



**CONTROL ESTADÍSTICO Y MODELOS DE REGRESIÓN
LINEAL. UNA FORMA PRÁCTICA DE CONTROL DE
PUENTES**

**STATISTICAL CONTROL AND REGRESSION MODELS.
A PRACTICAL APPROACH IN BRIDGE CONTROL**

Tesis doctoral

elaborada por

David García Sánchez

dirigida por

Marcos J. Pantaleón Prieto

Departamento de Ingeniería Estructural y Mecánica

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

Universidad de Cantabria

Santander, 2016

García Sánchez, David
Tesis Doctoral

Departamento de Ingeniería Estructural y Mecánica
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Universidad de Cantabria
Santander
España

2016

PRÓLOGO

Esta Tesis viene a cubrir un vacío existente aún hoy entre la Instrumentación de Puentes y los Sistemas de Gestión con el fin de convertir los datos en información útil en el mayor número posible de ámbitos (proyecto, explotación y gestión del mantenimiento).

Todos los comités de trabajo relativos a los Sistemas de Gestión de Puentes existentes en el mundo comparten la idea fundamental de la importancia del aporte sistemático de datos de calidad (procedentes de la inspección visual, normalmente) para la obtención de resultados concluyentes. El dato es el origen de la información y, por lo tanto, un dato subjetivo o erróneo conduce irremediablemente a un estudio sin validez. Todos comparten la idea de la necesidad de tecnificar las inspecciones para que se conviertan, además, en una verdadera fuente de control de las principales variables que representan el comportamiento de la misma.

A pesar de ello, los esfuerzos parecen estar centrados en la simulación de tácticas de gestión más que en la tecnificación de la obtención de datos y mediciones. A día de hoy los Sistemas de Gestión priorizan el orden de actuación de unas estructuras sobre otras y, sobre ese orden, se simulan distintas tácticas de intervención sobre la red mediante Cadenas de Markov, generalmente.

Esta Tesis aporta, precisamente, un procedimiento para convertir los datos obtenidos mediante la Instrumentación en información. Estos resultados serán útiles no solo en términos de conservación y mantenimiento, sino incluso para el proyectista que al acceder a las bases de datos de registros podrá retroalimentar sus modelos de cálculo dando lugar a lo que ya se conocen como meta-modelos de cálculo o incluso revisar las normativas vigentes (muy del lado de la seguridad en los casos en los que no hay datos experimentales). Durante la Instrumentación se validarán los datos y se crearán los modelos que, posteriormente durante las inspecciones de campo, se irán actualizando progresivamente. Los nuevos datos de campo servirán tanto para comprobar la evolución de la medida (Control Estadístico) como para ajustar el modelo inicial (Bandas de Predicción) ante los nuevos datos aportados, definiendo así unos nuevos escenarios (infinitos, a priori) del estado del puente. En última instancia, se simularía la efectividad de distintas tácticas de gestión a nivel de Red de puentes (Cadenas de Markov).

Las herramientas estadísticas presentadas no son novedosas en sí mismas pero lo que sí es novedoso es la visión global e integradora aportada para el aprovechamiento máximo de la experiencia de la Instrumentación en el campo de la Ingeniería para el nuevo Siglo.

Esta Tesis trata, en definitiva, de Instrumentación, Control, Predicción y Sistemas de Gestión de Puentes, trabajos que lleva desarrollando el autor de la misma en APIA XXI desde 2006.

RESUMEN

La experiencia acumulada tanto en el campo del diseño, como del mantenimiento y la explotación, necesita retroalimentarse con los datos obtenidos del análisis del comportamiento real de la estructura una vez puesta en servicio. En el caso del diseño, aspectos tan fundamentales como el dimensionamiento de las juntas de dilatación, el funcionamiento de los aparatos de dilatación de vía en el caso de puentes de ferrocarril para Alta Velocidad, el comportamiento de las pilas frente a esfuerzos horizontales o el funcionamiento de los aparatos de apoyo deslizantes presentan aún ciertas incógnitas no del todo resueltas. Estos puntos pueden quedar satisfechos a la luz de los resultados obtenidos tanto por observación y medición directa en trabajos de inspección como por algunas aportaciones procedentes del control e interpretación de los resultados obtenidos mediante Instrumentación.

En cuanto al mantenimiento y conservación, los esfuerzos de los principales equipos de investigación van orientados a la estimación de la vida remanente y la posibilidad de aumento de las cargas de tráfico mediante metodologías en la que se incluyen los resultados procedentes de la Instrumentación de la estructura (cuando existe).

Es evidente que la estimación de carga y vida útil da una idea importante del estado de conservación de la estructura a nivel global pero, en cambio, existen elementos de gran responsabilidad en los puentes cuyo buen funcionamiento es necesario conocer para planificar las labores de sustitución por ser costosas técnica y económicamente. Esto ocurre precisamente con los aparatos de apoyo. Por todo ello se hace necesario conocer el ratio de deterioro y estimar el momento más oportuno para la intervención y sus consecuencias.

Es de esperar que en el futuro la inspección del puente (orientada hacia SHM, Structural Health Monitoring) se centre en la valoración cuantitativa más que en la inspección visual gracias a la Instrumentación. La variedad de sensores en un puente dará datos en numerosos puntos. Los datos serán analizados y el deterioro será detectado automáticamente por los ordenadores de las estaciones de trabajo. Cuando los problemas se produzcan los ingenieros deberemos ser capaces de analizar condiciones estructurales y formular estrategias correctoras.

El uso extensivo de sensores será posible con los avances en la miniaturización electrónica, la mejora de las comunicaciones y el abaratamiento de los costes hasta conseguir equipos de medición compactos, permanentes y económicos.

Las nuevas técnicas de inspección ya pueden ser implantadas. Los sensores y el hardware necesario para el envío de datos también. Por lo tanto, parece claro que los esfuerzos deben estar orientados hacia el análisis de los datos, la interpretación, la evaluación del error en las mediciones, identificación de las condiciones del puente basadas en los datos, la estimación de las actuaciones de rehabilitación y, sobre todo, en la integración definitiva de los resultados procedentes de la Instrumentación en pro de una Evaluación Integral. De este modo se consigue dar una utilidad global a la Instrumentación desde el nivel del puente individual al de una red compuesta por un número indeterminado de ellos.

Con este trabajo se pretende facilitar, en primer lugar, una metodología sobre el tratamiento de los datos procedente de la Instrumentación y sus implicaciones a nivel de puente y red. Esta metodología se basa en la aplicación de distintas herramientas estadísticas frecuentemente usadas en otros campos de la Ingeniería como es el Control Estadístico para la validación de la calidad de las series de datos y robustez de los posteriores modelos de estudio.

En segundo lugar, el análisis se orienta hacia la predicción consiguiendo definir una nueva metodología que se hace extensible a cualquier elemento fungible del puente (aparatos de apoyo, juntas de dilatación, aparatos de dilatación de vía, etc.). Esto se consigue mediante las Bandas de Predicción.

En tercer lugar, una vez alcanzada la capacidad de predecir se pueden definir distintos escenarios con los cuales el gestor podrá simular la efectividad de tantas tácticas de gestión como crea convenientes. La mayor parte de los programas usados para gestión de puentes permiten ya desarrollar esta última fase mediante el uso de Cadenas de Markov.

Con todo ello se trata de aprovechar al máximo la experiencia acumulada durante la Instrumentación incluso una vez retirada o puesta fuera de servicio.

ABSTRACT

The experience gained both in the field of design, and the maintenance and operation, needs to be fed back to the data obtained from the analysis of the actual behavior of the structure once commissioning. As fundamental topics as the dimensioning of expansion joints aspects, expansion devices in the case of high-speed railway bridges, the performance of piers against horizontal forces or sliding capacity of POT bearings still have some unknowns not entirely resolved. These points can be satisfied in the light of the results obtained by both direct observation and measurement and inspection work for some input from the control and interpretation of results obtained through the Monitoring.

In general, the efforts of leading research teams are aimed at estimating the remaining life and the possibility of increased traffic loads using a methodology in which the results from the Monitoring of the structure are included (when there exists).

It is clear that the estimated load and life gives an important insight into the state of conservation of the structure globally but, instead, there are elements of great responsibility on bridges whose proper functioning is necessary to know to plan the work of replacement be technically and economically costly. This is precisely the support equipment. Therefore, it is necessary to know the ratio of impairment and estimate the best time for intervention and its consequences.

Hopefully, in the future bridge inspection (SHM, Structural Health Monitoring) focus on the quantitative assessment rather than the visual inspection by Monitoring. The variety of sensors on a bridge gives details on many aspects. The data will be analyzed and the deterioration will be automatically detected by the computer workstations. When problems occur engineers we must be able to analyze structural conditions and formulate corrective strategies.

The extensive use of sensors is possible with advances in electronic miniaturization, improved communications and lower costs to achieve compact equipment, permanent and economic measurement.

The new inspection techniques can already be implemented. Also sensors and hardware. Therefore, it seems clear that efforts must be oriented to data analysis, interpretation, statistical analysis, evaluation of error in measurements, identification of

bridge conditions based on the data, the estimation of performances rehabilitation and, above all, in the final integration of the results from implementation towards a comprehensive Assessment.

This work is intended to facilitate, first, a methodology on the treatment of the data from the Monitoring and its implications at the level of network bridge. This methodology is based on the application of different statistical tools commonly used in other fields of engineering such as Statistical Control for validating the quality of the data sets and robustness of the later models of study.

Second, the analysis is oriented toward getting define a new prediction methodology is extended to any expendable item bridge (bearings, expansion joints, expansion devices, etc.). This is achieved by Prediction Bands.

Third, after reaching the ability to predict different scenarios can be defined with which the manager may simulate the effectiveness of many management tactics as convenient creates. Most of the programs used to bridge management and allow to develop this last phase by using Markov Chains.

The gold point is to maximize the experience gained in the Monitoring process even after removal or decommissioning.

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Me gustaría mostrar mi agradecimiento a todas las personas que me han apoyado durante la investigación y la posterior redacción de esta Tesis.

Al director de mi Tesis, Marcos Pantaleón, y a Oscar Ramón Ramos a los que agradezco la oportunidad que me brindaron de poder compaginar trabajo e investigación dentro de APIA XXI.

A mis compañeros actuales y antiguos de APIA XXI mi más sincero agradecimiento.

A Maria Isabel Ruimayor Falagán; por su ayuda eficiencia y amabilidad desde la Secretaría del Departamento de Ingeniería Estructural y Mecánica de la Universidad de Cantabria. Lo mismo que Juan Patricio Reyes Cancino, que recién llegado a Cantabria desde la Universidad Austral de Chile se puso manos a la obra y me ayudó en la corrección de este trabajo.

A Enrique Castillo Ron, Catedrático de Matemática Aplicada de la Universidad de Cantabria, por su disponibilidad. Muchas gracias por encajar mis dudas en su apretada agenda.

A Justo Carretero de INECO, Pablo Díaz Simal del CEDEX, Vicente Puchol de Celis de KINESIA, Alberto Reguero y Francisco Cabrera de ADIF por compartir mesa de trabajo, inquietudes y experiencias. También a Rodrigo Blanco de AUTOPISTAS DE MICHOACÁN.

A Miquel Roura Sués, Carlos Avelino López Pérez, Miguel Ángel Gutiérrez Martínez, Rodrigo Sampedro Gutiérrez y Juan Antonio González García. Por sus aportaciones desde distintos puntos de vista de la Ingeniería Aeronáutica, Eólica e Industrial.

Fue una suerte encontrarme en el camino, y a última hora, a Raúl Husillos del Dpto. Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos de la Universidad de Cantabria; gracias por contarme lo que me contaste y por abrirme una puerta a futuros trabajos de investigación.

Quiero darle las gracias de manera especial y por muchos motivos, a Javier Torres Ruiz; siempre inspirador. Le digo lo mismo que decía Eduardo Chillida de J. S. Bach, *“Moderno como las olas, antiguo como la Mar; siempre y nunca novedoso pero nunca y siempre igual”*.

A mi abuelo Marcelo, por su talento y creatividad innatos; a mi hermano y mis amigos, siempre geniales.

A mis padres, Vicente y Pilar; que, desde pequeño, me inculcaron los valores con los que ahora intento yo educar a mis hijos, Paula y Mario.

Y, finalmente, me gustaría agradecer muy especialmente a mi mujer, Marta, todo lo que ha hecho siempre por mí, su apoyo en todo momento, y por encima de todo, su infinita paciencia, especialmente durante esta etapa difícil en la que he realizado la Tesis.

