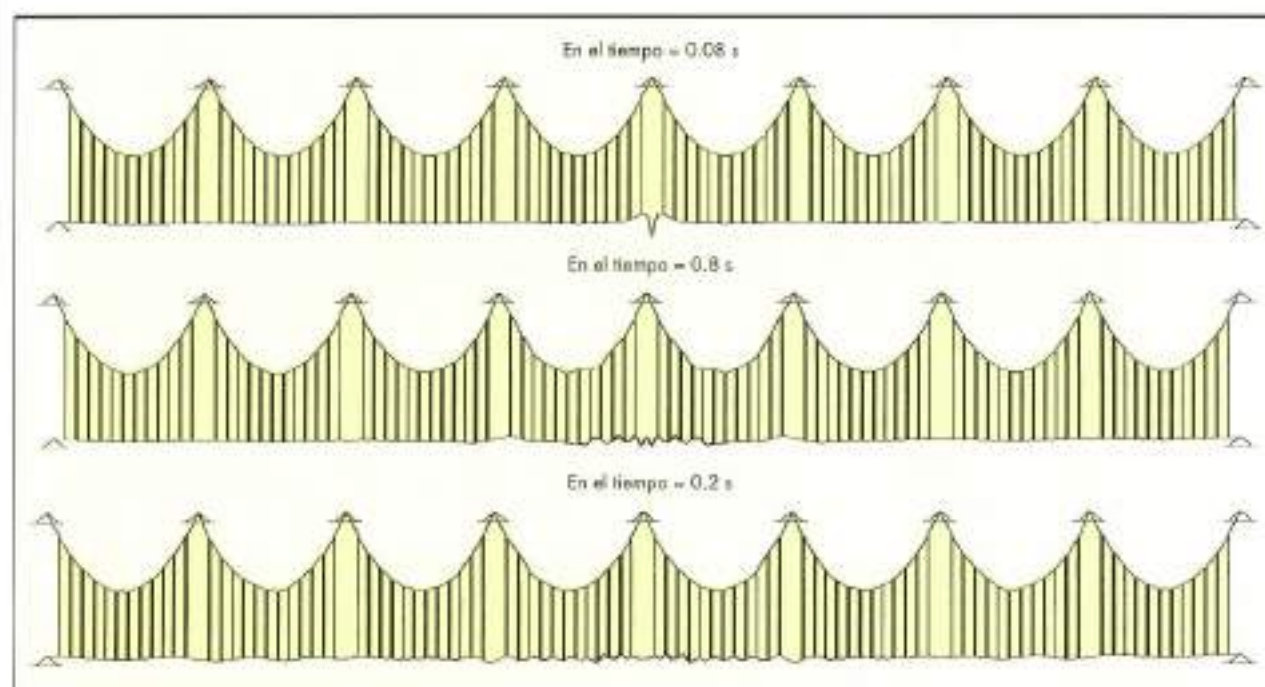


FIGURA 4. Deformada de la catenaria CR220 en diferentes tiempos (factor desplazamientos $\times 5$).

$$M_{\text{post}} \cdot \ddot{W} + C_{\text{post}} \cdot \dot{W} + K_{\text{post}} \cdot W = F_{\text{post}}$$

donde M_{post} representa la matriz de masas, C_{post} representa la matriz de amortiguamientos, K_{post} representa la matriz de rigidez, F_{post} representa el vector de fuerzas exteriores.

4. ESTUDIO DE LA INTERACCIÓN CATENARIA-PANTÓGRAFO

Después de haber analizado el comportamiento dinámico de cada uno de los sistemas estudiados: el pantógrafo y la catenaria, por separado, se estudiará en este capítulo la forma en la que estos dos sistemas interaccionan entre sí en el dominio del tiempo.

La fuerza de contacto que actúa entre el pantógrafo y los hilos de contacto permite acoplar a los dos sistemas.

En caso de contacto, los dos sistemas están acoplados y es equivalente estudiar cada sistema considerando la misma fuerza de contacto. Los desplazamientos de la cabeza de pantógrafo y de los puntos de la catenaria donde se localiza el contacto en ese instante tienen que ser iguales.

En el caso de no contacto, los dos sistemas están desacoplados, vibran libremente y la fuerza de contacto es nula.

