

# Seguimiento en tiempo real del comportamiento estructural de puentes en líneas de alta velocidad. Viaductos de Sant-Boi (Barcelona)

PABLO DÍAZ SIMAL (\*) y EDUARDO JOSÉ LÓPEZ RODRÍGUEZ (\*\*)

**RESUMEN** El esfuerzo de implantación de infraestructuras llevado a cabo recientemente en nuestro país ha hecho que se incremente súbitamente el número de puentes desplegados a lo largo de las vías ferroviarias de A.V. Debido tanto a las dificultades de acceso de nuestros inspectores a la zona de seguridad ferroviaria como a la necesidad garantizar para todos los puentes un similar grado de mantenimiento preventivo ha sido preciso idear un sistema de inspección de estas estructuras técnicamente especializado, poco intensivo en personal y por ello distinto al empleado hasta ahora. La auscultación dinámica en remoto cumple con estos condicionantes y ha sido aquí probada por el CEDEX en un proyecto piloto sobre dos puentes construidos por el ADIF en la línea de A.V. que enlaza Barcelona con Madrid. La idea consiste en disponer un amplio conjunto de transductores de gran sensibilidad conectados a elementos del puente y entre sí a través de una red de fibra óptica tendida sobre los puentes, y extraer las lecturas de las magnitudes físicas representativas contenidas en la respuesta estructural, en remoto. Finalmente, mediante el algoritmo de la FFT, el trabajo concluye desvelando los parámetros que gobiernan esa respuesta, evaluando así el estado de mantenimiento de los puentes.

## ON-LINE STRUCTURAL HEALTH MONITORING OVER HIGH SPEED RAILWAY BRIDGES. THE SANT BOI VIADUCTS IN BARCELONA

**ABSTRACT** *The infrastructures' planning effort recently carried out in Spain has suddenly made the number of bridges deployed along our High Speed Railways huger. Due to both the difficulties for our inspectors to ingress into the railway security lane as well as the need to guarantee a similar level of preventive maintenance to the full bridge stock, it has been compelling for dealing with these structures to draft a health monitoring system being technically specialized, low crew-dependent and, so, different to those hitherto put into effect. The remote dynamic auscultation system meets these requirements and has been here tested by CEDEX through a pilot programme carried out over two bridges erected by ADIF in the H.S Railway linking Madrid with Barcelona. The idea consists on fixing a wide array of high sensibility transducers connected to bridge members and to each other via an optical fibre wire being laid over the bridges, and picking up datasets of the representative physical magnitudes included into the structural response from faraway. Lately, by means of the FFT algorithm, the job is achieved unveiling the parameters which govern this response and so assessing the bridges' maintenance condition.*

**Palabras clave:** Evaluación del Estado de los Puentes, Mantenimiento Preventivo, Auscultación Dinámica.

**Keywords:** Bridge Condition Assessment, Preventive Maintenance, Dynamic Auscultation.

## 1. INTRODUCCIÓN

La ambiciosa planificación de las infraestructuras de transporte abordada en España durante los últimos lustros se ha plasmado, entre otros efectos, en la implantación sistemática de redes ferroviarias de A.V. a lo largo del territorio,

muchas de las cuales se vienen completando en estos años, o van a ir siéndolo en un futuro cercano.

Esta circunstancia ha significado para nuestro país un reto técnico de considerable magnitud, cuya superación sólo ha podido lograrse merced al avance tecnológico alcanzado por las distintas empresas del sector en disciplinas tales como la ciencia de los materiales, el análisis y diseño de estructuras y las técnicas y procedimientos constructivos.

Por otra parte el Administrador de Infraestructuras Ferroviaria (ADIF), entidad pública empresarial encargada en España de materializar y administrar estas redes ferroviarias, se ha encontrado como consecuencia de esa nueva reali-

(\*) Jefe del Área de Auscultación de Estructuras del Lab. Central.  
E-mail: Eduardo.Lopez@cedex.es

(\*\*) Director de Programa del Área de Auscultación de Estructuras del Lab. Central.

dad con un extenso parque de puentes ferroviarios construidos casi simultáneamente y en un tiempo breve, viéndose por ello abocado a acometer también la explotación, seguimiento y conservación de las obras, y asumiendo con ello una tarea añadida de inspección y evaluación del estado estructural de los puentes.

En paralelo y directamente relacionado con el progreso de aquellas disciplinas ha sido también patente el avance alcanzado en el campo de la auscultación de estructuras, sólidamente apoyado en las posibilidades de las tecnologías de comunicación, lo que tradicionalmente ha constituido una de las áreas de actividad del Laboratorio Central de Estructuras del CEDEX desde sus inicios.

Aprovechando esta oportuna sinergia, ambas entidades, CEDEX y ADIF; suscribieron un Convenio que dentro su contenido incluía la tarea de desarrollar un proyecto piloto de auscultación de puentes en remoto que permitiera la inspección de puentes de ferrocarril en líneas de alta velocidad. Los criterios de elección de las estructuras destinadas a ser monitorizadas mediante este sistema buscaban profundizar en el conocimiento de puentes dotados de las características más variadas.

Se designaron los dos viaductos contiguos que cruzan el río Llobregat en la localidad de Sant Boi, en el tramo de A.V.próximo a Barcelona, al contar entre sus características las siguientes:

- Tipologías completamente diferentes, tanto en cuanto a su estructura resistente como en cuanto a sus materiales constitutivos: uno de acero estructural en celosía y el otro de hormigón pretensado.
- Ambos son adyacentes y tienen común una de las pilas
- Están por ello sometidos a las mismas acciones medioambientales y de servicio.
- La instalación y explotación de la instrumentación era en este caso mucho más simplificada que en el caso de dos viaductos en distinto emplazamiento, ya que se podía disponer de una serie de servicios comunes para ambas estructuras: toma de corriente, sistema de transmisión de datos, operaciones de instalación y mantenimiento, etc.

Los beneficios buscados con tal selección iban a ser fundamentalmente:

- El seguimiento en tiempo real del estado de seguridad y funcionalidad de las estructuras, de cara al planteamiento de las tareas de mantenimiento
- La introducción de mejoras en futuros proyectos de puentes a partir de las conclusiones obtenidas.

Respecto del primero de ellos, es evidente que el análisis detallado de la respuesta de una estructura a lo largo de un periodo dilatado de tiempo permite establecer unas pautas del comportamiento estructural del viaducto en cuestión frente a las acciones derivadas de las sobrecargas y del entorno. Al mismo tiempo la determinación de un modelo estable de comportamiento de la estructura contribuye también a detectar la aparición de posibles anomalías a lo largo del periodo de seguimiento.

De este modo se establecen las bases para, partiendo del análisis de un conjunto lo más amplio posible de estructuras con distintas tipologías, realizar estudios comparativos de los diferentes comportamientos frente a las sollicitaciones debidas a la alta velocidad, identificando parámetros de diseño recurrentes que podrán utilizarse en futuros proyectos de viaductos.

De acuerdo con todo lo anterior, el objeto de este artículo consiste en, tras la descripción de los puentes elegidos y de

la instrumentación instalada, mostrar la estructura de los datos obtenidos tras un año de instrumentación intensiva en estático y en dinámico, describir el procedimiento de transmisión de los datos en remoto y ofrecer resultados que cuantifiquen la respuesta de la estructura ante las cargas dinámicas exteriores a través del análisis modal operacional, utilizando para ello el procedimiento conocido como obtención de la transformada rápida de Fourier.

## 2. DATOS DE PARTIDA Y PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

Antes de proceder a la instrumentación de los puentes se contó con los resultados de un análisis teórico de los mismos. Dicho estudio permitió estudiar el contenido de la respuesta dinámica ideal, lo que facilitó la elección de las magnitudes a medir en los puentes y la localización de los puntos de medida.

Esto abrió paso al diseño de los transductores a disponer, así como el esquema de la arquitectura de los nodos y de las líneas de alimentación y de transmisión de la información. En paralelo hubo de proyectarse un sistema de almacenamiento de datos en cada nodo y diseñar una conexión inalámbrica en remoto con la sede del Laboratorio.

Para la realización del estudio de las señales obtenidas experimentalmente se ha utilizado la aplicación desarrollada en el Laboratorio Central de Estructuras **SIACOD**, acrónimo que responde a Sistema Integral de Análisis y Control de Datos. Esta aplicación tiene por objeto disponer, de forma integrada, de las utilidades informáticas necesarias para la adquisición, gestión, análisis e interpretación de los datos procedentes de la auscultación de las estructuras.

## 3. DESCRIPCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS

Cada uno de los viaductos elegidos se proyectó utilizando distintos materiales y diferente tipología estructural. En lo que sigue se denominarán según el material en el que se han realizado: puente metálico y puente de hormigón.

El puente metálico tiene una longitud total de 340 metros repartidos en 6 vanos de luces  $44+4*63+44$  que se alojan en un tramo curvilíneo de radio 3500 metros. El ancho de la plataforma disponible es de 14,10 metros, necesario para tender dos vías de ferrocarril, una por sentido de circulación, y diversas canalizaciones para el cableado de servicios asociados a la explotación de la vía.

Enclavado en el mismo tramo y con idéntica definición de trazado en planta se encuentra el puente de hormigón pretensado, que cruza el río Llobregat. Tiene una longitud de 530 metros, distribuidos en once vanos, nueve de ellos en el centro con luces de 50 metros y otros dos vanos extremos de 40 metros, es decir con un reparto de luces de  $40+9*50+40$ .

### 3.1. TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL

#### 3.1.1. Puente de Metálico

El esquema resistente del viaducto metálico se ajusta al de una viga continua simplemente apoyada en cinco pilas, flanqueada por un estribo convencional y una pila estribo especialmente diseñada para funcionar como estribo compartido entre este puente y el de hormigón, inmediatamente posterior, que cruza el río Llobregat. Ambos estribos son, al igual que las pilas, rectos y ortogonales a la traza, es decir que el puente carece de esviaje.