A Mario, Paula y Marta

ÍNDICE

PRÓLOGOiii

RESUMEN v

ABSTRACT..... vii

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS ix

CAPÍTULO I. INSTRUMENTACIÓN DE ESTRUCTURAS 1

1.1. El contexto del problema 1

1.2. Objetivo de la investigación 4

1.3. Metodología utilizada 5

CAPÍTULO II. VISIÓN INTEGRAL DEL CONTROL DE PUENTES 9

2.1. Introducción 9

2.2. Origen y evolución de la Instrumentación 10

2.3. Descripción de la Instrumentación de grandes puentes 24

2.4. Tipos de sensores 28

2.5. Planificación de la Instrumentación..... 35

2.6. Tratamiento de Datos 36

2.7. Instrumentación de un puente construido 39

2.8. Instrumentación de un puente en construcción 48

2.9. Instrumentación no electrónica 64

2.10. Resumen 72

CAPÍTULO III. ESTADÍSTICA APLICADA AL CONTROL DE PUENTES..... 77

3.1. Introducción 77

3.2. Control Estadístico de Calidad 80

3.3. Diagramas de Control para variables 81

3.4. Regresión Lineal y Modelos de Predicción en Procesos Estocásticos 86

3.5. Predicción del deterioro 89

3.6. Resumen..... 91

| | |
|--|------------|
| CAPÍTULO IV. APLICACIONES PRÁCTICAS: PUENTE “INFIERNILLO 0” Y PUENTE “EL BELTRÁN” | 95 |
| 4.1. Puente “Infiernillo 0” | 95 |
| 4.2. Puente “El Beltrán” | 123 |
| 4.3. Reactivación de un Sistema de Instrumentación. Control de parámetros predominantemente estáticos | 169 |
| 4.4. Conclusiones | 174 |
| 4.5. Resumen | 175 |
| | |
| CAPÍTULO V. METODOLOGÍA APORTADA A LOS SISTEMAS DE GESTIÓN DE PUENTES..... | 179 |
| 5.1. Evolución de los Sistemas de Gestión de Puentes | 179 |
| 5.2. Sistemas de Gestión de Puentes (BMS) | 186 |
| 5.3. Aportación a la Inspección de puentes. Aplicación práctica al caso de una red de puentes en México..... | 192 |
| 5.4. Optimización de recursos en función del estado de los puentes | 209 |
| 5.5. Conclusiones | 210 |
| 5.6. Resumen | 211 |
| | |
| CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN | 215 |
| 6.1. Introducción | 215 |
| 6.2. Conclusiones | 216 |
| 6.3. Nuevas líneas de investigación | 218 |
| | |
| ANEXO I. ESTADÍSTICA A NIVEL DE SENSOR..... | 225 |
| | |
| ANEXO II. ESTADÍSTICA A NIVEL DE MEDICIÓN..... | 241 |
| | |
| ANEXO III. PUENTES INSTRUMENTADOS PARA SU CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO | 249 |
| | |
| ANEXO IV. OTROS TIPOS DE ESTRUCTURAS INSTRUMENTADAS..... | 255 |
| 4.1. Elementos auxiliares durante la construcción | 255 |
| 4.2. Tensión de adherencia en el terreno | 255 |
| 4.3. Vías de ferrocarril..... | 256 |

| | |
|----------------------------------|-----|
| 4.3.1. Vía en placa | 256 |
| 4.3.2. Vía convencional | 257 |
| 4.4. Edificación | 258 |
| 4.5. Centrales nucleares | 258 |
| 4.6. Eólica offshore | 258 |
| 4.7. Ingeniería naval..... | 261 |
| 4.8. Ingeniería aeronáutica..... | 262 |
| 4.9. Otras escalas | 262 |

**ANEXO V. COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL PUENTE EL BELTRÁN
265**

| | |
|--|-----|
| 5.1. Introducción | 265 |
| 5.2. Análisis en el dominio del tiempo | 269 |
| 5.3. Análisis en el dominio de las frecuencias | 278 |
| 5.4. Amortiguamiento | 280 |

**ANEXO VI. CONTROL ESTADÍSTICO APLICADO A LAS ACELERACIONES
EN EL DOMINIO DEL TIEMPO DEL PUENTE INFIERNILLO 0..... 299**

| | |
|-----------------------------|-----|
| 6.1. Aceleración AV21 | 300 |
| 6.2. Aceleración AV22 | 302 |
| 6.3. Aceleración AV41 | 304 |
| 6.4. Aceleración AV42 | 306 |

ANEXO VII. CADENAS DE MARKOV 309

| | |
|---|-----|
| 7.1. Cadenas de Markov | 309 |
| 7.2. Sucesiones de variables discretas. Cadenas de Markov | 309 |
| 7.3. Ejemplo..... | 315 |
| 7.4. Otros usos actuales de las Cadenas de Markov | 317 |

FIGURAS 319

REFERENCIAS..... 331

BIBLIOGRAFÍA 337

“Estamos siendo testigos de un cambio en la relación tradicional entre realidad y representación. Ya no evolucionamos del modelo a la realidad, sino del modelo al modelo, al tiempo que reconocemos que, en realidad, ambos modelos son reales. En consecuencia, podemos trabajar de un modo muy productivo con la realidad experimentada como un conglomerado de modelos. Más que considerar el modelo y la realidad como modalidades polarizadas, ahora funcionan al mismo Nivel. Los modelos han pasado a ser coproductores de la realidad”

Olafur Eliasson

CAPÍTULO I

INSTRUMENTACIÓN DE ESTRUCTURAS

“Lo que se quiere ahora, creo, es unir la ciencia de los materiales a la economía y la estética. Si esto puede hacerse de una forma realmente imaginativa, entonces las oportunidades son enormes y, seguramente, el reto es lo suficientemente grande para satisfacer a los más capaces y los más ambiciosos.”

J. E. Gordon

La Instrumentación de Puentes es una fuente de datos inagotable y la repercusión de su seguimiento puede ser aprovechada tanto a nivel de puente como de red de puentes, tanto a nivel de conservación como del propio proyecto. El análisis de estos datos no está regulado desde el punto de vista normativo y en este Capítulo se trata de transmitir la importancia de consensuar el uso de unas herramientas de análisis homogéneas que redunden tanto en la calidad de los datos medidos como en su interpretación para aprovechar las posibilidades que ofrece la Instrumentación.



1.1. El contexto del problema

En Europa, la mayor parte de los puentes han sido construidos en los últimos 50 años, y un gran porcentaje es más antiguo aún (75% > 50 años y 10% > 100 años en el caso de puentes de ferrocarril) [LG]. La experiencia acumulada en el campo del diseño necesita, por tanto, retroalimentarse con los datos obtenidos del análisis del comportamiento real de la estructura una vez puesta en servicio. Aspectos tan fundamentales como el dimensionamiento de las juntas de dilatación, el funcionamiento de los aparatos de

dilatación de vía en el caso de puentes de ferrocarril para Alta Velocidad, el comportamiento de las pilas frente a esfuerzos horizontales o el funcionamiento de los aparatos de apoyo deslizantes presentan aún ciertas incógnitas no del todo resueltas. Estos puntos pueden quedar satisfechos a la luz de los resultados obtenidos tanto por observación y medición directa en trabajos de inspección como por algunas aportaciones procedentes del control e interpretación de los resultados obtenidos mediante la Instrumentación.

Se estima que los puentes representan el 2% de la longitud de las vías de comunicación y el 30% de su valor económico.

A nivel mundial España es el octavo país en dotación de infraestructuras pero hoy en día el presupuesto dedicado a rehabilitación, conservación y mantenimiento es insignificante.

En general, los esfuerzos de los principales equipos de trabajo van orientados a la estimación de la vida remanente y la posibilidad de aumento de las cargas de tráfico mediante una metodología en la que se incluyen los resultados procedentes de la Instrumentación de la estructura (cuando existe). De esta manera, como los administradores de las redes son conscientes de los cambios en la respuesta dinámica del puente es necesario conocer las frecuencias y modos de vibración principales de la estructura, la masa y el amortiguamiento.

Es evidente que la estimación de carga y vida útil da una idea importante del estado de conservación de la estructura a nivel global pero, en cambio, existen elementos de gran responsabilidad en los puentes cuyo buen funcionamiento es necesario conocer para planificar las labores de sustitución por ser costosas técnica y económicamente. A estos elementos no se les presta la atención que merecen. Esto ocurre precisamente con los aparatos de apoyo. Por todo ello se hace necesario conocer el ratio de deterioro y estimar el momento más oportuno para la intervención y sus consecuencias a nivel de estructura y de red.

Es de esperar que en el futuro la inspección del puente (orientada hacia Structural Health Monitoring, SHM) se centre en la valoración cuantitativa más que en la inspección visual. La variedad de sensores en un puente dará datos en numerosos puntos. Los datos serán analizados y el deterioro será detectado automáticamente por los ordenadores de las

estaciones de trabajo. Cuando los problemas se produzcan los ingenieros deberemos ser capaces de analizar condiciones estructurales y formular estrategias correctoras.

El uso extensivo de sensores será posible con los avances en la miniaturización electrónica, la mejora de las comunicaciones y el abaratamiento de los costes hasta conseguir equipos de medición compactos, permanentes y económicos.

Las medidas a realizar incluirán la detección de cambios en las propiedades químicas y eléctricas de los materiales (Material Health Monitoring, MHM) y los cambios en los agentes ambientales; además, la respuesta a las cargas será verificada periódicamente. Los sistemas de medición incluirán:

- Sensores de medición del potencial de corrosión y corriente eléctrica.
- Células de carga en apoyo de pila que permita medir periódicamente la carga.
- Interferómetro sobre superficies de acero pintadas para detectar el envejecimiento de la pintura.
- Sistemas láser para medición de deflexiones.
- Sensores para captura de datos meteorológicos.

Las nuevas técnicas de inspección ya pueden ser implantadas. Los sensores y el hardware necesario para el envío de datos también. Por lo tanto, parece claro que los esfuerzos deben estar orientados hacia el análisis de los datos, la interpretación y la identificación de las condiciones del puente basadas en los datos.

La Instrumentación de una estructura surge de la necesidad de conocer su comportamiento resistente (estático y dinámico). Este comportamiento va a estar regido por un fenómeno físico que, a su vez, dependerá de parámetros medibles. Con la Instrumentación lo que se persigue es, precisamente, conocer estos parámetros evolucionando equiespaciados en el tiempo mediante series temporales. Finalmente, es necesario conocer el fenómeno físico que rige el comportamiento que se desea cuantificar y elegir el instrumento que permita medir las variables que lo explican.

Una vez recogidos los datos se puede proceder al análisis estadístico que puede orientarse hacia la estadística descriptiva o la inferencia estadística. La estadística descriptiva se basa en la obtención de parámetros estadísticos significativos (máximo, mínimo, media, cuantil, etc.) mientras que la inferencia estadística comprende los

métodos y procedimientos que por medio de la inducción determinan propiedades de una población estadística, a partir de una pequeña parte de la misma, y su evolución en el tiempo mediante Bandas de Predicción.

1.2. Objetivo de la investigación

La Instrumentación de estructuras está en pleno desarrollo. Sin embargo, la interpretación de los datos registrados con el fin de poder aplicar sus conclusiones a la redacción de nuevas normativas o a la mejora de la efectividad de los Sistemas de Gestión de puentes. Es ahí donde incide especialmente este trabajo.

Con este trabajo se pretende facilitar, en primer lugar, un procedimiento basado en el tratamiento de los datos procedente de la Instrumentación.

En segundo lugar, se define una nueva metodología mediante Control Estadístico y Bandas de Predicción para objetivar y tecnificar la inspección que se hace extensible a los elementos fungibles de los puentes (aparatos de apoyo, juntas de dilatación, aparatos de dilatación de vía, etc.) pertenecientes a una red.

Se logra de esta manera que la red de estructuras instrumentadas, cuyo mantenimiento hay que gestionar y en donde resultaría complicado determinar cuál va a ser la evolución de ciertos aspectos, se controlen mediante aproximaciones o previsiones y redunde así en la toma de decisiones a largo o muy largo plazo.

De esta manera se consigue dar un doble uso a los datos procedentes de la Instrumentación particular de cada una de las estructuras que conforman la red:

- Como herramienta para predecir patologías a nivel de estructura. Tecnificación de la inspección.
- Como herramienta para la toma de decisiones a nivel de red. Mejorando la calidad de los datos y dotando a las inspecciones de capacidad predictiva se mejora el rendimiento del Sistema de Gestión de Puentes.

En definitiva, se pretende prolongar el control activo de una estructura [CG], desde su construcción hasta el final de su vida útil; la Instrumentación no sólo alerta de sus posibles daños, sino que también, en el caso de comportamiento satisfactorio, puede ser utilizada como un campo de investigación a escala real, ya que muestra en todo momento la respuesta estructural de un puente ante una determinada sollicitación.

