

DINACAT 1.0 - ANÁLISIS MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS DEL ACOPLAMIENTO DINÁMICO CATENARIA-PANTÓGRAFO EN LÍNEAS FERROVIARIAS

José Antonio Fernández Mejedo; Manuel Pastor Pérez

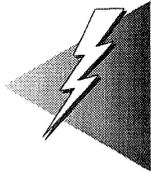
Centro de Técnicas Aplicadas. CEDEX, Ministerio de Fomento.

José Carrillo

INECO.

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 SIMULATION 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 perdidas 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.

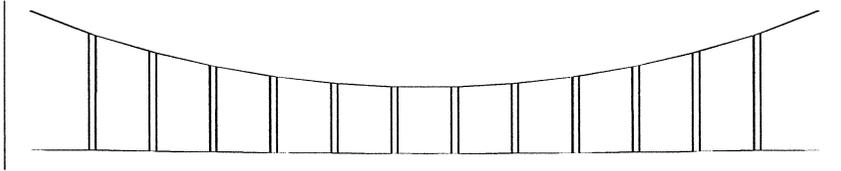
El modelo de los dos sistemas estudiados tiene que ser lo más general posible para acercarse lo más posible a la realidad. En este sentido, los elementos finitos pueden presentarse como una herramienta de simulación muy útil. Por ello se ha desarrollado el programa WINCAT, en el que en la actualidad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



1 vano de la catenaria CR220

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 contacto) 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 translaciones 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

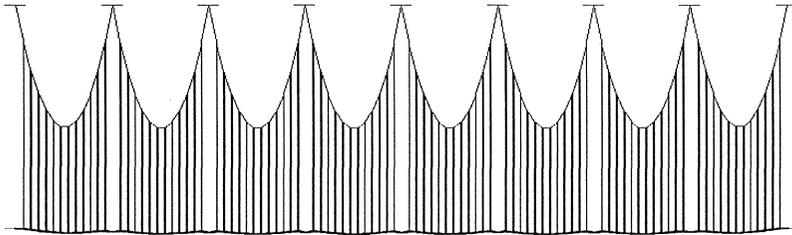
$$U^{(i)} = U^{(i-1)} + \Delta U^{(i)}$$

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-Rapson* 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.



Posición de equilibrio de 8 vanos de la catenaria CR220



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. Se da a continuación un ejemplo que ilustra la flexibilidad obtenida para el caso particular estudiado.



*Diagrama de flexibilidad de la catenaria CR220 con una fuerza de 100N.
Desplazamientos en m (2 vanos).*

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.

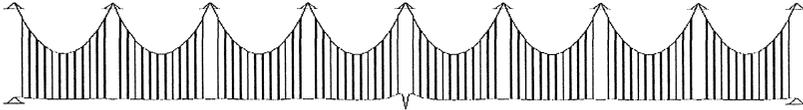
Los algoritmos de resolución han sido implementados tanto para el caso lineal como para el no lineal.



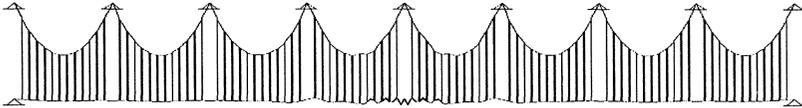
Para calcular la velocidad de propagación de una onda en la catenaria CR220 se parte del estado inicial correspondiente al equilibrio, imponiendo un desplazamiento inicial en los dos nodos céntricos de los hilos de contacto.

A continuación se da el estado de la catenaria para diferentes tiempos.

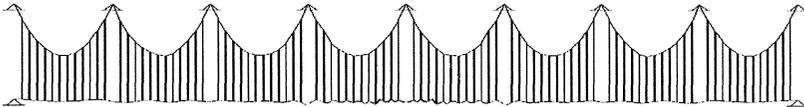
En el tiempo = 0.08 s



En el tiempo = 0.8s



En el tiempo = 2s



Deformada de la catenaria CR220 en diferentes tiempos (factor desplazamientos x5)

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

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

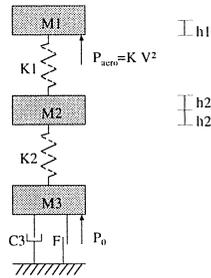
4. ESTUDIO DEL PANTÓGRAFO

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 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 el 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

$$M_{pent.} \cdot \ddot{W} + C_{pent.} \cdot \dot{W} + K_{pent.} \cdot W = F_{pent.}$$

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

5. 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.

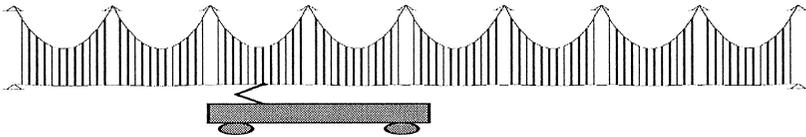
Si en un momento determinado no hay contacto, y de la solución se obtiene que la coordenada final de la cabeza del pantógrafo es superior a la coordenada del punto del hilo de contacto se produce recuperación de contacto. Si en un momento determinado hay con-

tacto, y de la solución se obtiene que la fuerza de contacto es negativa se produce pérdida de contacto.