La sustentación del tablero en dichos estribos y pilas se realiza mediante la interposición de parejas de aparatos de

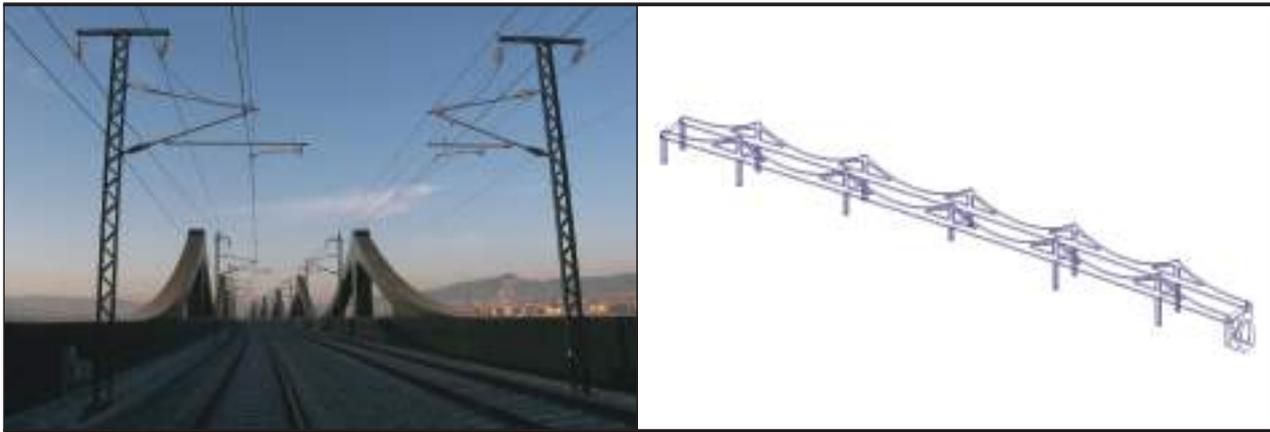


FIGURA 1. Puente metálico. Vista desde el interior del cajón y esquema simplificado.

apoyo tipo pot. Cada una de ellas está compuesta por un aparato de apoyo guiado longitudinalmente, aunque constreñido en sentido transversal y otro totalmente libre, con excepción de la pareja situada en la pila estribo en donde se materializa un punto fijo para todos los desplazamientos del puente. En el otro extremo del tablero, se dispone sobre el estribo una junta de dilatación dimensionada para absorber el recorrido longitudinal total.

La solución de cimentación adoptada para todos los estribos y pilas es de tipo profundo mediante encepados de pilotes empotrados en estratos subyacentes competentes.

Los alzados del estribo 1, convencional según se ha dicho, consisten en un muro vertical frontal y un par de muros laterales en vuelta alzándose desde el encepado.

La pila que hace también las veces de estribo está compuesta de elementos estructurales rectos de hormigón pretensado que dibujan las aristas de un tetraedro, una de las cuales, la superior, está colocada en posición horizontal transversalmente a la traza, mientras que la inferior, embebida en el encepado es también horizontal y va girada 90 grados respecto de la otra. Los otros cuatro elementos tienen inclinaciones que vienen obligadas por su conexión en el tetraedro con los extremos de las dos aristas horizontales descritas, inclinaciones que permiten, junto con la dimensión de las secciones rectas transversales de cada uno, recibir y trasladar al terreno a través de la cimentación los esfuerzos

horizontales longitudinales y transversales, estos últimos menos comprometidos al compartir tal función con las pilas. Ambos estribos tienen una altura similar, de unos 16 ó 17 metros.

Las pilas son todas sensiblemente iguales en altura, unos 15 metros, salvo la intermedia que alcanza únicamente 8 metros. Su diseño es idéntico para todas. Consiste en dos fustes gemelos de sección cuasi-rectangular –solo se diferencia del rectángulo en lo redondeado de las caras frontal y dorsal– con las caras mayores longitudinales a la traza. Todos los fustes, salvo los de la pila intermedia disponen de una extensión en forma de membrana en la parte inferior interior lo que dota a la sección de empotramiento de una mayor área.

La tipología del tablero se compone de una estructura metálica combinada con una losa de hormigón, es decir que se trata de una sección mixta. La parte metálica consta de dos cuchillos, uno en cada borde, que descansan en los aparatos de apoyo ya mencionados situados en coronación de pilas y estribos. El perfil longitudinal de los cuchillos, en celosía, se logra practicando, en una viga metálica de canto variable, máximo sobre pilas y fuertemente peraltada, sendos aligeramientos triangulares simétricos uno a cada lado del fuste en sentido longitudinal.

La losa de hormigón armado que constituye la plataforma del camino ferroviario descansa entre los dos cuchillos

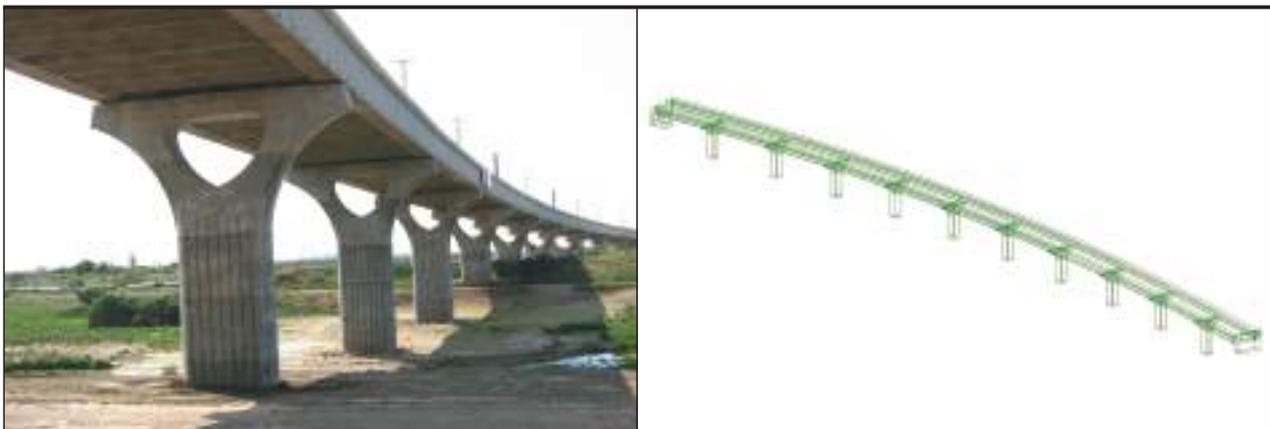


FIGURA 2. Puente de hormigón. Vista exterior y esquema simplificado.



FIGURA 3. Pila estribo.

paralelos a la altura de las vigas longitudinales corridas, apoyada sobre vigas transversales también de acero estructural. Estas vigas metálicas son armadas de sección en doble T y van conectadas a las longitudinales mediante platabandas angulares soldadas entre ambos elementos estructurales con diseños variables en cuanto su rigidez, según sea su posición en la traza del puente.

Entre las alas superiores de las vigas transversales, que van colocadas cada tres metros, se tiende una chapa grecada de rigidez suficiente para encofrar el hormigón de la losa que tiene un canto constante de 35 cm. en toda su longitud. El cortante de rasante de la losa se transmite a la estructura metálica mediante conectadores cilíndricos soldados a la cara superior del ala de cada viga transversal.

### 3.1.2. Puente de Hormigón

Los estribos de este puente, por las mismas razones que las de el del caso anterior son entre sí de tipología diferente. El estribo 2 del lado Barcelona está compuesto por una viga cargadero montada sobre pilotes. Su altura es moderada al encontrarse en un punto de la traza próximo al túnel situado inmediatamente a continuación en el perfil del trazado. El estribo 1 es el compartido con el puente anterior que ya se ha descrito.

Las pilas de diferentes alturas, aunque siempre inferiores a la treintena de metros, se han diseñado mediante un fuste de sección compacta maciza en hormigón que se abre en dos brazos inclinados imitando una Y griega, en cuyos extremos superiores los aparatos de apoyo reciben las cargas del tablero. Para aliviar las flexiones en los arranques de dichos brazos los extremos de la Y se han unido mediante un elemento de hormigón horizontal solidario con ellos que hace las veces de tirante. Los aparatos de apoyo tienen las mismas características y funcionalidades de los que se encuentran en el puente metálico.

El tablero, de hormigón pretensado, tiene forma de cajón abierto en forma de U con las cabezas de las almas regreasadas. El canto total es de 4,20 metros y la losa de unión entre ambas es nervada mediante costillas transversales. El cajón se encuentra fijo, al igual que el puente anterior, en la pila estribo intermedia.

## 4. CONJUNTO DE MAGNITUDES A MEDIR

Como en cualquier proyecto de instrumentación de estructuras se impuso en éste una reflexión previa de cara a acotar las magnitudes cuyos valores es necesario conocer y designar en qué puntos concretos hay que medir para obtener los resultados que, una vez integrados, reflejasen el estado del puente caracterizando la respuesta estructural ante las sollicitaciones.

Esta decisión varía siempre en función de muchos factores coadyuvantes al proyecto. Viene condicionada en primer lugar por el alcance que se haya fijado en los objetivos, según se busque revelar el comportamiento de una determinada zona o elemento de la estructura o se pretenda, como es nuestro caso, estudiar el estado y la evolución de la condición del puente en su conjunto. Depende también del tipo de sollicitación, estática, termo-higrométrica y reológica, o dinámica que se quiera analizar. En el caso de estos puentes se pretendía cubrir el conjunto de todas ellas o al menos las de los dos últimos tipos, lo que condujo a plantear una instrumentación capaz de obtener tanto registros en estático como en dinámico. Y, por último, viene también condicionada por los elementos estructurales y sus materiales de construcción cuya compatibilidad con los distintos sensores disponibles pueda ofrecer unas garantías razonables.

En los tableros interesaba conocer aquéllas que, como los corrimientos o deformaciones, van asociados a las tensiones y esfuerzos mecánicos, ya sean originados por las cargas circulantes o por las acciones de larga duración de tipo estático. Otras magnitudes, como las aceleraciones, son de inclusión obligada porque permiten caracterizar la respuesta dinámica de la estructura, máxime si se tiene en cuenta que las sobrecargas debidas al tráfico ferroviario son en este punto de alta velocidad.

En pilas y estribos, sin embargo, son más útiles en la práctica las medidas directas de movimientos, tanto en el plano horizontal como asientos verticales, y giros inclinaciones.

Con tales premisas la instrumentación se eligió además para ser capaz de recoger información con alta frecuencia de muestreo durante periodos de tiempo muy extensos, lo que invitaba a la correlación de las medidas recabadas con los valores registrados en el ambiente del entorno. Ello llevó al estudio de otras magnitudes medioambientales como el viento y la temperatura.



FIGURA 4. Interior del cajón del puente de hormigón.