Si en un momento determinado no hay contacto, y de la solución se obtiene que la coordenada final de la cabeza del pantógrafo es superior a la coordenada del punto del hilo de contacto se produce recuperación de contacto. Si en un momento determinado hay contacto, y de la solución se obtiene que la fuerza de contacto es negativa se produce pérdida de contacto.

La catenaria CR220 está compuesta por dos hilos de contacto, la condición de contacto tiene que ser respetada en los dos hilos de la catenaria.

Para una velocidad del tren igual a 200 km/h, representamos la deformada de la catenaria en diferentes momentos (Figura 5).

Gracias a las representaciones gráficas de los desplazamientos de la cabeza del pantógrafo y de las fuerzas de contacto en función del tiempo, podemos analizar y de esta manera juzgar del buen o del mal comportamiento de un sistema de catenaria y pantógrafo determinados (Figuras 6 y 7).

Para que los despegues del pantógrafo con los hilos de contacto sean mínimos, los desplazamientos verticales del pantógrafo y las fuerzas de contacto tienen que permanecer lo más constantes posibles a lo largo del tiempo (acercándose a curvas horizontales).

El programa DINACAT puede presentarse de este modo como un instrumento muy útil a la hora de diseñar y optimizar futuras catenarias y pantógrafos.

Para la catenaria CR220 y el pantógrafo FAIVELEY GPU, para una velocidad de funcionamiento de 200 km/h, el comportamiento parece aceptable puesto que no se produce ningún despegue o de fuerza de contacto inferior a 50 N. La fuerza media de contacto es de 158.87 N y la desviación estándar de 23.83 N.

6. CONCLUSIONES GENERALES, VÍAS DE DESARROLLO

El programa DINACAT es capaz de representar, de manera bastante sencilla, el comportamiento estático y vibratorio del sistema mecánico catenaria-pantógrafo.

La catenaria ha sido discretizada por el método de los elementos finitos y el pantógrafo representado por un conjunto de masas, muelles y amortiguadores, resolviéndose el problema planteado con un algoritmo de contacto dinámico no lineal.

Gracias a este programa es posible, de manera bastante precisa, analizar y así prever el buen o el mal funcionamiento del sistema predefinido.

El programa DINACAT puede presentarse de este modo como un instrumento muy útil a la hora de diseñar y optimizar futuras catenarias y pantógrafos.