1.3. Metodología utilizada

La observación de la realidad es uno de los pilares en los que se asienta el avance científico. Las observaciones constituyen, por tanto, una base de información que es necesario interpretar para avanzar en el conocimiento de lo que nos rodea.

Un planteamiento científico ante las diferentes manifestaciones de la realidad lleva a preguntarse el porqué de los resultados observados, en el sentido de si existe o no alguna ley o mecanismo que los gobierna y regula, lo que implica considerar las observaciones como resultados posibles de un fenómeno que incluye pautas de comportamiento que es preciso estudiar.

Atendiendo a esta consideración de orden general, cabe distinguir entre dos tipos de fenómenos:

- Fenómenos deterministas: aquellos que siempre que se producen en las mismas condiciones dan lugar a un mismo resultado. Obedecen a las leyes científicas con una dependencia funcional entre las variables que intervienen.
- Fenómenos aleatorios: son aquellos que, aunque se produzcan en condiciones iguales, presentan manifestaciones diferentes que no se pueden predecir y que únicamente son conocidas después de su realización. Introducen, por tanto, el concepto de incertidumbre o desconocimiento en cuanto al resultado.

Aunque a priori los datos procedentes de la Instrumentación de las estructuras deberían responder a fenómenos deterministas se entiende que existe siempre cierta incertidumbre en la medida la cual condiciona los estudios derivados de esos datos y es necesario considerar (o despreciarla, si procede). Se puede decir, por tanto, que en general se trata de estudiar fenómenos aleatorios estadísticamente tratados para reducir al máximo su incertidumbre.

La investigación integra, por un lado, ejemplos de casos reales de Instrumentación de Puentes en los que ha participado el autor junto con el resto de compañeros del Departamento de Estructuras de APIA XXI, S.A. Cada uno de esos proyectos, por la singularidad de los mismos y la constante evolución de la tecnología de sensores y de las telecomunicaciones, ha aportado diversas conclusiones que se recogen a lo largo de este trabajo.

Por otro lado, se incluye una propuesta de procedimiento basado en el Control Estadístico y Bandas de Predicción orientado al control, mantenimiento y la inspección de puentes y que intentan optimizar la base del Sistema de Gestión de Puentes que es el dato. De este modo se convierten los datos en información.

Esta idea se representa claramente en lo que se viene llamando Pirámide del Conocimiento.

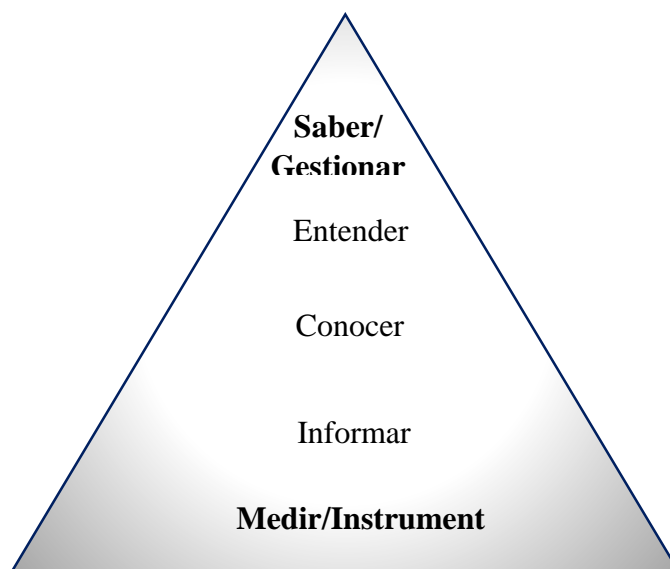


Figura 1. Superposición de la Pirámide del conocimiento de Ackoff.

Entiéndase que la repercusión del análisis de los datos que se defiende en este trabajo afecta directamente tanto al “Medir- Instrumentar” como al “Saber-Gestionar” siguiendo la terminología de la Pirámide del Conocimiento.

Para la revisión bibliográfica y el estado del arte se ha tenido acceso a numerosos artículos a partir de los que se ha comenzado este trabajo se han encontrado en la Web of knowledge a partir de las siguientes palabras clave.

- Structural health monitoring.
- Bridge or viaduct.
- Big Data.
- Data Analysis.
- Bridge Management System.

Estas palabras clave también han servido para definir un sistema de alertas gracias al buscador de Google (Google Alerts) que advierte de la publicación de artículos en internet incluyendo los términos indicados con periodicidad semanal.

Además, se ha realizado una revisión de todas las comunicaciones de los Congresos, tanto a Nivel nacional como internacional, a los que algunos compañeros del autor en APIA XXI han asistido como ponentes:

- II Congreso de ACHE celebrado en Madrid en noviembre de 2002.
- III Congreso de ACHE, Las estructuras del siglo XXI: Sostenibilidad, innovación y retos del futuro, celebrado en Zaragoza en noviembre de 2005.
- IV Congreso de ACHE celebrado en Valencia en noviembre de 2008.
- 3rd fib International Conference, Think Globally, Build Locally, celebrado en Washington en junio de 2010.
- 34th IABSE Symposium¹⁶ on Large Structures and Infrastructures for environmentally constrained and urbanized areas celebrado en Venecia en septiembre de 2010.
- V Congreso de ACHE celebrado en Barcelona en octubre de 2011.

También de aquellos congresos en los que el autor de este trabajo ha sido ponente:

- VI Congreso de ACHE celebrado en Madrid en junio de 2014.
- 37 th IABSE Symposium Engineering for Progress, Nature and People celebrado en Madrid en septiembre de 2014.

También se han revisado los artículos de las revistas publicadas por los siguientes organismos en sus páginas web, tanto a Nivel nacional como internacional.

- Tesis Doctorales.
- ACHE: Hormigón y acero.
- IABSE: SEI -Structural Engineering International
- fib: Structural Concrete.

Se han revisado también las siguientes páginas web que contienen bases de datos de publicaciones:

- Tesis doctorales:
- ACHE: <http://e-ache.com>
- TESEO: <https://www.educacion.gob.es/teseo>
- Artículos:
- SCISEARCH: <http://library.dialog.com/bluesheets/html/bl0034.html>
- ASCE: <http://ascelibrary.org/>
- ETH Bibliothek: <http://www.library.ethz.ch/en/Search-help>

Por último, en relación directa con la Instrumentación de estructuras se han revisado las páginas web de los siguientes organismos, así como sus revistas.

- ISHMII: <http://www.ishmii.org>
- SHM: <http://shm.sagepub.com> Journal of Structural Health Monitoring.

CAPÍTULO II

VISIÓN INTEGRAL DEL CONTROL DE PUENTES

“Una estructura sólo es transparente en la dirección de las preguntas que tú le haces al disponer los aparatos de medida en un punto u otro, en una dirección u otra.”

Javier Manterola

En este Capítulo se presenta una evolución histórica de la tecnología de la Instrumentación desde los años 70, y del Estado del Arte en la actualidad. Se incluyen también ejemplos de Sistemas de Instrumentación reales (tanto en puentes en construcción como en servicio) en los que ha participado el autor de este trabajo.

2.1. Introducción

La Instrumentación es una herramienta básica hoy en día durante la construcción y la vida útil de una estructura, además de servir de base al proyecto de otras. Tuvo su origen en los años 70 y ha sufrido importantes transformaciones tanto a Nivel tecnológico como a Nivel de aplicación. Por entonces, el análisis experimental de las estructuras se basaba en la extensometría y la fotoelasticidad, y su principal preocupación se centraba en el estudio y análisis tensional.

Actualmente, el número de obras instrumentadas es reducido. Hasta el momento esta actividad no es obligatoria en ningún marco reglamentario y sus aplicaciones son poco conocidas. Sin embargo, la aparición de nuevas exigencias técnicas y económicas

que conllevan reducir riesgos en la construcción, garantizar la seguridad de los usuarios y minimizar costos en la gestión, el mantenimiento y la explotación, hacen de la Instrumentación de estructuras una labor indispensable.

2.2. Origen y evolución de la Instrumentación

Los comienzos de la Instrumentación de estructuras, se remontan a finales del siglo XIX con George Shattuck Morison [MW]; descendiente de ingenieros, comenzó su carrera profesional en el año 1867 y finalizó en el año 1903. En estos 36 años de práctica de la ingeniería, jugó un papel muy importante en la transición de un oficio a una disciplina, basada en principios científicos y en ensayos. Entre sus mayores innovaciones destacan:

- Introducción de las prácticas de ensayo e inspección de materiales con el fin de asegurar el cumplimiento de sus especificaciones.
- Desarrollo de unas instrucciones para el diseño y la construcción de puentes.
- Realización de informes de proyecto.

Un ejemplo de ello es el Plattsmouth Bridge en cuyo informe de proyecto se recogen los ensayos a escala a tracción y a compresión de elementos prototipo del puente.

Sus obras más significativas son:

- Varios Puentes sobre el río Missouri.
- El gran Puente de ferrocarril en Memphis.
- Viaducto Iowa.

Además, Morison, fue Presidente de la Asociación Americana de Ingenieros Civiles y fue un miembro muy influyente en la Comisión del Canal de Panamá.

En España, el padre de la Instrumentación fue Eduardo Torroja [TM]. Su investigación en nuevas formas estructurales, como son las láminas, le llevó a realizar ensayos en modelo reducido y en algunos casos ensayos en obras reales [TPBSCL].



*Figura 2. Modelos reducidos pedagógicos (1950-1960) de Eduardo Torroja.
Laboratorio Central de Estructuras y Materiales. CEDEX.*

La Instrumentación, tal y como se conoce hoy, tiene su origen en el enorme auge de la construcción de infraestructuras de los años 80 y 90, y por tanto, en el gran número de estructuras construidas que tenían que ser conservadas con un Nivel de seguridad adecuado durante su vida útil. En los comienzos se utilizaban bandas extensométricas, ya empleadas en laboratorio, y sensores de fibra óptica.

Las ventajas de los sensores de fibra óptica frente a las bandas extensométricas convencionales son [CDRGA]:

- Medidas absolutas con salida codificada espectralmente sin EMI.
- Estabilidad a largo plazo.
- Capacidad de multiplexión: instalación de varios sensores sobre la misma fibra óptica.
- Tamaño pequeño.
- Posibilidad de embeberlos en el hormigón sin degradarse.

En los inicios, la Instrumentación se realizaba sobre estructuras existentes en las que se detectaba un mal funcionamiento de las mismas [GIS]. En este sentido, se procedía de la misma forma que un médico actúa con un paciente, es decir, de acuerdo con el siguiente esquema:

- Detección de un mal comportamiento de la estructura.
- Registro de la frecuencia en la que el problema sucede.
- Localización física del daño.
- Evaluación y cuantificación del deterioro.
- Reparación.

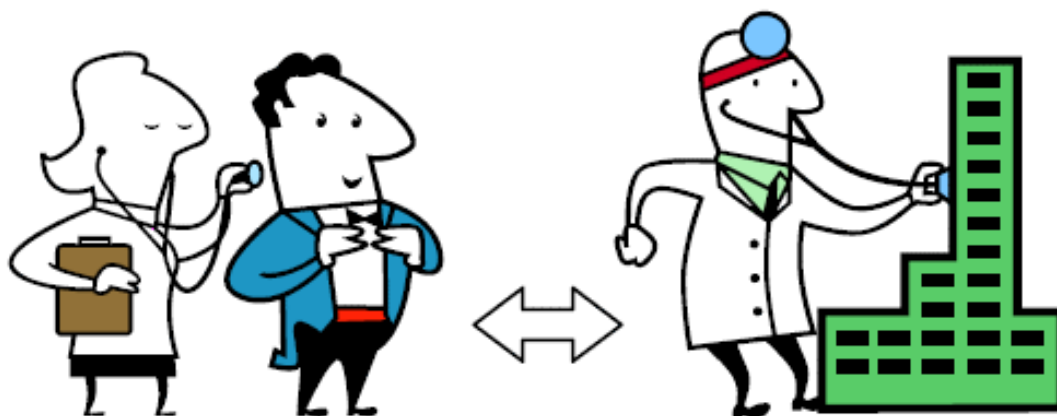


Figura 3. Analogía entre control médico y control estructural.

La Instrumentación comprende los tres primeros pasos, posteriormente es necesaria la interpretación de las medidas realizadas -cuarto paso- y, en su caso, la reparación –quinto paso.

El primer país que instrumentó puentes con sensores de fibra óptica (FOS) fue Alemania [M] a finales de los años 80. Dichos sensores eran primitivos en comparación con los que se usan hoy en día. Además, al principio, la Instrumentación no estaba monitorizada por ordenador, sino que el ingeniero tenía que ir periódicamente al puente a recoger los datos. Posteriormente, se comenzó a diseñar el Sistema de Instrumentación sin cables que, como comentaré más adelante, tiene sus ventajas e inconvenientes.