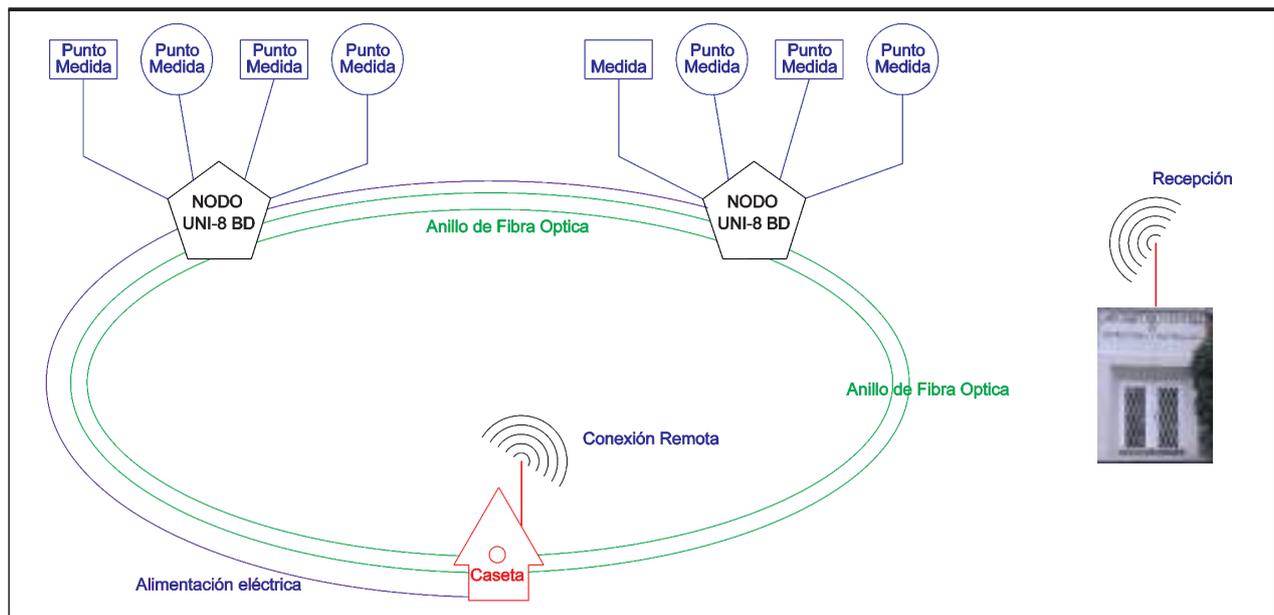
En cualquier caso la decisión de las magnitudes a medir vino influida también por las características y los materiales utilizados en el proyecto de construcción del puente que pueden, como se verá, limitar o priorizar cierto tipo de lecturas.

En el apartado siguiente se describe el despliegue de sensores a lo largo de los puentes y los diferentes tendidos necesarios para su explotación en remoto.

## 5. ESQUEMA GENERAL DE INSTALACIÓN

La topología diseñada para esta distribución de sensores y sus correspondientes conexiones se compone de una serie

esquemas arborescentes que parten de nodos situados en los distintos puntos de la traza de los puentes, viniendo dichos nodos unidos entre sí a través de un tendido en forma de doble anillo de fibra óptica que canaliza toda la información hacia una caseta de instalaciones próxima al estribo del puente de hormigón. A lo largo de la línea anular de fibra que conecta los nodos se dispone también un tendido de alimentación eléctrica a 220 v. que toma corriente de la misma caseta mediante un cuadro general conjunto que se describirá a continuación. Una representación gráfica de todas estas conexiones puede encontrarse en la siguiente figura.



Según se desprende de lo dicho en el párrafo anterior, los nodos tienen un carácter funcional múltiple, en el sentido en que son puntos o zonas comunes de entronque de los tendidos de fibra óptica, alimentación eléctrica y cables de conexión de sensores, con eventuales interfaces entre algunos de estos tendidos.

Previamente a su instalación en campo todos los elementos de la instrumentación fueron preinstalados en el Laboratorio Central con longitudes de cable mínimas para la verificación de su correcto funcionamiento, tal como es recomendable en cualquier instrumentación compleja, cuya compatibilidad ha de ensayarse previamente "en blanco" a fin de descartar errores o carencias que luego son difíciles de reparar en campo. Los nodos, algunos muy nutridos en cuanto a canales de adquisición como veremos, y desde los cuales se abriría en esquema arborescente toda la captación de datos desde los sensores, venían a coincidir con la situación de las pilas de los puentes, recibiendo en cada uno datos simultáneos de las zonas interiores de los tableros y exteriores de las pilas. De este modo se reducían las pérdidas de señal asociadas a tendidos de grandes dimensiones. Como parte de los dispositivos instalados, existía en cada nodo una batería que suministraba energía eléctrica al sistema durante al menos ocho horas, ante un eventual corte del suministro de la línea a 220, precaución que demostró su utilidad en algunas ocasiones salvando la información almacenada en las PCMCIAS.

La instalación operaba indistintamente en estático y en dinámico. En el primer caso la evolución de la respuesta se produce de forma continua y el volumen de datos es manejable. Por el contrario el modo dinámico sólo se requiere ante las solicitaciones homónimas producidas por el paso de los trenes u otras acciones extraordinarias. Además, el volumen de datos que registra es incomparablemente mayor, con lo que sólo se activaba cuando alguno de los sensores instalado específicamente para ese fin alcanzaba un valor umbral suficiente, disparando el modo dinámico de adquisición.

La simultaneidad, imprescindible en un sistema de adquisición de datos de frecuencias de muestreo del orden de 200 Hz destinado a alimentar un proceso de análisis modal operacional en los puentes, corrió a cargo también de dispositivos de posicionamiento instalados en los nodos, (GPS's), que permitían las lecturas en modo sincronizado tras el impulso de arranque que disparaba la adquisición de datos en dinámico.

## 6. CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS Y LOS DISPOSITIVOS

Todo estudio que haya de llevarse a cabo en una estructura real construida requiere una capacidad de analizar los datos de la respuesta de la misma ante determinadas acciones. Y consiguientemente, al ser preciso además obtener tales datos para el estudio, es fundamental poseer un sistema de ad-

quisición acorde a las necesidades reales planteadas en la investigación. Como es bien sabido, una medida a realizar en un puente o estructura ha de ser objetiva (independiente del observador) y empírica (basada en la experimentación), de tal forma que exista una correspondencia biunívoca entre las relaciones numéricas almacenadas y las relaciones entre las propiedades descritas. Existen actualmente en el mercado diversos sistemas de adquisición de datos capaces de realizar esta labor. Tras estudiar los diferentes modelos disponibles, se optó en el Laboratorio Central por utilizar un sistema, ya contrastado en otros viaductos de ADIF, si bien en un estadio incipiente de explotación, que se adaptaba perfectamente a las necesidades de instrumentación de nuestros puentes.

Por otro lado, hay que hacer constar que en un sistema de adquisición de datos en dinámico (con una alta frecuencia de muestreo) y con la topología descrita anteriormente, dotado de numerosos nodos independientes entre sí, es fundamental la sincronización entre los módulos integrantes, aspecto que resuelve el sistema adoptado.

El sistema consta de una serie de módulos principales en los que existe un procesador digital de señal que permite el procesamiento básico de los datos, el cual se compone de las siguientes funciones: reducción, filtrado y estadística, y realiza la sincronización entre todos los módulos principales y de otra serie de módulos secundarios que permiten el acondicionamiento de los canales con una frecuencia de muestreo de hasta 1000 Hz para adquisición en modo dinámico.

Las características básicas de los distintos módulos que componen este sistema de adquisición se detallan a continuación.

### 6.1. SISTEMA DE MODULOS BASICOS COLECTORES DE DATOS TIPO CAN BUS/BUSDAQ

El sistema de adquisición de datos se compone en cada nodo de un módulo principal (IMC-BusDaq-2) y de módulos básicos de adquisición dinámica CANSAS-UNI-8, de la casa alemana IMC (Integrated Measurement & Control).

Las características del módulo principal son las siguientes:

- Alimentación: 10-50 VDC.
- Consumo de potencia: 200mW <3W
- Sincronización total de la adquisición entre los diferentes módulos tipo BUSDAQ-2 a través de GPS.
- Máxima velocidad de transferencia de la línea del CAN BUS: 1Mbits/s
- Temperatura de operación: -40°C a 85°C
- Interfaz de conexión Ethernet 10/100Mbit.
- Dispone de dos nodos tipo CAN aislados de acuerdo a los estándares ISO11898 (ALTA VELOCIDAD) e ISO 11519-1 (BAJA VELOCIDAD).
- Dispone de un Procesador Digital de Señal (en adelante DSP) que posibilita la realización de cálculos en tiempo real a través de software. Incluye el software compatible que permite la configuración de los distintos experimentos así como la visualización y la toma de datos.
- El módulo incluye una tarjeta de memoria de tipo Compact Flash de 4GB de capacidad.

### 6.2. SISTEMA DE MODULOS BASICOS DE ADQUISICION DINAMICA TIPO CANSAS-UNI8

Se trata de módulos tipo CANSAS-UNI8, y con las siguientes características técnicas:

- Alimentación: de 9 a 32 VDC.
- Temperatura de operación: de -20°C a 65°C, condensación permitida.
- Permite la conexión de hasta ocho (8) canales diferenciales para medida de tensión, temperatura (PT100 y termopares), corriente y puentes extensiométricos.
- La medida de las distintas magnitudes se hacen en grupos de dos (2) canales.
- Incluye dos conectores de tipo SUB-D de 9 pines, para conexión de dos (2) nodos tipo CAN BUS aislados.
- Velocidad de muestreo simultaneo de cada canal de hasta 1000Hz. La velocidad de muestreo es seleccionable a través del software en pasos de 1, 2 y 5.
- Resolución: 16 bits.
- Ancho de banda 200Hz (-3dB)
- Sincronización total de medidas entre todos los canales.

Los módulos de adquisición localizados en los nodos de concentración son totalmente independientes entre sí, lo que significa que un eventual fallo en un nodo no afecta al funcionamiento del resto de ellos. A su vez el conjunto de todos los nodos que componen el sistema de instrumentación se encuentra controlado por un servidor ubicado en una caseta próxima al estribo del puente.

Este servidor se interconecta a través de fibra óptica con los equipos de adquisición de datos distribuidos por los viaductos. Los datos se toman utilizando los programas solicitados para la configuración de los canales y de los ensayos, realizando la adquisición y el registro de las medidas estáticas con una periodicidad a determinar por el usuario (preestablecidas a un dato por minuto). La adquisición y el registro de las medidas dinámicas se realizan por eventos o en una fecha fija que se puede determinar. En situación de registro continuo se almacenan los valores estadísticos. Pero al disponer de un sensor que avisa de la inminente presencia de un tren sobre el tablero, se puede activar la lectura y almacenamiento de los datos brutos correspondientes al paso del tren. Los datos almacenados se transmiten de forma periódica desde el servidor en campo hasta un sistema central ubicado en el Laboratorio Central del CEDEX.