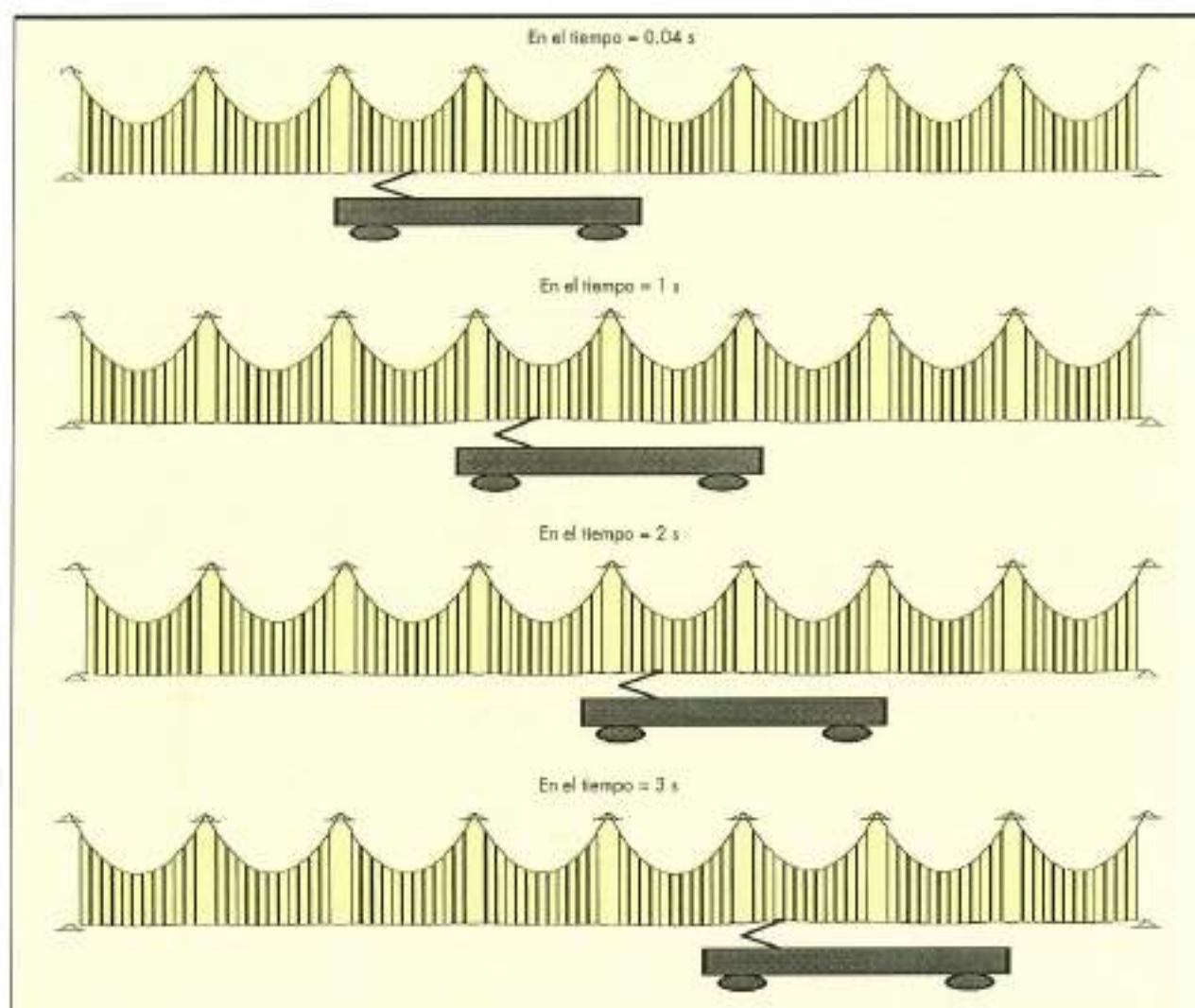


FIGURA 5. Deformada de la catenaria CR220 en diferentes tiempos.

Se ha validado el programa comparando sus resultados con otras simulaciones numéricas. Por otra parte, en el futuro se compararán estos resultados con otros obtenidos en simulaciones reales con otros tipos de pantógrafos y catenarias a varias velocidades de funcionamiento.

Se prevé mejorar el modelo desarrollando el programa para el caso en tres dimensiones. Se podrá de esta manera tener cuenta de un máximo de hipótesis no consideradas hasta ahora, como incluir la influencia de las acciones climáticas como la inducida por el viento.

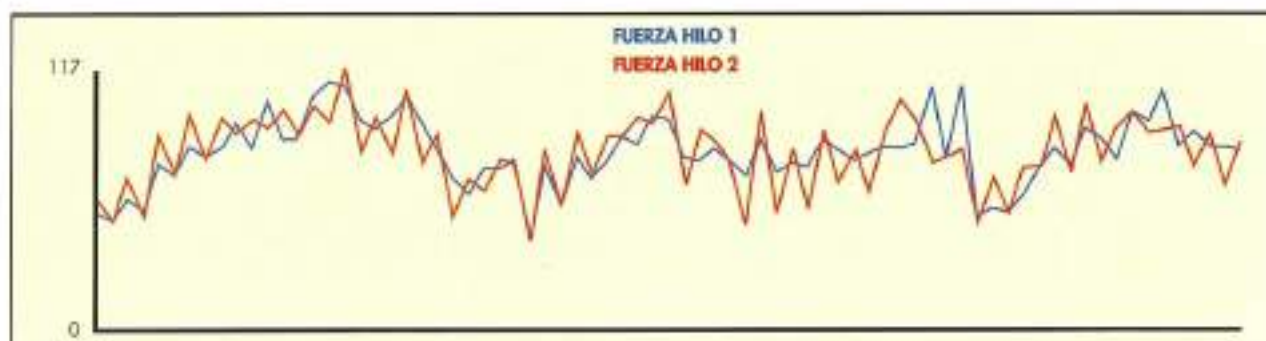


FIGURA 6. Fuerzas de contacto para cada hilo de contacto en N función del tiempo.