En Canadá, en la década de los 90 se Instrumentaron dos grandes puentes que se describen a continuación:

- Beddington Trail Bridge, Calgary 1992: se emplearon sensores de fibra óptica tipo Bragg grating durante la construcción y la puesta en servicio de la estructura. Previamente a la ejecución del puente, se realizó un ensayo en modelo reducido en laboratorio. En 1999 se realizó un ensayo estático y dinámico del puente en el que se comprobó que, después de siete años, los sensores estaban en correcto funcionamiento.
- Crowchild Trail Bridge, Calgary 1997: el aumento de las cargas de tráfico, hizo necesario comprobar el comportamiento estructural de los puentes existentes que fueron calculados para cargas inferiores. Algunos de ellos tuvieron que ser reforzados, como es este caso, basándose en un ensayo de laboratorio de la Universidad de Manitoba. Con el fin de comprobar el comportamiento estructural de la estructura reforzada, el puente fue instrumentado.

En Europa, hasta el año 2000 la Instrumentación de las estructuras, excepto de las presas, se llevaba a cabo cuando se detectaba un daño puntual y se implementaba durante un corto espacio de tiempo, el necesario para detectar el problema estructural y repararlo.

La preocupación por la vida real de las estructuras ha trascendido a los gobiernos europeos, americanos y japoneses en los siguientes proyectos de investigación [VP]:

- En Europa:
 - SIMCES K.U. 1997-1999: Identificación de sistemas para la Instrumentación de estructuras de ingeniería civil. Orientado al estudio de modelos y ensayos a escala real de puentes.
 - ACE Bouyges 1997-2000: Control activo en ingeniería civil. Orientado fundamentalmente a puentes atirantados.
 - MILLENNIUM 1998-2001: Instrumentación de grandes estructuras de ingeniería civil. Instrumentación de puentes mediante la medida de la deformación con sensores de fibra óptica.
 - SMART STRUCTURES 1998-2002: Sistemas de Instrumentación para el estudio de la durabilidad de estructuras de hormigón.

Desarrollo de sensores de bajo coste para la medida de parámetros de durabilidad.

- Por su parte, Estados Unidos también apostó por la investigación en este campo en la década de los 90 y la Sociedad Americana de Ingenieros civiles, ASCE, estableció un grupo de trabajo dedicado a la Instrumentación de Estructuras que se dedica al estudio de diferentes métodos de Instrumentación de estructuras.
- En Japón la situación era similar a la de Estados Unidos y desarrollaron el Programa Smart material/structural system. Este programa de colaboración Universidad-Industria, de 5 años de duración, comenzó en 1998. Se trata de un proyecto dividido en cuatro grupos de investigación, uno de ellos de Instrumentación, dirigido por el Profesor Takeda [T] de la Universidad de Tokio.

Tiempo después, entre el 1 de enero de 2000 y el 31 de diciembre de 2002, Casas y Gettu [CG] realizaron un trabajo de investigación dentro del Programa Nacional de Tecnologías Avanzadas de la Producción financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología denominado Estructuras Inteligentes. El objetivo de este estudio fue triple:

- Detección de daños en una estructura mediante un sistema de sensores instalados al efecto.
- Supervisión experta de un puente.
- Control activo de una estructura.

En dicho trabajo se comprobó la fiabilidad de la utilización de sensores de fibra óptica del tipo Bragg Grating, pudiendo embeberse éstos en el interior del hormigón o adherirse a la superficie de una estructura. En aquel momento se estaba en plena investigación de diferentes tipos de sensores en todo el mundo. Así por ejemplo, en Japón se desarrolló un hormigón con fibras de vidrio y de carbono capaz de medir los cambios de tensión en el hormigón a partir de las variaciones de resistencia eléctrica en las mismas. Mientras, en Estados Unidos, se desarrollaron sensores inteligentes capaces de verificar el adecuado comportamiento de materiales compuestos, mediante el empleo de partículas magnetorestrictivas de micras de tamaño. En cualquier caso, a día de hoy, se siguen utilizando el hormigón y el acero como materiales básicos de nuestras estructuras, los materiales compuestos aún no se han implantado.

En el año 2001 se publicó en Japón un artículo que resumía el Sistema de Instrumentación de Puentes [SMKOF].

Por otro lado, en el año 2007 había seis puentes de grandes luces en Corea cuya Instrumentación llevaba en marcha 10 años [KKY].

En el año 2002 Dewolf, Lauzon y Culmo [DLC] publicaron un artículo en el que describieron la Instrumentación realizada en varios puentes de Estados Unidos, llegando a la conclusión de que ésta sustituía a la inspección visual que se hacía hasta entonces.

Fundamentalmente realizaron dos tipos de Instrumentación:

- Estudio de deformaciones: encaminado fundamentalmente al análisis de la fisuración y de sus problemas de fatiga asociados.
- Estudio de vibraciones: dirigido al análisis de la rigidez y de la funcionalidad de las estructuras.

En aquellos primeros años de este nuevo siglo surge una nueva aplicación de los sensores de fibra óptica y por tanto, de la Instrumentación: la comprobación del comportamiento de los materiales compuestos [CDRGA]. Existen varias ventajas de los materiales compuestos frente a los tradicionales:

- Facilidad de instalación y manejo.
- Bajo peso.
- Altas resistencias a tracción combinadas con alta flexibilidad.
- Gran protección frente a la corrosión.

En este sentido son ampliamente empleados en la reparación de estructuras adheridos al hormigón de la estructura a reparar. También se utilizan como material nuevo prefabricado: matriz + fibras.

En el año 2003 se funda la International Society for Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure [TPBSCL].

En ese mismo año (2003), Chang, Flatau y Liu [CFL] publicaron un artículo en el que hicieron un resumen de las técnicas de Instrumentación de estructuras. Tal y como se ha comentado anteriormente, la Instrumentación hasta entonces iba dirigida a la detección

de anomalías en las estructuras y se disponía posteriormente a su puesta en servicio. La mayoría de los métodos consistían en:

- Búsqueda de variaciones en las frecuencias propias o en la forma de los modos de vibración.
- Determinación de la longitud y de la situación de las fisuras a partir del cambio de la frecuencia natural de la estructura.
- Análisis de la modificación de la matriz de rigidez.

En aquellos tiempos comenzaron a aparecer nuevos sensores:

- MEMS, sistemas micro-electromagnéticos: acelerómetros fundamentalmente.
- NMR, resonancia magnética nuclear: cápsulas que detectan la presencia de iones de cloro.
- LIDAR, tecnología de infrarrojos: capaz de detectar la posición en 3D de determinados objetos.

En cualquier caso, estos sensores dirigen la Instrumentación hacia un problema estructural específico, es decir, en general no son capaces de determinar el estado global de la estructura. Otras técnicas en desarrollo por entonces se indican a continuación:

- Rayos X y Gamma: capaces de obtener imágenes del interior de la estructura siempre que sean accesibles tanto por el exterior como por el interior.
- Tecnología Radar.
- Sensores de fibra óptica: en su día tenían el triple inconveniente del cableado, de su necesaria instalación durante la construcción y del coste del manejo del gran número de datos.
- Sensores sin cables: requieren baterías que tienen una duración determinada, salvo que sean exteriores y puedan ser alimentados mediante energía solar. Por tanto, sólo son aptos para estudios locales, no siendo válidos para la Instrumentación durante la construcción y la vida útil de una estructura.

En el año (2003) Keller y Ray [KR] desarrollaron y comprobaron un método experimental para la predicción del tiempo de vida de las estructuras mecánicas, entre las que se incluyen los puentes. En concreto detectaron la resistencia residual a fatiga de una

estructura. El estudio parte del modelo analítico de fatiga realizado por Ray y Patankar [RP] en 2001. Previamente al diseño del ensayo a escala real, realizaron un ensayo en laboratorio con dos tipos de sensores:

- Microscopio óptico de larga distancia.
- Detector de flujo ultrasónico.

Posteriormente realizaron el ensayo a escala real, cuyo objetivo fundamental fue conocer el tiempo residual de vida de una estructura en cualquier momento de la vida de ésta, y no sólo cuando ésta ya está prácticamente agotada.

En julio de 2003, Aktan, Catbas, Grimmelsman y Pervizpour publicaron una guía para la Instrumentación de grandes estructuras [ACGP]. Esta guía surgió por el elevado coste, desde el punto de vista económico y de tiempo, de las inspecciones periódicas necesarias en los puentes.

En el año 2005, Farhey [F] realizó un artículo relacionado con el diagnóstico estructural de los puentes. Este estudio tiene su origen en el mal estado de las estructuras estadounidenses al cabo de la primera y segunda décadas de su puesta en servicio.

En primer lugar, describe el proceso preliminar de identificación y evaluación de una estructura.

En segundo lugar, explica la forma en la que los puentes se mantienen en Estados Unidos, puesto que la conservación se dirige desde cada estado y prácticamente se trata de un inventario. En este sentido se han consultado algunos manuales, como por ejemplo:

- “Fundamentals of Bridge Maintenance and Inspection” New York Department of Transportation. Cornell Local Roads Program, 1997.
- “Element Level Inspection Manual”, State of California. Department of Transportation and Engineering Center. Division of Structure Maintenance and Investigations, 2000.

Por último, describe los distintos ensayos no-destructivos que se realizan:

- Ensayos puntuales.
- Cargas estáticas.
- Cargas móviles.

- Instrumentación continua.
- Ensayos preliminares: consisten en la realización de una prueba inicial en la estructura antes de su apertura al tráfico. Dicho ensayo se repetirá a lo largo de los años y se contrastarán sus resultados a lo largo del tiempo con el fin de poder evaluar los posibles daños estructurales. Su aplicación más directa es la obtención de los modos y las frecuencias de vibración.

Por otro lado, Farhey también hace un análisis de la distinta disposición de sensores en una estructura:

- Adheridos: tienen la ventaja de poder colocarse en cualquier momento y de poder ser sustituidos. Sin embargo, presentan el inconveniente de no estar situados generalmente en el punto adecuado.



Figura 4. Acelerómetro en losa inferior de tablero. Viaducto Arroyo Las Piedras (LAV Córdoba-Málaga).

- Embebidos: tienen como ventajas los inconvenientes de los adheridos y viceversa.

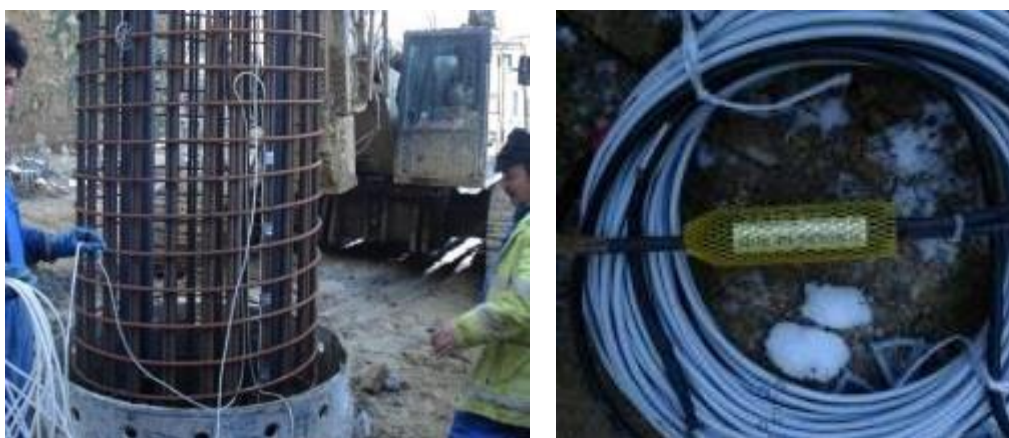


Figura 5. Extensometría en pilote. Viaducto de Pujayo (APIA XXI, S.A.).

Por último, señala el frecuente mal funcionamiento y la posible necesidad de recalibración de los sensores con el tiempo.

La Instrumentación no tiene por qué ser compleja; tal es el caso del Puente Largo de Aranjuez [OF] en el que tras una serie de Nivelaciones topográficas cada 4-6 meses se demostró que su asiento había llegado a estabilizarse. En el punto 2.9 de esta Tesis se desarrolla un punto específico a la Instrumentación no electrónica.



Figura 6. Medida del movimiento relativo tablero-estribo. (APIA XXI, S.A.)

En la figura anterior se incluyen dos tipos de Instrumentación: electrónica mediante transductor de hilo (Viaducto sobre arroyo de las Piedras LAV Córdoba-Málaga) y manual (Viaducto de Almocaizar LAV los Gallardos-Sorbas) basado en medidas directas en visitas de campo.