## 7. INSTRUMENTACIÓN

Los diferentes tipos de transductores adecuados a las magnitudes físicas a medir seleccionadas en el proyecto de instrumentación se colocaron en posición en los diversos elementos estructurales de los puentes conectados a su correspondiente nodo de acuerdo al esquema previsto.

### 7.1. MEDIDAS EN PILAS Y ESTRIBOS

#### 7.1.1. Clinómetros

Los clinómetros son los transductores para la medida de giros (rad).

El clinómetro se diseñó como transductor principal de la respuesta de la pila a lo largo del tiempo para fuerzas horizontales. Ante cualesquiera de estas acciones horizontales que soporta la pila (fuerzas de lazo, fuerza centrífuga, viento transversal y longitudinal, fuerzas horizontales si son punto fijo, rozamiento inducido a través del aparato de apoyo, etc.), el giro relativo de la cabeza de la pila con respecto a su base permite deducir tanto el nivel de esfuerzos que solicitan la pila como la deformación (flecha horizontal) en cabeza.

De esta forma es posible detectar, por ejemplo, un incorrecto funcionamiento de un aparato de apoyo deslizante, o una elevada deformabilidad transversal frente a acciones de viento elevado, etc.

Lógicamente, la conversión de los datos del clinómetro en esfuerzos y flechas obliga a conocer la rigidez real de la pila en servicio, por lo que es necesario disponer de un modelo de cálculo de la subestructura que pueda evaluar los fenómenos de no linealidad material y geométrica que caracterizan la respuesta en flexo compresión de la pila.

Los clinómetros se colocaron exclusivamente en la cabeza de pila por la escasa altura de éstas, no considerándose necesario medir en la base o en puntos intermedios del fuste. Se dispusieron tanto en dirección longitudinal como transversal.

Se perseguía en este caso obtener medidas de giros respecto de un eje horizontal –es decir, inclinaciones de un paramento vertical- mediante clinómetros de precisión colocados en la cabeza de una de las pilas, la P4, que es una de las de mayor esbeltez y fácil acceso. Se colocaron dos clinómetros en el fuste de pila correspondiente al apoyo guiado (giro longitudinal y transversal) y uno en el fuste que aloja el apoyo libre (giro longitudinal), lo que hace un total de tres clinómetros en la cabeza de pila.

En la pila estribo se dispusieron dos aparatos, uno para medir en cada plano.

En el estribo convencional se dispuso un único clinómetro para medir inclinaciones en el plano del perfil del puente.

Esto hace un total de 6 clinómetros de precisión en el puente metálico. Todos ellos se situaron en cabeza tanto de pilas como de estribos, allí donde los movimientos son en teoría más significativos. En el puente de hormigón se instrumentaron con clinómetros dos de las pilas, la P8 y la P11, colocando en cada una de ellas cuatro aparatos para medir giros en sentido longitudinal y transversal en ambos extremos de la cabeza de pila.

## 7.2. DESPLAZAMIENTOS:

Los transductores de desplazamiento miden el desplazamiento relativo entre dos puntos de control (mm).

El objetivo principal de esta medida es conocer el desplazamiento longitudinal relativo tablero – subestructura en determinadas secciones. Para ello, se colocan transductores horizontales longitudinales entre tablero y coronación de alguna de las pilas y entre tablero y estribos. El transductor se coloca de forma que el cuerpo del aparato esté fijado a la pila y el vástago sea solidario del tablero (o viceversa).

La medida del desplazamiento relativo tablero – subestructura puede convertirse en un indicador del grado de funcionamiento de los aparatos de apoyo deslizantes. Asimismo, facilitará un registro de los movimientos en la junta de dilatación por acciones reológicas, temperatura y esfuerzos de frenado.

Para la medida de desplazamientos relativos se han utilizado en ambos viaductos transductores inductivos LVDT, dada su precisión, estabilidad y robustez.

Se seleccionaron 3 tipos de transductores, iguales en su constitución pero de tres rangos de medida diferentes para así optimizarlos dentro del rango de medidas previsible:

- LVDT de 250 mm de rango
- LVDT de 150 mm de rango
- LVDT de 50 mm rango

En el viaducto se midieron movimientos longitudinales relativos entre el tablero y el estribo 1, entre el tablero y la pila 1 (en ambos casos mediante aparatos de 250 mm) y en

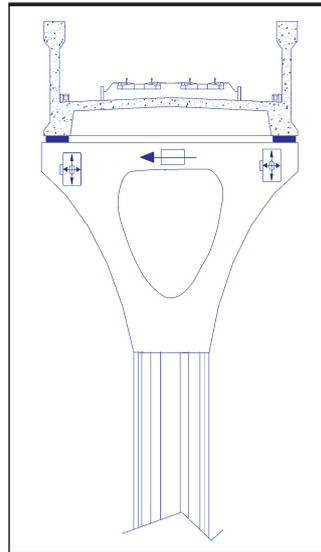


FIGURA 5. Detalle de instrumentación en la pila del viaducto de hormigón.

la pila-estribo (con rango de 50 mm). En cada una de dichas secciones se colocaron dos transductores coincidiendo con la línea longitudinal de apoyos. El número total de transductores a utilizar era pues de 6 en el puente metálico.

Para el puente de hormigón se colocaron de forma análoga transductores inductivos LVDT en la pila estribo (rango 50 mm), en la pila 11 (150 mm de rango) y en el estribo 2 (250 mm de rango). En cada sección se dispuso un par de aparatos en las zonas de los apoyos orientados de forma que permitiera medir los movimientos horizontales longitudinales. En total constituyen 6 puntos de medida.

## 7.3. DEFORMACIONES EN CABEZA DE PILAS:

Dada la configuración de la cabeza de las pilas en el viaducto de hormigón, se consideró de interés medir deformaciones en el elemento superior del triángulo que constituye la cabeza de dichas pilas. Dados los problemas para la medida de deformaciones con galgas extensométricas en el hormigón se habilitó una medida indirecta disponiendo un transductor LVDT con una base de medida de 20 cm.

Esta instrumentación fue colocada en las pilas 8 y 11.

## 7.4. TABLERO - CAJÓN

## 7.5. DEFORMACIONES: GALGAS EXTENSOMÉTRICAS

Las galgas extensométricas (GE) permiten la medida de deformaciones basándose en la variación de resistencia de una rejilla de hilo conductor pegada sobre la superficie del material. La medida se da en microdeformaciones ( $1\mu\epsilon = 10^{-6}$  m/m).

Las GE constituyen un transductor idóneo para materiales metálicos pero no así para el hormigón, donde aparecen una serie de incidencias en relación con la heterogeneidad, la longitud de la base de medida (en comparación con el tamaño máximo del árido), los efectos de la microfisuración, la influencia de la humedad a través del hormigón, etc. que, por lo general, no las hacen aconsejables, especialmente para unas medidas a la intemperie y a muy largo plazo, como es el caso del presente proyecto. Por ello la medida de deformaciones con GE se limitó al tramo metálico, donde, por añadidura, debido a la tipología de la estructura la medida de deformaciones es mucho más interesante.

Hay que señalar que la medida de deformaciones, y a través de ellas, la determinación de tensiones constituye dentro del análisis experimental de estructuras la magnitud que mejor información ofrece del comportamiento tensional del puente.

La disposición de las GE incorporó en buena medida las sugerencias del proyectista y se tuvo en cuenta la limitación real (por condicionantes de acceso a determinadas zonas) de colocación de los transductores.

Se instrumentó el tablero con un número total de 39 galgas de 6 mm de base repartidas entre las jácenas, las diagonales y los puntales que forman ambos cuchillos longitudinales, así como en las vigas transversales de unión entre ellos. La topología e instalación de la red de GE es la más delicada y compleja de toda la instrumentación a colocar, y la que, además, podría ser susceptible de experimentar variaciones a lo largo del periodo de seguimiento.

Un número de galgas fue colocado en las vigas metálicas transversales, recogiendo la especial inquietud del autor del proyecto, para poder investigar el comportamiento de las distintas rigideces de las conexiones de estas vigas con los cuchillos o jácenas longitudinales. La ubicación de estas galgas se fijó en las siguientes zonas:

- En la viga transversal del estribo 1 (3 galgas en el alma vista – detalle D).
- En la pila-estribo (3 galgas en el alma vista – detalle D’).
- En una viga transversal coincidente con la unión jácena/diagonal del cuchillo longitudinal (3 galgas – detalle F).
- En la viga transversal correspondiente a la pila 2 (6 galgas – detalle E).

En los cuchillos longitudinales la disposición de las galgas quedó repartida de la manera siguiente:

- Centros de vano: se dispusieron dieciséis galgas en tres secciones distintas de los cuchillos longitudinales: vanos 2, vano 4 y vano 5. En los vanos 2 y 4, se colocaron dos galgas en la cara interior de cada uno de los cuchillos (4 galgas por sección – detalle A) y en el vano 5 en la cara interior y exterior del cuchillo (8 galgas – detalle B).
- Secciones trianguladas sobre pila 4: ocho galgas dispuestas simétricamente, 2 en los puntales, 2 en diagonales y 4 en las vigas principales – detalle C.

En resumen, se instaló un total de 15 sensores extensométricos en las vigas transversales y 24 en los cuchillos longitudinales.

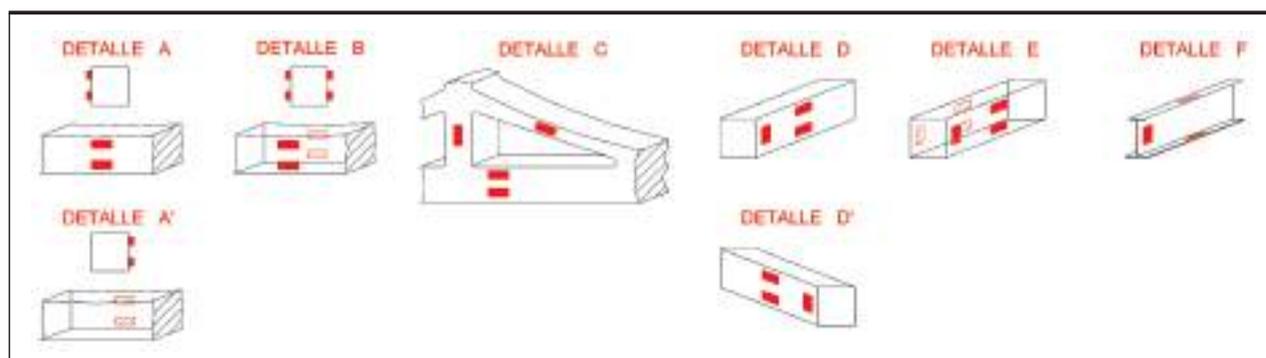


FIGURA 6. Detalles de localización de las galgas extensométricas.