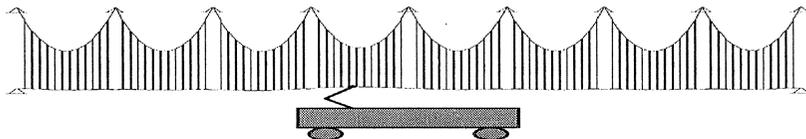
La catenaria CR220 está compuesta por dos hilos de contacto, la condición de contacto tiene que ser respetada en los dos hilos de la catenaria.

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

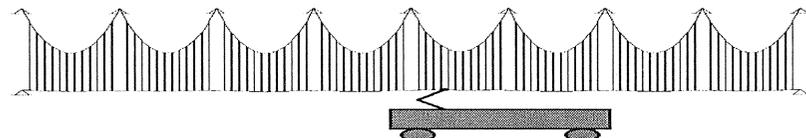
en el tiempo = 0.04 s



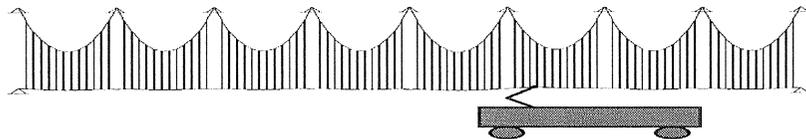
en el tiempo = 1 s



en el tiempo = 2 s



en el tiempo = 3 s

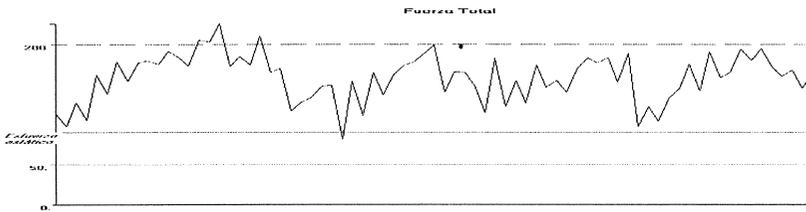


Deformada de la catenaria CR220 en diferentes tiempos



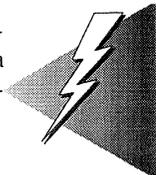


Fuerzas de contacto para cada hilo de contacto en N función del tiempo



Fuerza de contacto total en N función del tiempo

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.



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 WINCAT 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 220 km/h, el comportamiento parece aceptable puesto que no se produce ningún despegue o de fuerza de contacto inferior a 50N. 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 WINCAT 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 WINCAT puede presentarse de este modo como un instrumento muy útil a la hora de diseñar y optimizar futuras catenarias y pantógrafos.

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.

7. 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. Julian 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

Un programa de elementos finitos que simula el comportamiento dinámico del sistema mecánico catenaria-pantógrafo.

Manuel PASTOR PÉREZ, José Antonio FERNÁNDEZ MERODO

CEDEX, Informe. Junio 1997

Methodes de calcul du comportement vibratoire de la caténaire et du pantographe dans le cadre de la circulation des trains à grande vitesse.

FISCHER Wolfgang.

SNCF, Traduction n° 67-82. 1975

Perfectionnement des pantographes et des caténaires et méthode de calcul de leurs interactions mutuelles aux grandes vitesses de marche.

I.A. BELYAEV, V.A. VOLOGINE, A.V. FREIFELD.

Rail International. Janvier 1978

Les études recentes de pantographes a la SNCF.

Jean DAFFOS, Michel GARDOU

Revue Générale des Chemins de Fer. Octobre 1986

Histoire de la caténaire 25 kV.

Joseph LUPPI, Jean Pierre LAMON.

Revue Générale des Chemins de Fer. Marzo 1992

Proyecto: Estudio dinámico à velocidades elevadas de la catenaria tipo Renfe Modernizada y Compensada.

Universidad de Navarra. 1982

Servo actuated railway pantograph for high-speed running with constant constant force.

G. GALEOTTI, M. GALANTI, S MAGRINI, P TONI.

Journal of Rail and Rapid Transit. 1993

Periodical Dynamic Stabilities of a Catenary-Pantograph System.

K. MANABE.

QR of RTRI, Vol.35, N°2, Mayo 1994

Elasticità de oscillazioni delle condutture di contatto delle linee ferroviarie elettrificate.

L. PASCUCCI

Ingenieria Ferroviaria. Marzo 1962.



Velocità critiche per le condutture di contatto delle linee ferroviarie elettrificate

L. PASCUCCI

Ingenieria Ferroviaria. Febrero 1964.

Movimenti delle condutture di contatto delle linee ferroviarie elettrificate, alle alte velocità.

L. PASCUCCI

Ingenieria Ferroviaria. Enero 1967.

Comportamento dinamico del sistema pantografi catenaria.

Cesare BIANCHI, Giuliano TACCI, Alfredo VANDI

La Tecnica Professionale. Julio 1990

Captazione di corrente ad Alta Velocità.

C. BIANCHI, A. LUZI, E. TASSINI.

Ingenieria Ferroviaria. Junio 1993.

El método de los elementos finitos. Vol. 1-2

O.C. Zienkiewics y R.L. Taylor

Mc. Graw Hill

The finite element method

Thomas J.R. Hughes

Prentice Hall

Finite Element Procedures in Engineering Analysis

K.J. Bathe

Prentice Hall

Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures. Vol 1-2

M.A. CRISFIELD.

WILEY

The analysis of cable and catenary structures.

P. BROUGHTON, P. NDUMBARO.

Thomas Telford.