Figura 7. Medida del movimiento relativo tablero-pila. (APIA XXI, S.A.)

En la Figura 7 se presentan dos sistemas de Instrumentación. El primero mediante un sistema de medida manual (Viaducto de Anchuelo II LAV Madrid-Barcelona) y el segundo mediante transductor de hilo (Viaducto sobre arroyo de las Piedras LAV Córdoba-Málaga).

Una de las grandes ventajas de la Instrumentación es su bajo coste -sensores, cableado y equipo de adquisición de datos- en torno al 0.1-0.3% del coste de construcción. Por lo tanto, los datos generados por la Instrumentación colocada desde la fase de construcción hasta una vez puesto en fase de explotación ofrecen una potencial información desconocida hasta la fecha que rentabiliza por sí sola el gasto inicial.

Inaudi [I] realizó en el año 2009 una revisión de 40 puentes instrumentados en los últimos 15 años en 13 países distintos. Inaudi afirmaba que la vida útil de cada estructura estaba lejos de ser monótona y predecible. Mucho más que nuestra propia existencia, su evolución dependía de muchos acontecimientos inciertos, tanto internos como externos. En este sentido, mediante la instalación de una serie de sensores que medían los parámetros estructurales más relevantes, así como las características medioambientales más importantes, se podía obtener un esquema del estado y de la evolución de la estructura. De esta forma, la Instrumentación de estructuras es una nueva herramienta que complementa los métodos tradicionales de inspección y modelización.

El empleo de la Instrumentación de puentes para la mejor comprensión de su comportamiento estructural comienza, definitivamente, a principios del siglo XXI; si bien, no deja de lado la Instrumentación dedicada a la conservación de estructuras, ya que es un indicador de la misma.

El mal estado de una estructura puede producirse por diversos factores:

- Inspección insatisfactoria o medidas desfavorables en su Instrumentación.
- Corrosión del acero en el interior del hormigón, lo que conlleva a la producción de fisuras y, por tanto, a una pérdida de su rigidez y de su funcionalidad.
- Aumento de las cargas actuantes, bien sea estáticas -aumento del peso del tráfico- o dinámicas -aumento de la velocidad del mismo-.
- La ausencia de reparaciones o refuerzos puntuales con el fin de garantizar la seguridad y la funcionalidad de la estructura, puede provocar su deterioro global.

Dos ejemplos muy conocidos del colapso repentino de una estructura, con el elevado coste que supusieron -incluso la pérdida de vidas humanas- son el Viaducto de la línea de ferrocarril Belfast-Dublín el 21 de agosto de 2009, y el Puente I-35 en Minneapolis en el año 2007 [LRQC].

En definitiva, la Instrumentación de estructuras existentes permite:

- Detectar posibles daños en la misma al cabo del tiempo.
- Estimar los efectos que las cargas exteriores producen en las mismas.
- Conocer su vida útil.
- Proyectar estructuras más esbeltas, más fiables y más eficientes.

Todo ello sin comprometer su seguridad -ensayo no destructivo-. Es decir, una estructura moderna debe ser capaz de transmitir con fiabilidad los cambios en lo que a su seguridad y su funcionalidad se refiere. El sistema implantado en la misma debe ser capaz de detectar el daño, caracterizarlo -reconocerlo, localizarlo y cuantificarlo-, e informar del mismo. Esto es lo que se denomina Structural Health Monitoring system -SHM-.

En este sentido, diversos países y organismos están empezando a publicar guías, recomendaciones o normativas para la conservación de puentes que incluyen la Instrumentación de Puentes como una herramienta necesaria. Algunas de ellas son:

- FIB Model Code 2010. Capítulo 9: Conservación de Estructuras de Hormigón.[MUB]
- Nuevo Código suizo para la Conservación de Estructuras de Hormigón. [Z]

En Europa, la Instrumentación de estructuras tiene una larga historia si bien, en sus inicios, la escasez de herramientas provocó que no tuviera mucho éxito. Desde hace 15 años, la Instrumentación de estructuras es una técnica fiable y muy utilizada.

En el año 1990 se editó el primer número de la revista más antigua dedicada íntegramente a la Instrumentación de estructuras: Journal of Intelligent Material Systems & Structures [TPBSCL].

En el año 1991, Roberts, Arrellaga y Breen [RAB] comenzaron a estudiar la Instrumentación global de una estructura, recopilando la información en la literatura

mundial existente hasta entonces, y estableciendo el tipo de medidas que se querían realizar y, para cada una de ellas, los sensores más idóneos.

En julio del año 2000 se publicó una nota técnica internacional de Instrumentación de Puentes [IB]. En ella se hacía especial hincapié en la Instrumentación de las cimentaciones y de las pilas; aparecen por primera vez en la bibliografía los clinómetros, capaces de medir en todo momento la inclinación de las pilas. El objetivo de la Instrumentación era entonces cuádruple:

- Comprobar las hipótesis de diseño y de cálculo de una estructura.
- Controlar el proceso constructivo.
- Mejorar la Instrumentación y la comprobación de estructuras.
- Comprobar periódicamente el estado estructural del puente.

Los parámetros físicos medidos generalmente eran:

- Deformación.
- Tensión.
- Carga.
- Flecha vertical.
- Inclinación o giro.
- Temperatura.

En ese mismo año (2001), el departamento de estructuras de Apia XXI -al que el autor de este trabajo pertenece- realizó un proyecto de colaboración con el Grupo de Ingeniería Fotónica de la Universidad de Cantabria, denominado I+D+I de un Sistema Sensor de Fibra Óptica para la Medida y Telemonitorizado Cuasidistribuido de Deformación y Temperatura en Estructuras de Ingeniería Civil (SISFOCDETIC) cofinanciado con fondos FEDER, bajo la dirección de López-Higuera, que consistió en la Instrumentación parcial del Viaducto sobre el arroyo de Las Navas y de un paso superior tipo pórtico. Dicho proyecto fue reconocido por la Comunidad Científica y Técnica, con el premio Salvá y Campillo, al Proyecto de Investigación más original del año 2001.

El Viaducto de Las Navas es una estructura continua de hormigón pretensado construido mediante autocimbra, cuya longitud total, 380 m, está dividida en ocho vanos,

siendo sus luces de 50 m y 38.5 m, en los vanos centrales y laterales, respectivamente [PROCN]. Su Instrumentación consistió en la instalación de 42 sensores FBG de 60 cm de longitud, capaces de medir tanto la temperatura como la deformación del acero, en la sección de la pila 7 y en dos secciones intermedias del último vano. Dichos sensores se colocaron adheridos a la armadura vertical -cercos- transversal y longitudinal, es decir, embebidos en el hormigón. La correlación de las medidas realizadas con las estimadas en el cálculo se comprobó durante la prueba de carga [LRQC].

El objetivo de la Instrumentación ha sido variable con el paso del tiempo. Si bien en los comienzos (1995-1998) estaba encaminada fundamentalmente a fases concretas de su construcción o a proyectos piloto, desde el año 2003 hasta hoy, está también dirigida a la comprobación de las hipótesis de cálculo.

En el año 2005, había numerosos puentes monitorizados en todo el mundo, se había producido ya un gran desarrollo de la Instrumentación. Los objetivos potenciales de la Instrumentación eran [KN]:

- Comprobar las hipótesis de cálculo con el fin de mejorar las recomendaciones y las normativas existentes.
- Detectar anomalías y posibles deficiencias en las estructuras a edades tempranas, con objeto de poder repararlas antes de que los daños fuesen irreversibles, o que afectasen sustancialmente a la seguridad de las mismas.
- Aportar información en tiempo real después de catástrofes naturales (terremotos, huracanes...).
- Ayudar a la planificación de la inspección, el mantenimiento y la rehabilitación de puentes.
- Obtener una gran cantidad de datos para la investigación en Ingeniería de Puentes.

En aquel momento conseguir todos estos objetivos era todavía un reto, a pesar de que existían más de 40 puentes de grandes luces (>100 m) en el mundo. Desde entonces y hasta hoy, el diseño de la Instrumentación de una estructura de gran luz es necesario en el proyecto; además, ésta se instala generalmente durante la construcción de la misma, puesto que los sensores se disponen embebidos en ella; ésta es precisamente la gran ventaja de los sensores de fibra óptica. Una de sus grandes aplicaciones es la posibilidad

de introducirse en el interior de los tirantes de los puentes, sustituyendo alguno de sus cables por tubos de acero inoxidable en cuyo interior se alojan los sensores.

En definitiva, las dos aplicaciones fundamentales de la Instrumentación de estructuras hasta el momento son [OF]:

- Control de estructuras durante su construcción y puesta en servicio.
- Diagnóstico de patologías de estructuras existentes.

2.3. Descripción de la Instrumentación de grandes puentes

2.3.1 Introducción

Para los grandes puentes, el Sistema de Gestión en uso en el país se complementa con un Sistema de Instrumentación. Se busca, de esta manera, mitigar los riesgos y cumplir con los objetivos de durabilidad.

Los tres objetivos de un Sistema de Instrumentación son:

- Asegurar que la estructura se comporta como se esperaba, durante la fase de construcción, servicio y durante eventos extremos
- Controlar las propiedades de los materiales y su durabilidad
- Detectar riesgos que pueden afectar a la estructura

Los resultados de la vigilancia permanente del puente se almacenan y se interpretan. Lo habitual es proceder según dos Niveles de interpretación:

- Interpretación automática y en tiempo real, de los principales resultados (desplazamientos, frecuencias, etc.) y su correlación con los parámetros físicos de velocidad de viento y temperatura. Se generan informes automáticos y periódicos.
- Interpretación global de los datos registrados, periódicamente o después de un evento extremo (viento extremas, terremotos).

El principal objetivo de la vigilancia es tener un conocimiento preciso del estado del puente. De esta manera se puede actuar de manera preventiva antes de que ocurran daños costosos. El Sistema de Instrumentación comprobará continuamente, o según intervalos dados, el comportamiento de la estructura y los materiales constitutivos y componentes de la estructura.

Como se ha explicado, el Sistema de Instrumentación está diseñado para estudiar los peligros y, por lo tanto, el mejor sistema no es el que tiene el mayor número de sensores sino el que más se ajusta al riesgo previsto, y que mide donde es realmente necesario.

Se puede describir dos tipos de sistemas de Instrumentación:

- Seguimiento del comportamiento estructural (SHM, Structural Health Monitoring): vigilando el comportamiento estático y dinámico de la estructura.
- Seguimiento del estado y durabilidad de los materiales o elementos (MHM, Material Health Monitoring).

Independientemente del tipo de Sistema de Instrumentación a llevar a cabo, los parámetros físicos que influyen en el comportamiento de la estructura tienen que ser monitorizados. Estos son:

- Temperatura (temperatura exterior, temperatura de tirantes, temperatura sensores dentro del hormigón en lugares específicos) a fin de determinar los gradientes de temperatura en diferentes secciones; estos datos son fundamentales para comprobar la solidez de la deformación y la geometría medida de la estructura.
- Humedad exterior y el interior de la viga cajón.
- La velocidad y dirección del viento (anemómetros en la parte superior de cada torre).

Estos parámetros son de gran importancia y su variabilidad condiciona en gran medida la deformación de la estructura por lo que su definición y conocimiento ayuda a conocer los movimientos y deformaciones reales de la estructura. Representan lo que en Estadística de Control se denominan variables especiales y se analizarán en el capítulo correspondiente.

2.3.2 Seguimiento del comportamiento estructural (Structural Health Monitoring, SHM)

La vigilancia del comportamiento estructural (SHM) incluye muchas técnicas diferentes, desde el control geométrico a la vigilancia de respuesta dinámica.

El seguimiento de la geometría de la estructura se puede realizar periódicamente con dispositivos tradicionales (prismas ópticos, estación total) o de forma continua con GPS.

El seguimiento del comportamiento dinámico de la estructura es útil para grandes estructuras flexibles, sensibles al viento o situadas en zonas sísmicas. Un exhaustivo control dinámico es también una poderosa herramienta para detectar la modificación de la rigidez de la estructura en elementos o zonas potencialmente deterioradas de la estructura.