## 7.6. ACELERACIONES

Los acelerómetros miden aceleraciones, uni o multiaxiales en los puntos de control (m/s<sup>2</sup>). La utilización de los acelerómetros es independiente del material de la estructura.

Los acelerómetros de eje sensible vertical instalados en el tablero permitieron realizar un estudio de la respuesta dinámica global del viaducto al paso de los trenes, no solamente en el dominio del tiempo, en el que se obtendrán los niveles extremos de aceleración, sino también en el de la frecuencia, lo que permitió obtener las formas y frecuencias modales en el plano vertical excitadas por las cargas ferroviarias.

Complementariamente, con los acelerómetros de eje activo horizontal se intentaba medir aceleraciones relacionadas con las fuerzas centrífugas (dirección transversal) y efectos de aceleración y frenada de los vehículos (dirección longitudinal).

Los aparatos utilizados respondían a dos tipos distintos:

- a) Servoacelerómetros de eje vertical: Dan una magnífica respuesta para frecuencias bajas, como son las que aparecen en estructuras de ingeniería civil y son robustos y fiables. Se utilizarán para la medida de aceleraciones verticales.

- b) Servoacelerómetros de eje horizontal: tienen las mismas características de los anteriores y se utilizarán para el registro de las aceleraciones horizontales

En el puente metálico se colocaron 16 servoacelerómetros repartidos a lo largo y ancho de la losa de hormigón armado. Se optimizó la disposición de los aparatos en uno de los dos lados de la estructura (aquel por donde discurrirá básicamente todo el cableado), en donde se colocaron 12 acelerómetros y se complementaron con 4 aparatos en el lado opuesto.

Por otro lado se colocaron 2 acelerómetros biaxiales horizontales con ejes activos longitudinal y transversal al puente en dos de los vanos, el 2 y el 4.

En el puente de hormigón la disposición de los acelerómetros es totalmente análoga a la del puente metálico pero se incrementó el número de acelerómetros: 19 de eje vertical y dos biaxiales de ejes horizontales.

## 7.7. MEDIDA DEL ENTORNO MEDIOAMBIENTAL

Menos relacionadas con la respuesta intrínseca del tablero, aunque de utilidad para precisar las acciones reales sobre el puente, son las magnitudes asociadas a los parámetros meteorológicos, principalmente la intensidad del viento y su componente, así como la temperatura del ambiente.

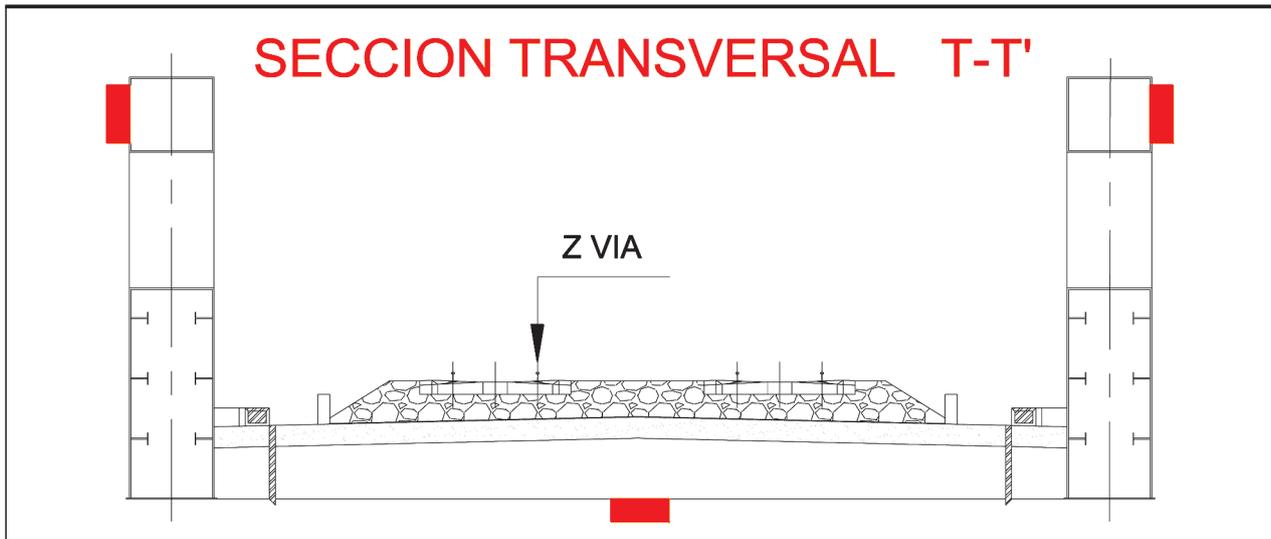


FIGURA 7. Ubicación de las sondas de temperatura en la sección del puente metálico.

La zona de emplazamiento del puente, por ser abierta y plana, no presentaba a priori diferencias medioambientales notables de unas zonas a otras, por lo que se pudo reducir el número de sensores aprovechando los datos para ambas estructuras.

### 7.8. SONDAS DE TEMPERATURA

Las sondas de temperatura fueron adheridas a las superficies metálicas o introducidas en los volúmenes de hormigón, y miden temperatura (°C). En este caso los transductores utilizados son resistencias de platino (RTD).

Dada la importancia de las deformaciones longitudinales del tablero metálico por efectos térmicos y su traducción en desplazamientos respecto, especialmente, del Estribo 1, se consideró conveniente tomar datos de temperatura en el ambiente y en la estructura.

En el tramo metálico se instalaron, en la pila 5, 3 sensores colocados en zonas de distinto soleamiento en la chapa metálica.

Aparte de ello se dispuso un termómetro de temperatura ambiente en la pila-estribo, mientras que en el tramo de hormigón se colocaron sendos sensores en las pilas 8 y 11.

### 7.9. ANEMÓMETROS

Los anemómetros miden la velocidad del viento (m/s) y en general van provistos de veleta para recoger su dirección.

Con esta medida se intentaba establecer un registro continuo de la intensidad y dirección de la acción del viento, calibrando especialmente la importancia de las ráfagas. El registro temporal completo de estos anemómetros fue coordinado con el del resto de medidas dinámicas que se realizaron (clinómetros, acelerómetros y extensómetros).

Estos anemómetros midieron la velocidad del viento en modo dinámico continuo, extrayendo exclusivamente parámetros estadísticos debido al excesivo volumen de datos que hubiera requerido su grabación total, pero al paso de los trenes o ante la superación de eventos prefijados se grababan registros temporales para un posterior análisis, con intención de caracterizar la respuesta de la estructura frente a distintas intensidades de la acción del viento en combinación con la sobrecarga. Se colocó un anemómetro sobre la propia estructura, en el puente de hormigón.

### 7.10. MEDIDA DE LA VELOCIDAD DE LOS TRENES

También relacionado con las acciones a considerar en la explotación de la línea y por tanto, aunque indirectamente, con la respuesta de la estructura, es de interés conocer la velocidad de circulación de los trenes por los tableros. Para ello se previó realizar la medición instalando en dos secciones, antes del estribo 1 y en la pila estribo, parejas de galgas extensométricas situadas en el patín del carril ferroviario y separadas una distancia conocida con exactitud, de manera que acusasen el paso de cada uno de los ejes individualmente. La ventaja de este procedimiento, a pesar de ser indirecto por el parámetro de distancia antedicho, es que permite, aunque sólo sea de forma cualitativa, conocer, además de la velocidad, la composición de cargas de los convoyes que van circulando sobre la estructura a lo largo de los años.

## 8. DISTRIBUCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN

La instrumentación se concentró en 13 nodos distribuidos a lo largo de los dos puentes. Los nodos 1 a 6 corresponden a la instrumentación recogida en el puente metálico mientras que la instrumentación correspondiente al puente de hormigón se recoge entre los nodos 7 a 13.

### 8.1. PUENTE METÁLICO

#### (Nodos 1 a 6)

- Acelerómetros verticales. Se dispuso un total de 16 acelerómetros verticales distribuidos en ambas márgenes y en puntos de centro de vano o a un cuarto de la pila, según plano adjunto.
- Acelerómetros horizontales. Se dispuso un total de 4 acelerómetros.
- Medición de desplazamientos (LVDTs). Se dispusieron 6 LVDTs.
- Inclinaciones. Se dispusieron 6 inclinómetros.
- Bandas extensométricas. Se dispuso un total de 47 bandas extensométricas distribuidas entre los patines de la vía, vigas y cuchillos laterales del puente.
- Temperatura. Se dispusieron 2 termopares.

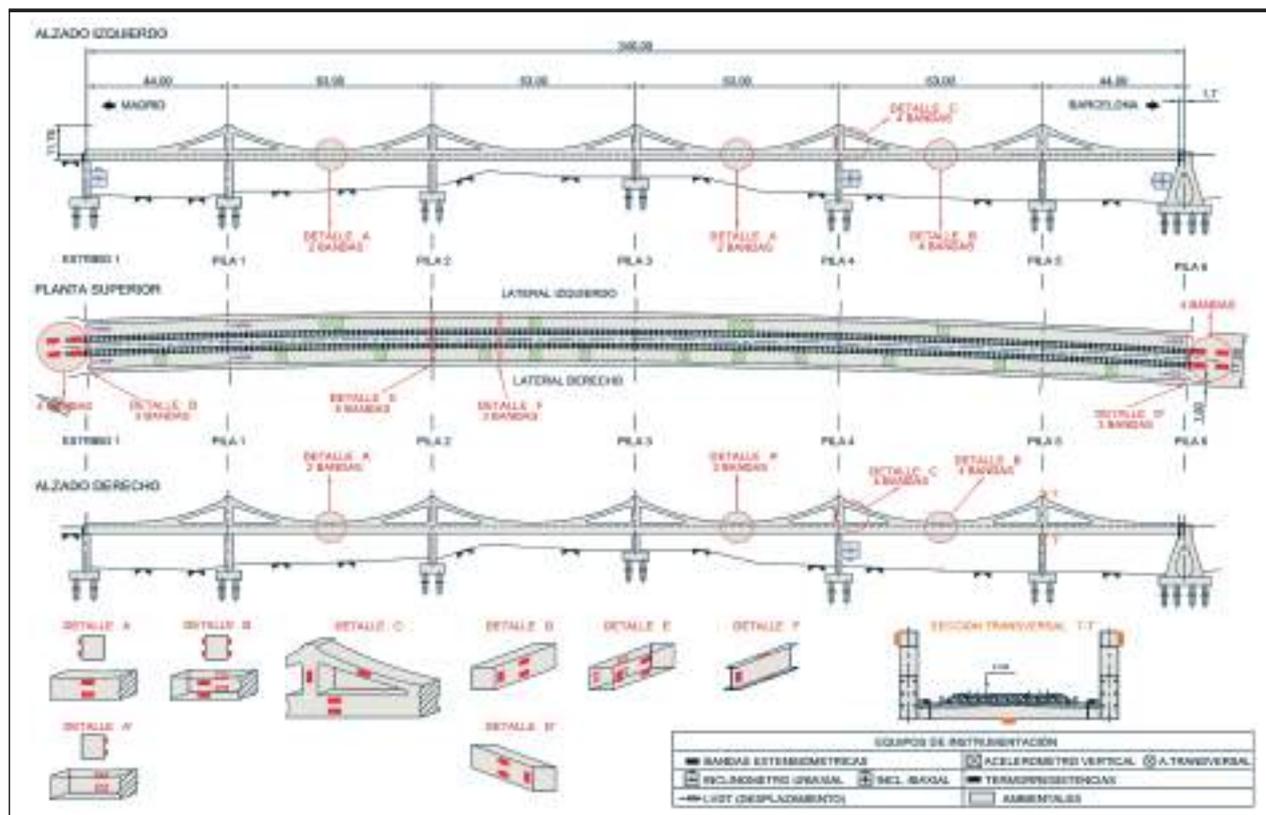


FIGURA 8. Distribución de los puntos de medida en el puente metálico.