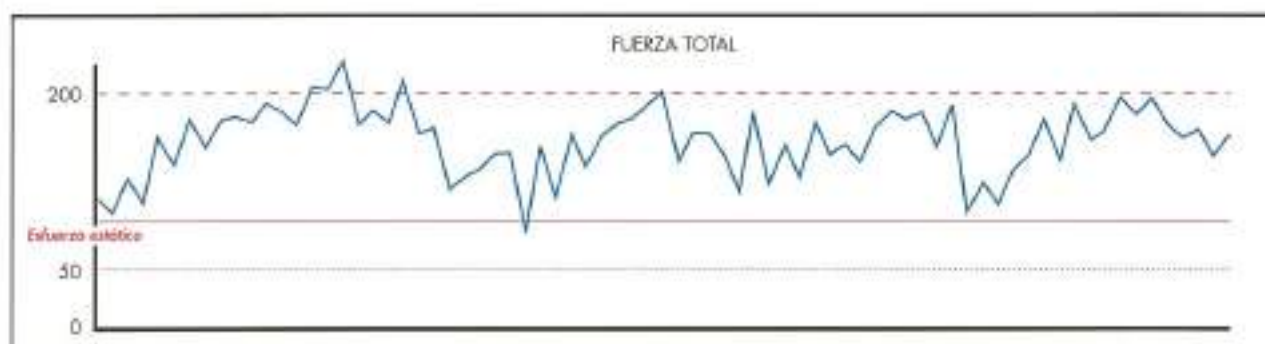


FIGURA 7. Fuerza de contacto total en N función del tiempo.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer a todas aquellas personas sin cuyo apoyo, unas veces moral, otras técnico, este artículo no hubiera visto la luz. En primer lugar agradecemos a todo el equipo técnico de INECO las largas horas de trabajo en las que pacientemente nos introdujeron en el mundo de las catenarias. Por otra parte, a D. Julián Santos y D. Ignacio Alonso de la Dirección General de Ferrocarriles y Transportes por Carretera, por su apoyo incondicional. Finalmente, a D. Jesús Montesinos, de la Jefatura de Albacete, por los ensayos y el tiempo que dedicó a los autores de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- MANUEL PASTOR PÉREZ, JOSE ANTONIO FERNÁNDEZ MERODO. *Un programa de elementos finitos que simula el comportamiento dinámico del sistema mecánico catenaria-pantógrafo*. CEDEX, Informe. Junio 1997.
- FISCHER WOLFGANG. *Methodes de calcul du comportement vibratoire de la caténaire et du pantographe dans le cadre de la circulation des trains à grande vitesse*. SNCF, Traduction n° 67-82.1975.
- I. A. BELYAEV, V. A. VOLOGINE, A. V. FREIFELD. *Perfectionnement des pantographes et des caténaires et méthode de calcul de leurs interactions mutuelles aux grandes vitesses de marche*. Rail International, Janvier 1978.
- JEAN DAPFOS; MICHEL GARDOU. *Les études récentes de pantographes a la SNCF*. Revue Générale des Chemins de Fer. Octubre 1986.
- JOSEPH LUPPI; JEAN PIERRE LAMON. *Histoire de la caténaire 25 kV*. Revue Générale des Chemins de Fer. Marzo 1992.

Proyecto: Estudio dinámico a velocidades elevadas de la catenaria tipo Renfe Modernizada y Compensada. Universidad de Navarra. 1982.

G. GALEOTTI; M. GALANTI; S. MAGRINI; P. TONI. *Servo actuated railway pantograph for high-speed running with constant constant force*. Journal of Rail and Rapid Transit. 1993.

K. MANABE. *Periodical Dynamic Stabilities of a Catenary-Pantograph System*. QR of RTRI, Vol. 35, N° 2, Mayo 1994.

L. PASCUCI. *Elasticità de oscillazioni delle condutture di contatto delle linee ferroviarie elettrificate*. Ingegneria Ferroviaria. Marzo 1962.

L. PASCUCI. *Velocità critiche per le condutture di contatto delle linee ferroviarie elettrificate*. Ingegneria Ferroviaria. Febrero 1964.

L. PASCUCI. *Movimenti delle condutture di contatto delle linee ferroviarie elettrificate, alle alte velocità*. Ingegneria Ferroviaria. Enero 1967.