2.3.3 Seguimiento del comportamiento de los materiales (Material Health Monitoring, MHM)

El seguimiento del estado de los materiales (MHM) incluye todas las medidas adoptadas para controlar la condición de los materiales o componentes. Su objetivo es facilitar información para decidir acciones preventivas de mantenimiento o reparación. El seguimiento específico del comportamiento de los materiales puede incluir los siguientes aspectos:

- Instrumentación de deformaciones locales de secciones altamente solicitadas: los registros de las tensiones en las piezas de acero servirán también para evaluar el deterioro por fatiga.
- Comprobación de la durabilidad hormigón: se pueden realizar testigos, con el fin de medir parámetros de durabilidad tales como la carbonatación y el ataque por cloruros medidos en el ambiente real de la estructura.
- Comprobación de la durabilidad del acero: igualmente se pueden realizar testigos, con el fin de medir parámetros de durabilidad, como la corrosión.
- Comportamiento de los tirantes: es habitual equipar algunos tirantes con acelerómetros para comprobar su tensión (calculada a partir de sus frecuencias) y la amortiguación. Algunos cables a su vez pueden estar equipados con sensores acústicos y permanentemente monitoreados para detectar y localizar cualquier rotura de hilo.

En el año 2010 [DKY] la Asociación Mundial de la Carretera TC D3 difundió a través de los miembros, propietarios y gerentes de grandes puentes un cuestionario. En él se describía la organización de la gestión de 10 grandes puentes, situados en varios países y que representaban diferentes tipos estructurales: puente atirantado, puente colgante, gran

viga de acero de diferentes formas, gran viga pretensada caja de hormigón, acero o vigas de hormigón.

Con el fin de actuar de forma preventiva, planificar intervenciones futuras y alcanzar los requisitos de servicio es necesario tener un conocimiento del estado del puente. Es por eso que se hace necesaria la implantación de un Sistema de Instrumentación, con el fin de chequear de forma continua o periódicamente según se trate de analizar la evolución de los materiales constitutivos, el comportamiento de un elemento específico o el general de la estructura.

A continuación ofrece una visión general de los sistemas específicos de Instrumentación utilizados en 4 puentes [DKY]:

| Puente | SHM | MHM |
|------------------------------------|--|---|
| Great Belt East Bridge | 450 sensores 450 dispositivos para evaluar materiales y comportamiento estructural y control geométrico. Desplazamientos de la superestructura (GPS) El control operativo: <ul style="list-style-type: none"> • Estaciones meteorológicas; • Deshielo en carretera; • El flujo de tráfico; • Control de tráfico de buques • Los sistemas de emergencia y señalización de tráfico variable. | Sondas de acero en el recubrimiento de hormigón (sistema de control de la corrosión). Fatiga en losa ortótropa (calibrador de tensión). Bloques de hormigón parcialmente sumergidos cerca del puente para seguimiento. Junta de dilatación. Posición de los apoyos de puentes (longitudinal). |
| Millau Viaduct | El puente está equipado con un sistema de instrumentación que ofrece seguimiento continuo de parámetros que representan su comportamiento en servicio, tal y como se ha descrito ya. Incluye: <ul style="list-style-type: none"> • Control geométrico (GPS) • Instrumentación Dinámica | El seguimiento del comportamiento de un nº de cables. Comprobación de la durabilidad de la estructura de hormigón. Bandas extensométricas en la viga cajón de acero. Aberturas de juntas de expansión. |
| Harilaos-Trikoupis (Rion-Antirion) | El sistema de instrumentación contiene aproximadamente 100 sensores (300 canales) y es similar al sistema del viaducto de Millau. Posee un sistema de alarma que se activa cuando las mediciones dinámicas alcanzan cierto umbral. | Bandas extensométricas en cables seleccionados. Testigo de hormigón en la zona de mareas para comprobar envejecimiento de hormigón. |
| Akashi-Kaikyo | Instrumentación dinámica + GP S para seguimiento del comportamiento de la estructura a nivel estacional, diario, y cada hora. Los resultados son utilizados para la confirmación de la seguridad y del diseño. | Algunos aspectos específicos: <ul style="list-style-type: none"> • El control de la inyección de aire seco sistema para los cables principales y las sillas. • Método electromagnético para identificar la corrosión interna en cables de suspensión. |

Figura 8. Sistemas de Instrumentación SHM y MHM en algunos de los grandes puentes destacados a Nivel mundial.

2.4. Tipos de sensores

En el año 2007 Wong [W] estructuró el Sistema de Instrumentación de una estructura en base a los estudios realizados en diversos puentes en Hong Kong. Concretamente, realizó un inventario de los sensores empleados, indicando su naturaleza y funcionalidad, tal y como se recoge en la tabla siguiente.

| Categoría | Tipología | Sensor |
|----------------------------|------------------|-------------------------------|
| Medioambientales | Viento | Anemómetro |
| | | Barómetro |
| | Temperatura | Termómetro |
| | Corrosión | Indicador de corrosión |
| | | Higrómetro |
| Sismo | Acelerómetro | |
| Acciones de tráfico | Carretera | Peso de vehículos |
| | | Galga dinámica |
| | | Cámara de video |
| | Ferrocarril | Galga dinámica |
| Cámara de video | | |
| Características del puente | Estático | Estación total |
| | | GPS |
| | Dinámico | Acelerómetro |
| Respuesta Estructural | Fuerza en cable | Acelerómetro |
| | Geometría | GPS |
| | | Estación total |
| | | Transductor de desplazamiento |
| | | Clinómetro |
| | | Termómetro |
| | | Extensómetro |
| | Estado tensional | Extensómetro |
| | | Célula de carga |
| | | Galga tenso-magnética |
| | Fatiga | Galga dinámica |

Figura 9. Tipología de sensores.

2.4.1. Sensores analíticos

Un sensor puede involucrar diversos principios de operación, por lo cual, es elegido dependiendo de las características del traductor y las necesidades del operador. Los transductores más comunes son del tipo capacitivo, electromagnético, inductivo, piezo-eléctrico y resistivo.

Los principales sensores para medir el comportamiento estructural de un puente se describen a continuación:

- **Clinómetros:** Los clinómetros miden giros (mRad) y, normalmente, se propondrá su colocación en cabeza y en base de pila, en direcciones longitudinal y transversal. El clinómetro se convierte en el principal indicador de la respuesta deformacional de la pila a lo largo del tiempo para fuerzas horizontales. Ante cualquiera de estas acciones horizontales (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. Igualmente, los clinómetros situados en base de pila permiten conocer el comportamiento de la cimentación, pues informarán de cualquier giro que pueda producirse. 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. A la hora de elegir las pilas en las que se instalan los clinómetros se debe tener en cuenta el esquema de comportamiento global de la estructura frente a fuerzas transversales y horizontales, y la esbeltez de cada pila. De esta forma, se instrumentarán, preferentemente, las pilas de mayor y menor esbeltez, así como las más y menos alejadas del punto fijo (o aquellas que constituyen punto fijo), y también aquellas pilas que por su menor esbeltez relativa frente a las pilas adyacentes pueden suponer un apoyo mayor frente a fuerzas transversales.
- **Sondas de temperatura:** Las sondas de temperatura, adheridas a las superficies metálicas o introducidas en los volúmenes de hormigón, miden temperatura (°C). En este caso la medida de la temperatura se realiza en diversas secciones de pilas y tablero, de esta forma se puede conocer la variación diaria que experimenta el gradiente de temperatura sobre la pila y sobre el tablero, y correlacionar los resultados obtenidos con el giro real medido por el clinómetro. Es decir, se trata de descontar el efecto que tienen los gradientes térmicos en la

deformación de las pilas y el tablero, para obtener así la parte de giro debida realmente a la carga viva y al viento. Asimismo, los resultados obtenidos a lo largo de toda la serie histórica se pueden comparar con los indicados por la normativa vigente. En los tableros, se instalan sensores en las almas y en las losas superior e inferior en varias secciones representativas. Tanto las pilas como los vanos elegidos deben ser representativos en cuanto al soleamiento y las características geométricas generales del viaducto.

- **Anemómetros:** Los anemómetros miden la velocidad del viento (m/s) y su dirección. Esta medida permite establecer un registro continuo de la intensidad y dirección de la acción del viento, calibrando especialmente la importancia de las ráfagas. Se colocan en una sección del tablero en centro de vano, y en diversos puntos de control en las pilas, a distintas alturas, lo que ofrece información acerca del perfil real de viento sobre la pila. Esto es especialmente indicado en la pilas altas, por ser las que más sufren la acción del viento, y por estar normalmente situadas en valles estrechos y profundos que pueden favorecer el encauzamiento del viento. Estos anemómetros miden de forma dinámica y continua extrayendo exclusivamente parámetros estadísticos, pero al paso de circulaciones reales o ante la superación de eventos prefijados ofrecen registros temporales para un posterior análisis. Así pues, por ejemplo, es posible caracterizar la respuesta de la estructura frente a distintas intensidades de la acción del viento en combinación con la sobrecarga.
- **Acelerómetros:** Los acelerómetros miden aceleraciones, uni o multiaxiales en los puntos de control (m/s^2). Los acelerómetros verticales instalados en tablero permiten realizar un estudio espectral de la vibración originada por la circulación. Informan acerca de las condiciones de confort ante el paso de los vehículos, de la rigidez y amortiguamiento de la estructura (y su posible variación a lo largo del tiempo). Se colocan en las secciones de centro de luz de los vanos más representativos, y en los vanos más sensibles del tablero (vanos extremos libres), en posición de centro de luz y en pila. Es interesante controlar un vano tipo de la zona central del viaducto y uno de los vanos extremos. Asimismo, en viaductos con vanos de diferentes luces se suelen elegir los vanos de mayor y menor luz. En alguno de los vanos se colocan 2 acelerómetros verticales, uno por alma del tablero, con el fin obtener información del

comportamiento en torsión. También se pueden instalar acelerómetros longitudinales y transversales en el tablero, para obtener la respuesta de la estructura frente a fuerzas centrífugas y de frenado o viento. De forma general, bastaría con disponer un acelerómetro longitudinal, en una sección de pila. En cuanto a los acelerómetros transversales, se instalan tanto en la sección de pila como en secciones de vano: en el primer caso se trata de medir la respuesta dinámica transversal de la pila, para lo que se elegirán al menos dos ubicaciones (en función de las esbelteces de la pila); en el segundo caso se trata de conocer la frecuencia propia transversal del tablero, para poder compararla con la asociada a la de los vehículos. Para obtener datos del comportamiento global del tablero se tiene la consideración de no disponer los acelerómetros en losa superior, sino en las almas o en la tabla inferior.

- **Transductores de desplazamiento:** Los transductores de desplazamiento miden el desplazamiento relativo entre dos puntos de control (m). El objetivo principal de esta medida es conocer el desplazamiento longitudinal relativo tablero – subestructura en determinadas secciones. Para ello, se colocaron transductores horizontales longitudinales entre tablero y coronación de pilas, y entre tablero y estribos. En el caso de las pilas, sería conveniente conocer datos de la pila más esbelta, y de la más y menos alejada del punto fijo. Asimismo, también es conveniente instrumentar las pilas que constituyan punto fijo (para verificar este aspecto, precisamente). Basta con tomar lecturas a la altura de uno solo de los aparatos de apoyo, o bien en el eje de la sección. La medida del desplazamiento relativo tablero – subestructura puede convertirse en un indicador del grado de funcionamiento de los aparatos de apoyo deslizantes. Asimismo, facilita un registro de los movimientos en la junta de dilatación por acciones reológicas, temperatura y esfuerzos de frenado.
- **Bandas extensométricas:** Las bandas extensométricas miden microdeformaciones ($\mu\epsilon$). Se colocan adheridos a las chapas metálicas, en caso de que se trate de un puente con tablero metálico. Los extensómetros se sitúan en las esquinas de las losas superior e inferior, por lo general. Las secciones del tablero a instrumentar deben ser las mismas elegidas para la colocación de los acelerómetros verticales, tanto en posición de centro de luz como en pila.

- Condiciones ambientales: Se suele colocar una estación meteorológica en las inmediaciones del puente o incluso sobre un pretil. Básicamente, se trata de una instalación destinada a medir y registrar regularmente diversas variables meteorológicas (lluvia, viento, humedad, presión atmosférica...).

2.4.2. Sensores de fibra óptica

El origen del uso de la luz en la codificación de señales se remonta a la antigua Grecia ya que los griegos utilizaban la luz solar para transmitir información mediante el uso de espejos.

En 1792, Chappe diseñó un sistema, consistente en la disposición de un elevado número de espejos en torres, que permitía transmitir un mensaje una distancia de 200 km - distancia entre Lille y París- en 16 minutos.

En 1849 Colladon y Babinet demostraron el principio del confinamiento de la luz por refracción en París. En 1910, Hondros y Debye consiguieron no sólo dirigir en una línea recta un rayo de luz, sino introducirlo en lo que se conoció como cables de vidrio, es decir, lograron domar la luz, de manera que se propagase en el interior de un cable. Así surge la fibra óptica - luz guiada-, conducto de vidrio ultradelgado y protegido por un aislante capaz de transportar una señal de luz.