## 8.2. PUENTE DE HORMIGÓN (Nodos 7 a 13)

- Acelerómetros verticales. Se dispuso un total de 25 acelerómetros verticales distribuidos en ambas márgenes y en puntos de centro de vano o a un cuarto de la pila, según plano adjunto.
- Acelerómetros horizontales. Se dispuso un total de 4 acelerómetros.
- Medición de desplazamientos (LVDTs). Se dispusieron 8 LVDTs.
- Inclinaciones. Se dispusieron 8 inclinómetros.
- Bandas extensométricas. Se dispuso un total de 4 bandas extensométricas distribuidas entre los patines de la vía en el estribo 2.
- Temperatura y viento. Se dispusieron 2 termopares y 2 sensores para registrar la velocidad y dirección del viento.

## 9. ESTRUCTURA DE LOS DATOS Y SOFTWARE UTILIZADO

Como se ha avanzado anteriormente, con la instrumentación proyectada se perseguía contrastar dos tipos de comportamiento de las estructuras:

- El que responde a situaciones a largo plazo, como es el derivado de los procesos reológicos en las estructuras de hormigón, o las variaciones de geometría producidas por efectos térmicos de tipo estacional, que afectan a todo tipo de estructura, independientemente del material.
- Aquel que responde a la respuesta dinámica de la estructura al paso del tren.

Para ello se han definieron dos tipos de registros: los registros de carácter estático (para el estudio del comportamiento de las estructuras a largo plazo) y los registros dinámicos (estudio de la respuesta dinámica durante determinados eventos).

El software utilizado tanto para el tratamiento de los datos en tiempo real y adquisición de los mismos es propio del sistema de adquisición: IMC Devices, Famos y Famos Online. Por otro lado el análisis de los registros obtenidos se realiza mediante un software desarrollado en el Laboratorio Central llamado SIACOD (LCEYM).

### 9.1. TIPOS DE REGISTROS

La frecuencia de muestreo de los datos para todos los puntos de medida ubicados en los viaductos es de 200 datos por segundo. Partiendo de los registros en tiempo real se crean cuatro canales virtuales por canal de cada sensor. Estos canales virtuales almacenan los datos originales filtrados previamente. Se almacena el valor máximo, mínimo y medio de los datos registrados con una frecuencia de 1 dato por minuto. El cuarto canal virtual realiza un registro reducido almacenando solo los datos cuando se supera un determinado valor de amplitud relativa entre datos.

Los datos se almacenan en periodos de 24 horas. Dado que los diferentes equipos de toma de datos se encuentran sincronizados con aparatos de GPS la hora que queda registrada corresponde a la hora oficial de España menos dos horas en horario de verano y de una hora en el horario de invierno, es decir de tiempo universal o GMT, detalle que no convenía olvidar para descartar falsas alarmas ligadas a los horarios de RENFE (sólo disponibles en horario civil).

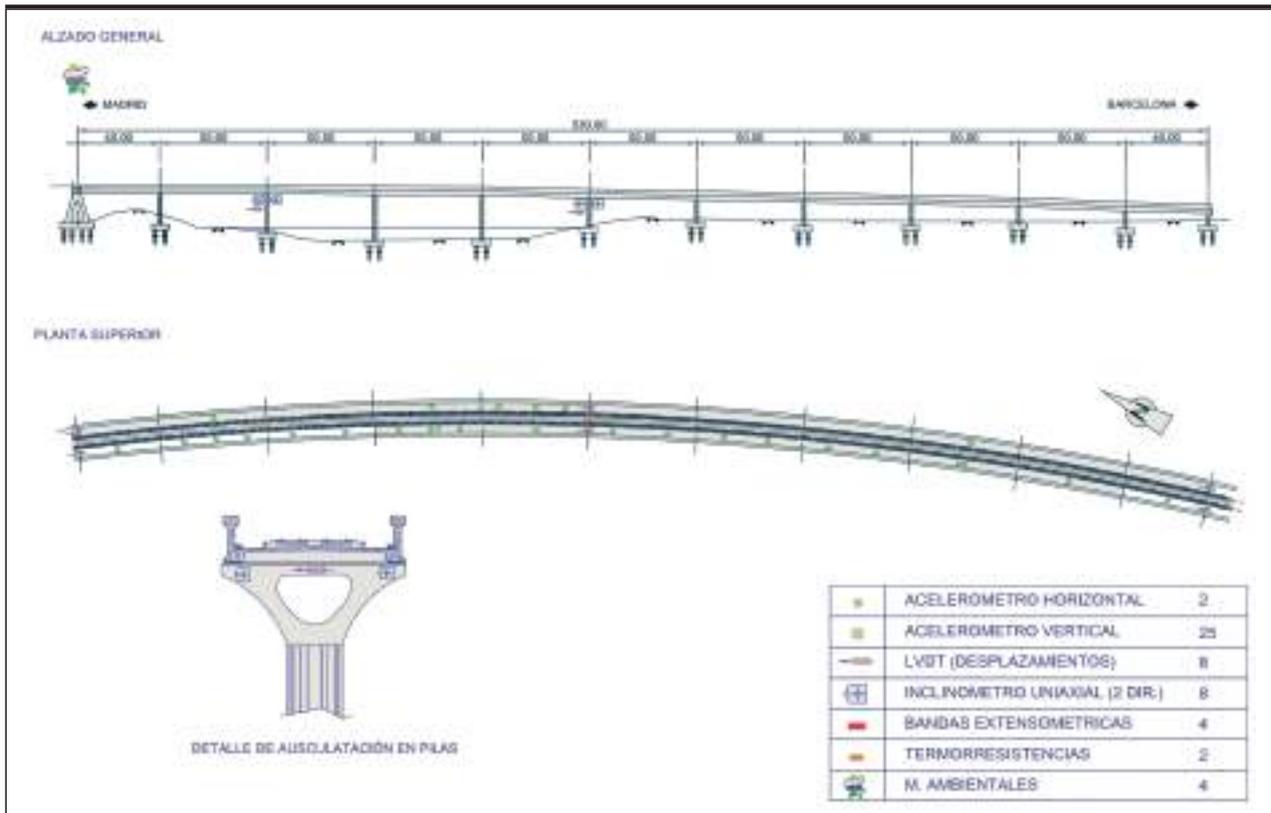


FIGURA 9. Distribución de los puntos de medida en el puente de hormigón.

Los registros dinámicos se realizaron, como se ha dicho, con una frecuencia de muestreo de 200 datos por segundo. Se realizó un registro continuo de ensayo dinámico en periodos de 24 horas almacenando solo los registros durante el paso de los diferentes trenes mediante disparo por eventos en las bandas de las vías. Así pues se obtuvo un archivo por sensor y día en el que se recogieron los pasos de los trenes de forma consecutiva eliminando los registros entre pasos de trenes.

## 10. INSTALACIÓN

El éxito de un trabajo como el presentado en este artículo depende tanto de una buena planificación del proyecto como de una mejor instalación de todo el sistema.

La instalación del sistema de auscultación se puede dividir en dos grandes bloques: por un lado la instalación correspondiente a elementos que se ubican en el exterior de la plataforma que da paso a las circulaciones (y fuera de la zona de seguridad del viaducto) y aquellas que se localizan en el interior del viaducto.

Para el primer bloque se necesita de una serie de medios auxiliares para acceder a los puntos de medida definidos, lo que ralentiza y dificulta la puesta en obra de los elementos correspondientes.

Para los trabajos en interior del tablero, si bien los requerimientos en medios auxiliares no eran tan importantes como los anteriores, se presenta una dificultad añadida: cuando, como en este caso, la línea se encuentra operativa. Al existir tráfico ferroviario los trabajos en el interior de los viaductos se han de ejecutar en una franja horaria concreta, fuera del horario de circulación de trenes, es decir, de noche entre las 00:00 horas y 05:00 aproximadamente. Este as-

### REGISTROS ESTÁTICOS

- Frecuencia de muestreo permanente a 200 datos/s.
- Mediante software IMC (FAMOS ON LINE).
  - 3 canales virtuales en estático a 1 dato/min.
    - Máximo, Mínimo y Medio.
  - 1 canal virtual pseudodinámico.
    - Reducido (frecuencia en función de varios parámetros).
  - Grabación en continuo.
- Puente metálico → 340 canales virtuales estáticos.
- Puente de hormigón → 216 canales virtuales estáticos.

### REGISTROS DINÁMICOS

- Frecuencia de muestreo permanente a 200 datos/s.
- Mediante software IMC (FAMOS ON LINE).
  - 1 canal virtual dinámico por cada canal físico a 200 datos/s.
  - Grabación por eventos.
- Puente metálico → 85 canales virtuales dinámicos.
- Puente de hormigón → 54 canales virtuales dinámicos.

FIGURA 10. Esquema de los tipos de registros definidos en la adquisición de los datos.



FIGURA 11. Utilización de medios auxiliares en el exterior de los viaductos.

pecto dificulta en gran medida las tareas, tanto por la escasez de tiempo como por las condiciones de visibilidad.