CESARE BIANCHI; GIULIANO TACCI; ALFREDO VANDI. *Comportamento dinamico del sistema pantografi catenaria*. La Tecnica Professionale. Julio 1990.

C. BIANCHI; A. LUZI; E. TASSINI. *Captazione di corrente ad Alta Velocità*. Ingegneria Ferroviaria. Junio 1993.

O. C. ZIENKIEWICS y R. L. TAYLOR. *El método de los elementos finitos*. Vol. 1-2. Mc. Graw Hill.

THOMAS J. R. HUGHES. *The finite element method*. Prentice Hall.

K. J. BATHE. *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*. Prentice Hall.

M. A. CRISFIELD. *Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures*. Vol. 1-2. WILEY.

P. BROUGHTON; P. NDUMBARO. *The analysis of cable and catenary structures*. Thomas Telford.

LOS PRIMEROS POR NATURALEZA.

En **Ferrovial** sabemos que la naturaleza es lo primero.

Por eso hemos sido **la primera empresa del sector** en crear un sistema de gestión medioambiental

adaptado a la norma internacional más extendida del mundo: La **norma ISO 14.001**. Y para estar

seguros de que lo estamos haciendo bien, lo hemos sometido a la certificación de **AENOR**. Por eso somos

los primeros en cumplir con los más rigurosos requisitos medioambientales. Porque sabemos que el medio

ambiente representa una apuesta de futuro para todos nosotros. Porque trabajamos siempre con espíritu

constructivo. Como empresa y como personas, en **Ferrovial** cuidamos la naturaleza. Por sistema.



ferrovial



**AENOR CERTIFICA QUE FERROVIAL CUMPLE LA
NORMA ISO 14.001 DE GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL**

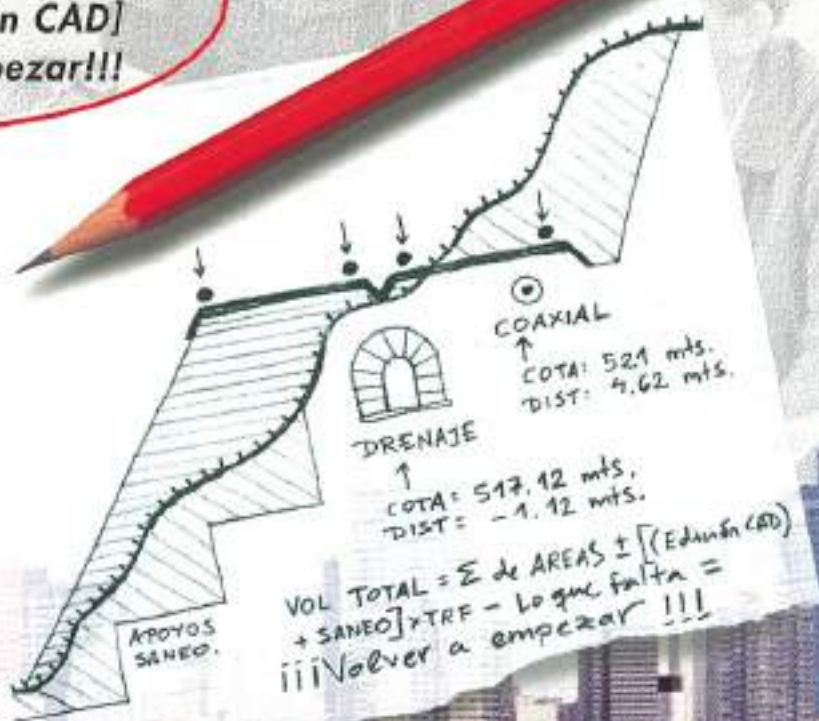


OBRAS PÚBLICAS - TOPOGRAFÍA - DISEÑO - CONSTRUCCIÓN
SiteWorks • InRoads • InRail



Con INTERGRAPH...

Volumen =
 $f [\Sigma(\text{perfil} \pm \text{lo-que-me-falta}) + \Delta(\text{saneos}) \pm \text{edición CAD}]$
 = ¡¡¡Volver-a-empezar!!!



**...usted ya estaría en el
 siguiente proyecto!**

(91) 372 30 17
 (93) 200 52 99
 (94) 463 40 66



¡Llámenos hoy mismo!

INTERGRAPH