En la década de los 90 se produce un nuevo avance: se desarrolló un sensor capaz de medir deformaciones a partir de las variaciones que sufre la luz al travesar una fibra óptica [AF]. Estos sensores se empezaron a utilizar en 1992 en el laboratorio de materiales del Instituto Federal de Tecnología de Laussane (Suiza). Posteriormente se incorporaron Diamont S.A., Passera and Pedretu e IMM de Grancia. Finalmente, todos ellos englobados en SMARTEC, han dado lugar al desarrollo de este tipo de sensores.

La fibra óptica es un medio de transmisión de redes de datos. Consiste en un hilo muy fino cilíndrico, de vidrio o plástico transparente, a través del cual se envían datos mediante pulsos de luz.

Un sensor de fibra óptica es un dispositivo que utiliza la luz para medir una magnitud física, y la fibra óptica como medio de transmisión desde la fuente hasta el detector. En función de cómo se realice la medición existen dos tipos de sensores:

- Extrínsecos: la fibra óptica se utiliza sólo como medio de transmisión.

- Intrínsecos: la luz permanece en todo momento en el interior de la fibra óptica, y sobre dicha fibra se produce la perturbación.

La fibra de medida está conectada a la estructura en dos puntos y, por tanto, se deforma igual que ésta; sin embargo, esta fibra también se alargará o acortará en función de la temperatura. La segunda fibra -fibra de referencia- sirve para compensar este efecto; esta fibra, aunque también está unida a la estructura en dos puntos, tiene una longitud mayor que la distancia entre los mismos, y por tanto, no está influenciada por las deformaciones de la estructura. De esta forma, ambas fibras se deformarán la misma cantidad ante las variaciones térmicas. El sensor mide la diferencia de alargamiento-acortamiento entre ambas fibras, por lo que la deformación propia debida al efecto térmico desaparece.

2.4.2.1. Tecnología de los sensores de fibra óptica

Los sensores de fibra óptica se comenzaron a usar en España a principios de este siglo en la Instrumentación de estructuras mediante la medición de campos de deformaciones [CDRGA]. Existen distintos tipos de dispositivos:

- Interferómetros: de Fabry-Perot, de Mach-Zehnder, Michelson, luz blanca...
- Redes de Bragg.

Las redes de Bragg son los más empleados debido a que presentan las siguientes ventajas:

- Permiten medidas absolutas con gran estabilidad a largo plazo gracias a su señal codificada espectralmente.
- Poseen un tamaño pequeño: 10 mm de longitud y 125 mm de diámetro; se pueden embeber en el material sin modificar sus propiedades mecánicas.
- El pequeño tamaño lleva consigo una masa también muy pequeña, que soporta muy bien las vibraciones.
- Utilizan una única fibra óptica como sensor y transmisor de la señal.
- Son insensibles a interferencias electromagnéticas.

2.4.2.2. Redes de Bragg

Las redes de Bragg [CDRGA] miden deformaciones absolutas con respuesta lineal. La precisión y el rango de medidas dependen del equipo de procesamiento de la señal. La

medición se realiza mediante una señal de luz de banda ancha introducida en una fibra óptica que detecta los valores de longitud de onda reflejados. El pico de longitud de onda se puede medir mediante varios métodos, siendo el más utilizado el de Fabry-Perot, ya que permite la instalación de varios sensores en una misma fibra óptica (multiplexores).

Estos dispositivos se fabrican inscribiendo una variación periódica de índice de refracción en el núcleo de una fibra óptica fotosensible mediante un láser ultravioleta; dicho láser pasa a través de una máscara de fase antes de alcanzar la fibra óptica, con el fin de producir un patrón de interferencia que provoque la variación periódica del índice de refracción.

En definitiva, una red de Bragg es un interferómetro óptico que cuando se ilumina con una fuente de luz blanca refleja únicamente una señal de banda estrecha: de 0.1 a 0.2 mm.

De esta forma, cualquier deformación, bien sea térmica o dinámica, puede detectarse mediante el cambio de la longitud de onda de Bragg. En condiciones isotermas, el cambio de longitud de onda se obtiene:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$$

siendo:

n_{eff} : índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra óptica.

Λ : periodo de modulación del índice de refracción.

La conversión de la señal óptica de deformación -pico de longitud de onda- en información eléctrica se realiza a través de un filtro de Fabry Perot (FPF) anterior al fotodetector.

2.4.2.3. Tipos de sensores de fibra óptica

2.4.2.3.1. Técnicas empleadas

Las técnicas de fibra óptica utilizadas con mayor éxito son [LRQC]:

- Extensómetros SOFO: sensor de fibra óptica constituido por dos fibras, fibra de medida y fibra de referencia.
- Transductores FBG: permiten la medición simultánea de deformación y temperatura.

- Sensores distribuidos: la fibra óptica entendida como el sistema nervioso.

2.4.2.3.2. Funcionamiento

El sistema de medida se basa en el principio de interferometría de baja coherencia. La luz emitida es lanzada en una fibra que al llegar al sensor se divide en las dos fibras. Dos espejos reflejan los dos haces de luz al final de ambas fibras; éstos son conducidos hacia el analizador, en donde un espejo móvil establece las diferencias de señal entre ambas fibras, comparándolas con las emitidas en la señal origen.

Surge así un sensor que presenta muchas ventajas:

- Es capaz de independizar los efectos térmicos en el propio dispositivo de la deformación de la estructura.
- No es necesario calibrarlo.
- Su longitud puede ser muy variable: desde 0.2 m hasta 30 m.
- Es muy estable, por lo que puede realizar mediciones a muy largo plazo.
- No es alterable ni eléctrica ni magnéticamente.
- Es muy resistente a la corrosión o a cualquier otra posible alteración físicoquímica.

Sus características principales son:

- Resolución: 2 μ .
- Precisión: superior al 0.2% de la deformación medida.
- Rango de medida: superior al 1% de la longitud del sensor en tracción.
- Tiempo de lectura: inferior a 10 segundos.
- Longitud del sensor: variable entre 20 cm y 30 m en medidas estándar.
- Distancia de lectura: hasta 5 Km.

2.5. Planificación de la Instrumentación

Antes de comenzar cualquier proyecto de Instrumentación de una estructura, es necesario establecer los objetivos de la misma, con el fin de poder identificar los parámetros a medir, y que deben reflejar su comportamiento estructural.

Una vez identificados los parámetros a medir se seleccionan los distintos aparatos que ayudarán a obtener las mediciones y a registrarlas correctamente. Al conjunto de todos los elementos que permiten llevar a cabo estas actividades se denomina Sistema de Instrumentación. La selección del Sistema de Instrumentación más adecuado, depende entre otros factores de los objetivos a alcanzar, los parámetros elegidos, la precisión de las medidas, la frecuencia de las capturas, las condiciones del lugar donde será instalado, etc.

El Sistema de Instrumentación se compone de tres elementos básicos:

- **Sensores:** los dispositivos especializados e instalados en contacto directo con los diferentes elementos y/o materiales de la estructura cuya función es la medida directa de una característica determinada: temperatura, inclinación, deformación...; son capaces de convertir las variaciones de una magnitud física -lectura directa de una determinada variable o señal de entrada: deformación, inclinación, tensión, temperatura...- en variaciones de una magnitud eléctrica, a través de una señal de salida que es función de la variable medida.
- **Sistema de Adquisición de Datos (SAD):** elemento encargado de la recepción de las medidas realizadas por los sensores, a través de un software informático que lo procesa, almacena y transmite. Está formado básicamente por un ordenador y el cableado que conecta éste con los sensores. Además, este sistema debe poseer una fuente de alimentación continua. Los datos pueden ser almacenados manualmente, semi-automáticamente o automáticamente, en el sitio o remotamente, periódica o continuamente, estática o dinámicamente.
- **Programa de control del sistema:** software diseñado específicamente para el procesado, análisis y presentación de los datos.

2.6. Tratamiento de Datos

Tal y como dice Matt Ariker [MAR], el convertir los datos en información conlleva cinco fases fundamentales:

- **Sincronización de los datos:** los datos deben estar sincronizados y ordenados para poder ser comparados. Eso exige que las referencias temporales sean las mismas para todos ellos y que a cada valor temporal le corresponda un valor de registro. Esta limpieza y orden deben estar garantizados durante todo el proceso de medición. Debe

entenderse que los datos deben estar organizados como si de una matriz se tratara. Los grandes conjuntos de datos no existen en un único lugar: tienden a estar repartidos entre múltiples dispositivos. Para garantizar fiabilidad y rapidez, un registro puede estar archivado en dos o tres emplazamientos distintos. Cuando se actualiza el registro en un lugar, los datos en las demás localizaciones dejan de ser correctos hasta que se actualicen a su vez. Supongamos ahora que se quiere incrementar la frecuencia de las mediciones del sensor. Si efectuamos una medición por minuto, podremos estar aceptablemente seguros de que la secuencia con la que lleguen los datos será perfectamente cronológica. Pero si cambiamos a diez o cien mediciones por segundo, la exactitud puede tornarse menos segura. Mientras la información recorre una red, un registro dado puede demorarse y llegar fuera de secuencia, o perderse sencillamente en la riada. La información será un poco menos precisa, pero su gran volumen hace que valga la pena renunciar a la exactitud estricta. La confusión también puede referirse a la disparidad de formatos, por la que los datos necesitan ser “limpiados” antes de su procesamiento.

- Exploración de datos: los sensores generalmente no dan un único dato y es importante saber cuáles van a resultar útiles e imperiosamente almacenables. Se trata, por lo tanto, de seleccionar los registros necesarios y descartar los irrelevantes.
- Estructuración de datos: se trata de organizar los datos de tal manera que se puedan consultar independientemente del estudio a afrontar.
- Análisis de los datos: en esta fase se trata de crear los modelos analíticos correspondientes. Se analiza este punto en el Capítulo III.
- Conclusiones: el objetivo es validar los modelos estadísticamente obtenidos en la fase anterior. Se debe tener capacidad técnica como para poder descartar aquellos resultados falsos, erróneos o ilógicos. Este punto exige, además, saber exactamente lo que el cliente espera obtener para orientar los esfuerzos de los análisis en esa dirección.

En la actualidad se deben utilizar distintas tecnologías informáticas para el tratamiento de los datos, debido a que pueden ser millones de datos es necesario contar con productos que puedan manejar la información suministrada de manera óptima y sin llegar al colapso:

- Bases de Datos: El lenguaje más corriente para acceder a las bases de datos ha sido desde hace algún tiempo el SQL, Structured Query Language o “Lenguaje de Pregunta

Estructurado”. Su mismo nombre evoca rigidez. Pero el gran cambio en años recientes se ha producido hacia algo llamado “no SQL”, que no requiere una estructura de archivo predeterminada para operar. El no SQL acepta datos de clases y dimensiones variables y permite efectuar búsquedas en ellos. A cambio de tolerar el desorden estructural, estos diseños de bases de datos requieren más capacidad de procesamiento y almacenaje.

- **Procesamiento de Datos:** Matlab es un lenguaje de alto Nivel y un entorno interactivo para el cálculo numérico, la visualización y la programación. Mediante MATLAB, es posible analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos o aplicaciones. El lenguaje, las herramientas y las funciones matemáticas incorporadas permiten explorar diversos enfoques y llegar a una solución antes que con hojas de cálculo o lenguajes de programación tradicionales, como pueden ser C/C++ o Java. Se puede utilizar en una gran variedad de aplicaciones, tales como procesamiento de señales y comunicaciones, procesamiento de imagen y vídeo, sistemas de control, pruebas y medidas, finanzas computacionales y biología computacional.

Este lenguaje de programación fue usado por el autor de esta Tesis para el análisis de los datos de eólica offshore y en el Puente el Beltrán, cuyos estudios se incluyen en el Capítulo IV. MATLAB es un paquete comercial, sin embargo existen herramientas Open Source que pueden llegar a hacer el procesamiento, destacando SciLab, usado en los laboratorios más importantes del mundo.

- **Control de Datos:** FAMOS es un programa de alto Nivel especialmente desarrollado para controlar, gestionar y trabajar con bases de datos. Tiene la ventaja de que, al servir como programa de control de los datos generados, crea unos ficheros de datos muy compactos y de poco volumen por lo que es recomendable en el caso de tener que trabajar con un importante volumen de datos. En contra suya está el que los ficheros generados son opacos y solamente se pueden analizar bajo el software que los creó. El modo de programar es muy similar a Matlab. El nombre FAMOS responde a las iniciales de Fast Analysis of Modal data. Su potencial radica, precisamente, en el análisis modal espectral. El autor de esta Tesis usó este programa para el seguimiento y análisis de la Instrumentación en los puentes Arroyo las Piedras, arroyo del Valle y Sant Boi (mixto y hormigón).