En la instalación de las conducciones se optó por montar una canalización independiente a lo largo de los dos viaductos merced a una canaleta metálica para evitar problemas de interferencias con otras instalaciones de ADIF. En la siguiente fotografía se observa la canalización realizada a lo largo del viaducto así como de dos puntos de medida protegidos y un nodo de adquisición.

### 11. ANÁLISIS DINÁMICO. PUENTE METÁLICO

Una vez instalada toda la instrumentación y calibrados todos los sensores dio comienzo la fase de adquisición de datos

que se extendió de forma ininterrumpida, salvo un par de cortes ocasionales, durante doce meses. En modo estático los datos se iban procesando estadísticamente sobre la marcha utilizando el FAMOS, mientras que las series de lecturas dinámicas activadas por la excitación de la banda pegada en el patín actuando como “trigger” se almacenaban en su totalidad. Es decir, que se dispone de más 350 ficheros de datos que contienen una información estacional completa de casi todos los días del año.

Por lo que respecta al modo dinámico el tratamiento era el siguiente: mediante la definición de eventos, el paso de un tren o la velocidad extrema del viento, se procedía al registro de los datos dinámicos. De esta manera se obtenía un archivo diario en el que se almacenaba el paso de cada tren

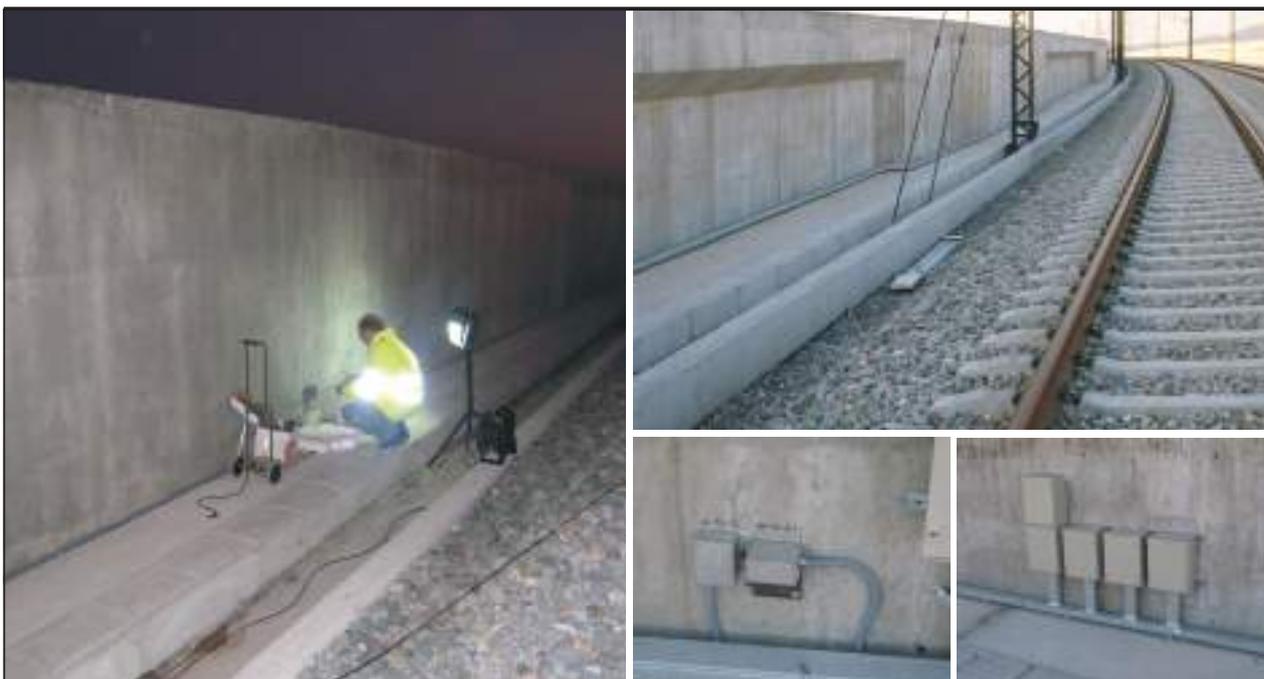


FIGURA 12. Trabajos nocturnos y detalles de acabado de puntos de medida, canalización y nodos.

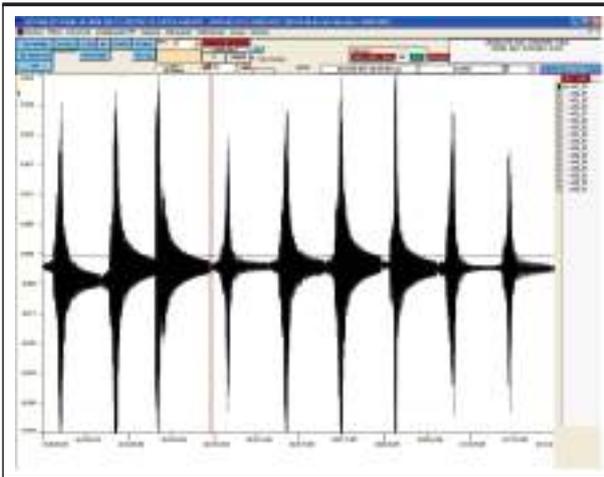


FIGURA 13. Registros de un acelerómetro de varios eventos. Puente metálico.

por los puentes en ambos sentidos. Posteriormente se analizaban los datos obtenidos seleccionando un determinado evento almacenado. Por otro lado, el sistema de adquisición permite un análisis casi inmediato de la señal registrada mediante el software que incorpora (FAMOS®).

La forma de los datos de partida de un ensayo dinámico se puede visualizar en el siguiente gráfico individualizado del output de uno de los acelerómetros antes de pasar al dominio de la frecuencia. Este paso se hace con la técnica numérica simplificada de Cooley&Tukey y utilizando los datos de todos los sensores al unísono para obtener las formas modales y autovalores propios. De esta manera se identifican las características modales de la estructura en modo de análisis modal operacional. El procedimiento operacional consiste en utilizar como fuerza de excitación de la estructura el

tren que pasa la vía y como señal la estela de vibraciones posterior al paso.

En concreto el análisis se realiza sobre el evento de paso de un tren correspondiente a un AVE de la serie 103. En la siguiente figura se muestran los registros correspondientes a las bandas extensométricas dispuestas para la detección del tren. Se observa como se recoge perfectamente el paso de cada eje por el punto de medida permitiendo la identificación del tipo de tren.

Para el análisis de los datos se ha utilizado el software SIACOD desarrollado en el Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX. Se trabaja en el dominio de la frecuencia utilizando los algoritmos de la transformada rápida de Fourier (FFT) mediante la descomposición de la señal en componentes de frecuencias diferentes. Como verificación del análisis se realiza un estudio en paralelo mediante un software de uso comercial de la casa LMS llamado LMS Test Lab. Con el programa desarrollado en el Laboratorio Central de Estructuras y Materiales se han estimado las frecuencias de los primeros modos de vibración y las correspondientes formas modales.

En la figura 15 se muestran los registros obtenidos en todos los acelerómetros localizados en el puente metálico, así como una estimación previa de los resultados en el dominio de la frecuencia (imagen derecha).

Los valores de las frecuencias fundamentales estimadas y las formas modales de los tres primeros modos de vibración de flexión vertical son las que se muestran a continuación. Las tres primeras frecuencias experimentales extraídas, tal como se aprecia en los gráficos que se acompañan a continuación, arrojaron los valores de  $f_1=1.392$ ,  $f_2=1.831$  y  $f_3=2.344$  Herzios respectivamente, cuando la frecuencia teórica del primer modo facilitada por el Proyectista había sido de 1.33 Herzs, lo que significa un ajuste teórico-práctico más que satisfactorio, incluso tratándose de un puente en su primer año de servicio y construido con las prescripciones técnicas propias de una normativa rigurosa.

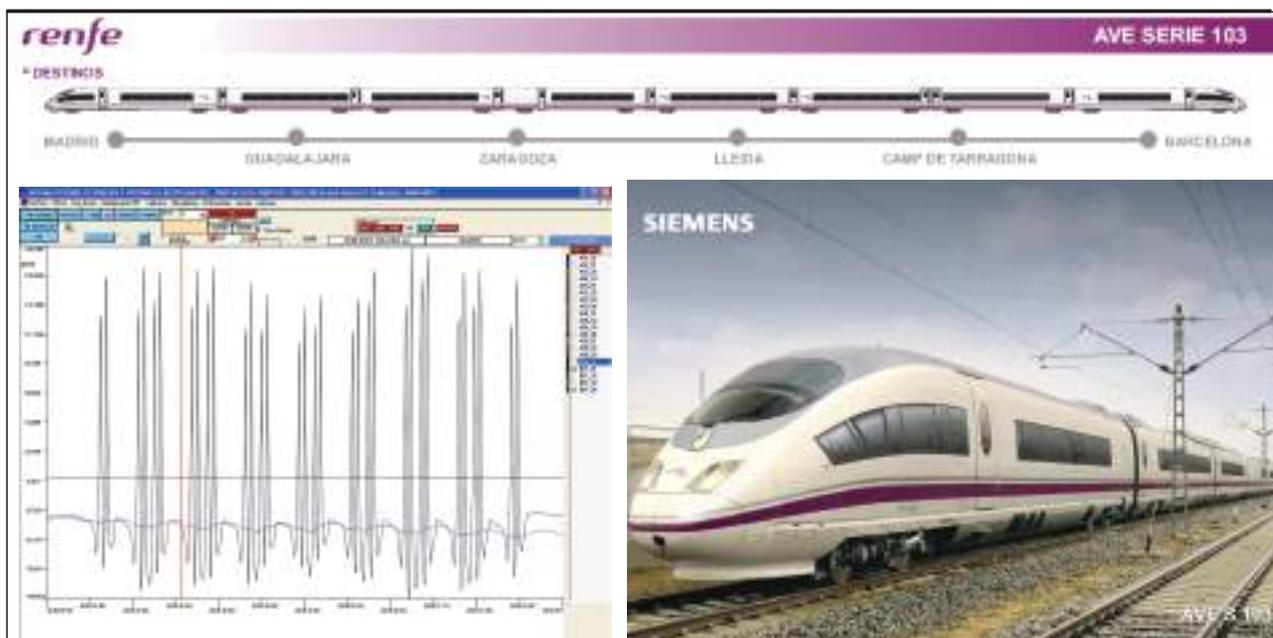


FIGURA 14. AVE -SÉRIE 103 y registros del paso del tren por el punto de medida.

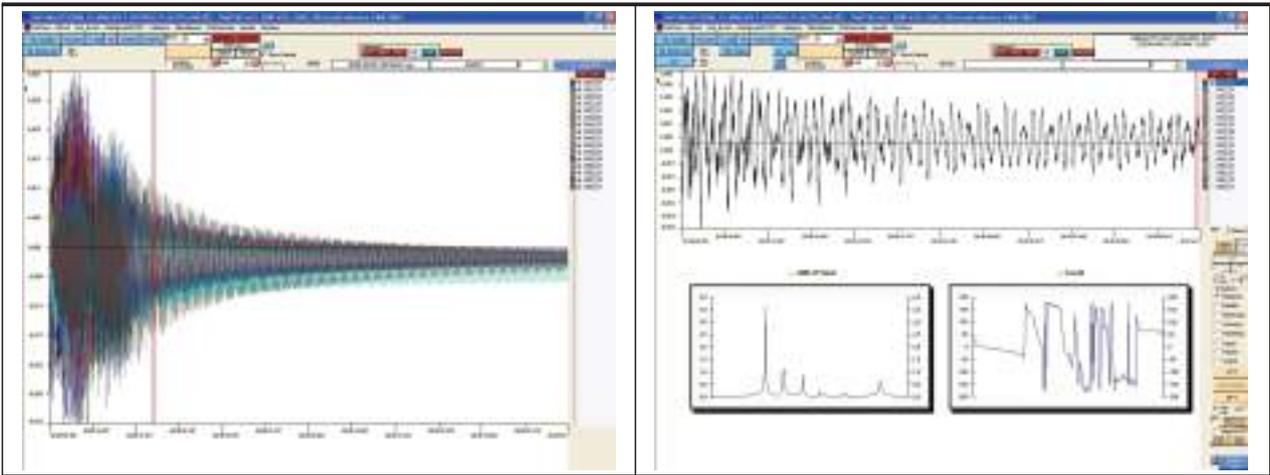
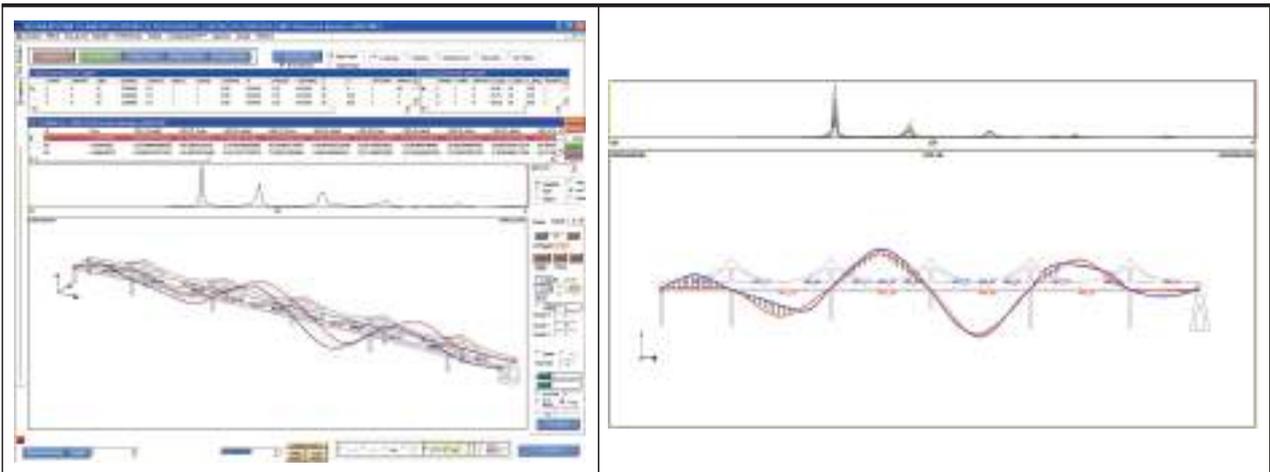


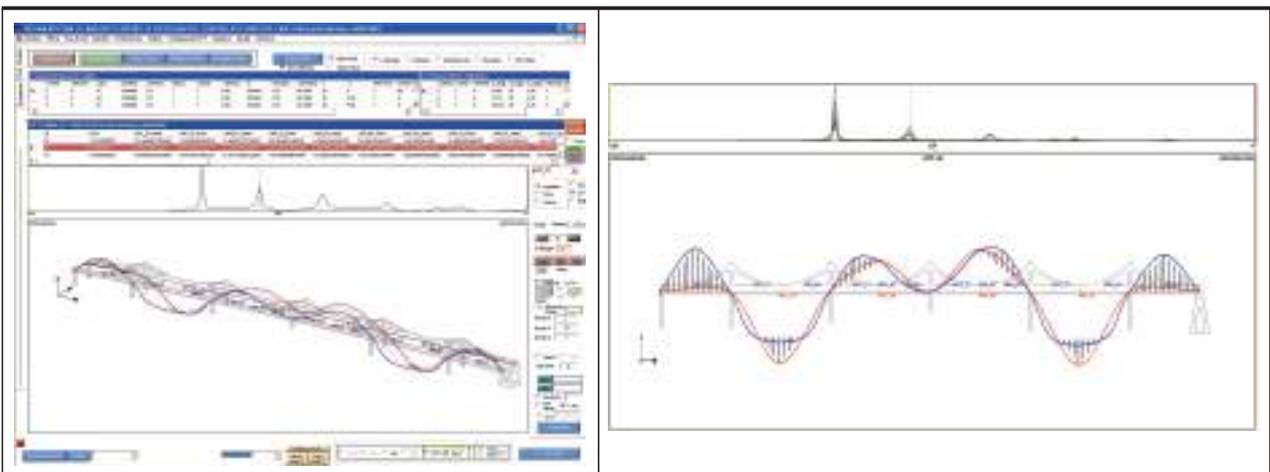
FIGURA 15. Registros de los acelerómetros del paso del tren en el puente metálico.

1<sup>er</sup> Modo experimental (1.39 Hz)

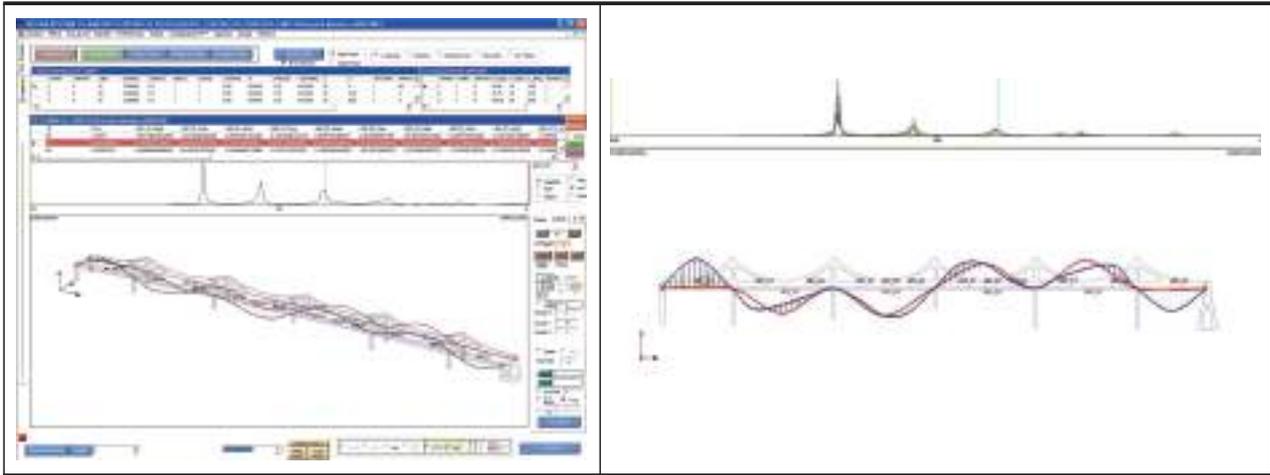


Modo teórico: 1.33 Hz

2<sup>o</sup> Modo experimental



### 3<sup>er</sup> Modo experimental



## 12. AGRADECIMIENTOS

El trabajo presentado en este artículo ha sido posible gracias a la colaboración de todos los miembros integrantes del área de Auscultación de Estructuras del Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX, con cuyo esfuerzo se pudo culminar el objetivo del proyecto en unos plazos estrechos y bajo unos condicionantes de extrema dificultad.

Igualmente, hay que agradecer al Administrador de Infraestructuras Ferroviarias que haya confiado en el Laboratorio Central para llevar adelante esta tarea de investigación a través del Convenio existente entre el CEDEX y el ADIF correspondiente al periodo 2006-2009.

También a los proyectistas de ambas estructuras en la empresa P-Delta por los datos de proyecto y la información facilitada.

Y a la División de Puentes de la empresa INECO-TIFSA por su comprensión y sus sugerencias.

## 13. REFERENCIAS

- M. PAZ. - Dinámica Estructural. Teoría y cálculo. Editorial Reverté, S.A. (2002)
- H.JIMIN ; F.ZHI-FANG. - Modal Análisis. Butterworth Heinemann. (2001)
- C.W. de SILVA.- Vibration Monitoring, Testing, and Instrumentation. CRC Press. (2007)
- MINISTERIO DE FOMENTO. -Instrucción de acciones a considerar en puentes de ferrocarril (IAPF). Centro de publicaciones del Ministerio de Fomento (2008)
- K. HOFFMANN. - An introduction to measurements using Strain Gages. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt. (1989)
- R. PALLAS. - Sensores y acondicionadores de señal. Ed. Marcombo. S.A. (1994)
- H. WENZEL. - Health Monitoring of Bridges. Wiley. (2009)
- IMC. - busDAQ CAN-Datalogger User`s Manual. imc Meßsysteme GmbH, Voltastrasse 5, 13355 Berlin. (2007)
- IMC. - FAMOS. Fast Analysis And Monitoring Of Signals. Version 5.0. imc Meßsysteme GmbH, Voltastrasse 5, 13355 Berlin. (2002)
- IMC. - CANSAS User's Manual Version 1.4. imc Meßsysteme GmbH, Voltastrasse 5, 13355 Berlin (2007)
- LCEYM. Sistema de Adquisición y Control de Datos (SIACOD). Manual de usuario. Documento Interno. (2009)
- P-DELTA. Proyecto constructivo de los viaductos de alta velocidad sobre el río Llobregat.
- J.COOLEY&J.TUKEY, An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series, Math. Comp., 19 (1965) p.p. 297-301
- E.O. BRIGHAM, The Fast Fourier Transform, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1974.
- R. BRACEWELL, The Fourier Transform and its Applications, McGraw-Hill, NY, 1978.
- WILLIAM L. BRIGGS&VAN EMDEN HENSON, The DFT Manual, SIAM 1995.