- **Adquisición de Datos:** CATMAN es un software de adquisición, visualización y análisis de datos de medición de características similares a los anteriores pero de menor versatilidad. . El autor de esta Tesis usó este programa para el seguimiento y análisis de la Instrumentación de diversos proyectos de eólica offshore y terrestre.
- **Software Estadístico:** R es un entorno informático de computación estadística y de generación de gráficos. R funciona en un amplio rango de sistemas operativos como UNIX, Windows o MacOS.
- **Manejo de Hojas de Cálculo:** Excel es un programa de uso popular perteneciente al paquete Office.

2.7. Instrumentación de un puente construido

2.7.1. Introducción

A continuación se presentan las metodologías generales desarrolladas para el seguimiento de los datos procedentes de la Instrumentación de cuatro grandes puentes para ferrocarril de Alta Velocidad construidos entre 2005 y 2007 en España que fueron objeto de Instrumentación y seguimiento por parte de ADIF. Estos trabajos fueron desarrollados por el autor de esta Tesis.

Los resultados obtenidos en este proyecto no se limitaron exclusivamente a nuevas recomendaciones para el diseño (incluidas en el Pliego General de Prescripciones para los Proyectos de Plataforma “PGP-08” y en las Instrucciones y Recomendaciones para Redacción de Proyectos de Plataforma “IGP-08” de ADIF) sino que también sirvieron para definir distintas metodologías para llevar a cabo el registro de los datos.

Las principales características de estos grandes puentes se presentan a continuación:

- **Viaducto sobre el arroyo de las Piedras:** Se trata de una estructura continua de veinte vanos con unas luces de $50.40+17\times 63.50+44.00+35.00$ m. La longitud total de la obra es de 1208.90 m. La solución adoptada consiste en una estructura continua mixta de hormigón acero. El Viaducto de las Piedras salva el valle del arroyo del mismo nombre, con una altura de pilas entre 10 y 92 m. La sección transversal del tablero está constituida por dos vigas armadas metálicas en doble T de canto 3.85 m sobre las que se apoya una losa superior de 0.41 m de espesor máximo en el eje de la sección, dando lugar a un canto máximo total constante de 4.26 m.

- Viaducto sobre el arroyo del Valle: El viaducto objeto de Instrumentación y seguimiento forma parte de las obras de construcción del tramo Madrid-Segovia-Valladolid / Medina del campo del Nuevo Acceso Ferroviario al Norte y Noroeste de España. Las luces de dicha estructura son de $52.50 + 25 * 66.00 + 52.50$ m, hasta hacer un total de 1755.00 m La sección transversal del tablero está formada por una viga cajón tipo artesa hueca, con losa inferior y superior. Los voladizos de la zona superior definen el ancho total de la plataforma, siendo de 17.60 m en el estribo 1 y variando linealmente hasta los 14 m en la pila 6, siendo constante dicha anchura en el resto del viaducto. La altura de las pilas es variable desde 15.00 m de la pila 25 a los 73.00 m de la pila 11 situada en el fondo del valle. También existe un arco tipo OJIVAL entre las pilas 14 y 15, formado por dos semi-arcos con un radio de curvatura de 312.00 m. La clave del arco materializa el punto fijo de la estructura, quedando ambos estribos libres de cara a asumir las deformaciones por retracción, fluencia y temperatura.

- Viaducto de Sanboi (mixto): El puente mixto tiene una longitud total de 340 m repartidos en 6 vanos de luces $44+4*63+44$ que se desarrollan en un tramo curvilíneo de radio 3500 m. El esquema resistente del viaducto se ajusta al de una viga continua simplemente apoyada en cinco pilas, 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 en planta y ortogonales por tanto a la traza, es decir que el puente carece de esviaje. La losa de hormigón armado que constituye la plataforma del camino ferroviario se suspende entre los dos cuchillos paralelos a la altura de las vigas longitudinales corridas, y descansa sobre vigas transversales Estas vigas son metálicas armadas de sección en doble T y van conectadas a las longitudinales mediante platabandas angulares soldadas a ambos elementos estructurales con diseños variables en cuanto a su rigidez según su posición. Las conexiones sobre estribos en ambos arranques son muy rígidas y el resto lo son mucho menos. Las pilas son todas sensiblemente iguales en altura, unos 15 m, salvo la intermedia que alcanza únicamente 8.00 m. 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.

- Viaducto de Sanboi (hormigón): tiene una longitud de 530 m, distribuidos en once vanos, nueve de ellos en el centro con luces de 50 m y otros dos vanos extremos de 40 m, es decir que el reparto de luces es $40+9*50+40$ m. Las pilas de diferentes alturas, 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. El tablero, de hormigón pretensado, tiene forma de cajón abierto en forma de U con las cabezas de las almas regruesadas. El canto total es de 4.20 m 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.

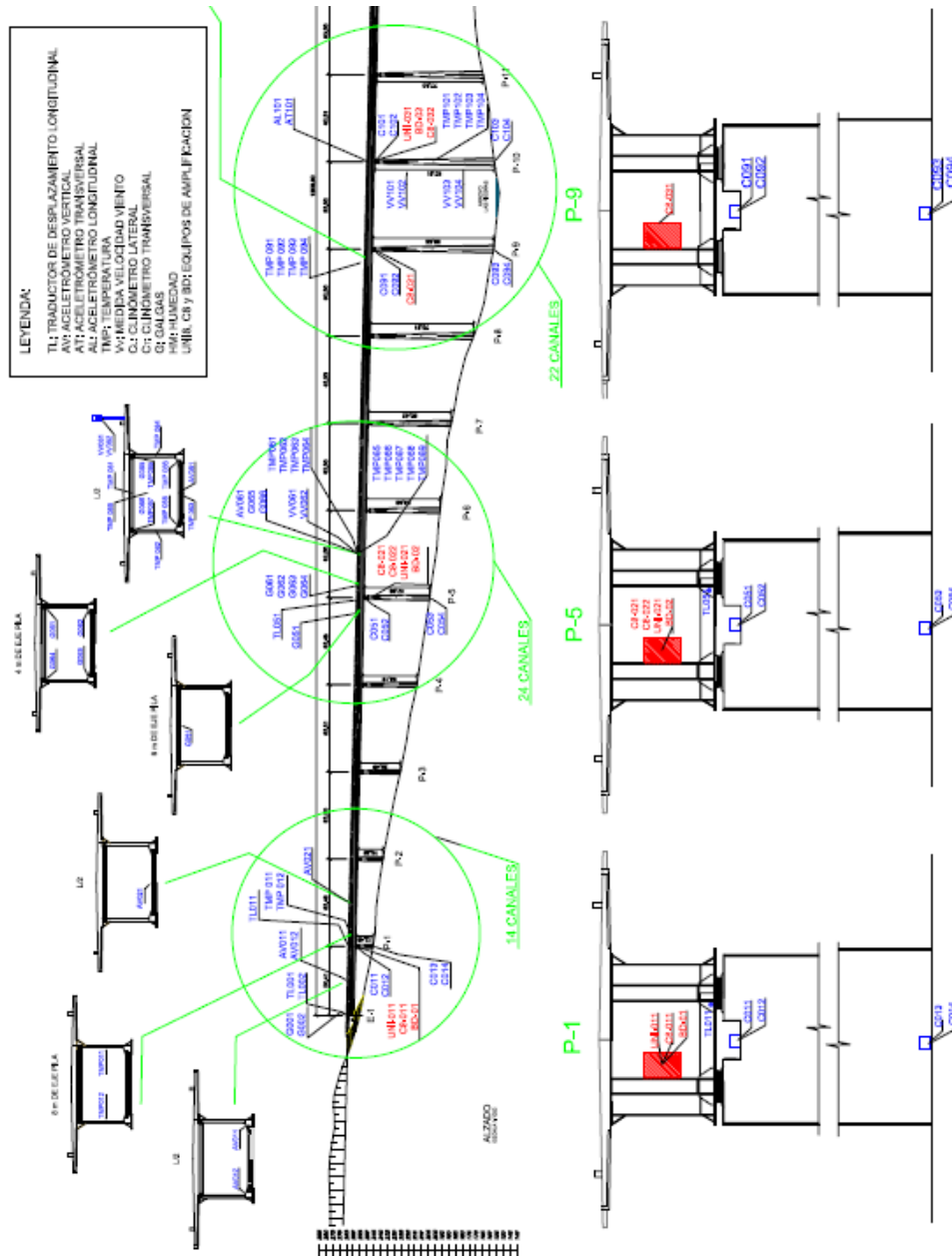


Figura 10. Extracto de plano de Instrumentación del viaducto sobre el arroyo de las Piedras. Cortesía de Ineco-Tifsa.

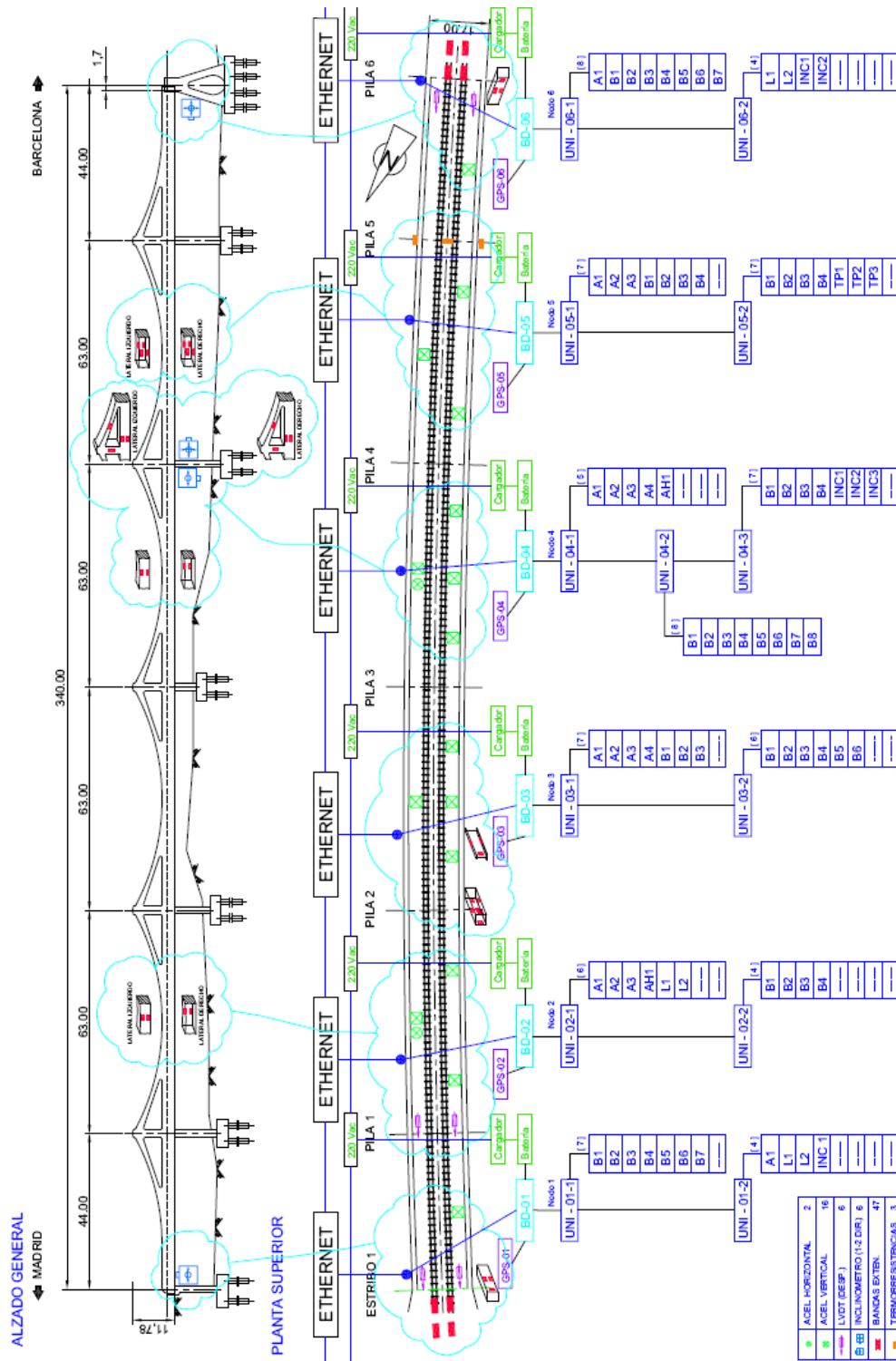


Figura 12. Plano de Instrumentación del viaducto de Sanboi (mixto). Cortesía del CEDEX.

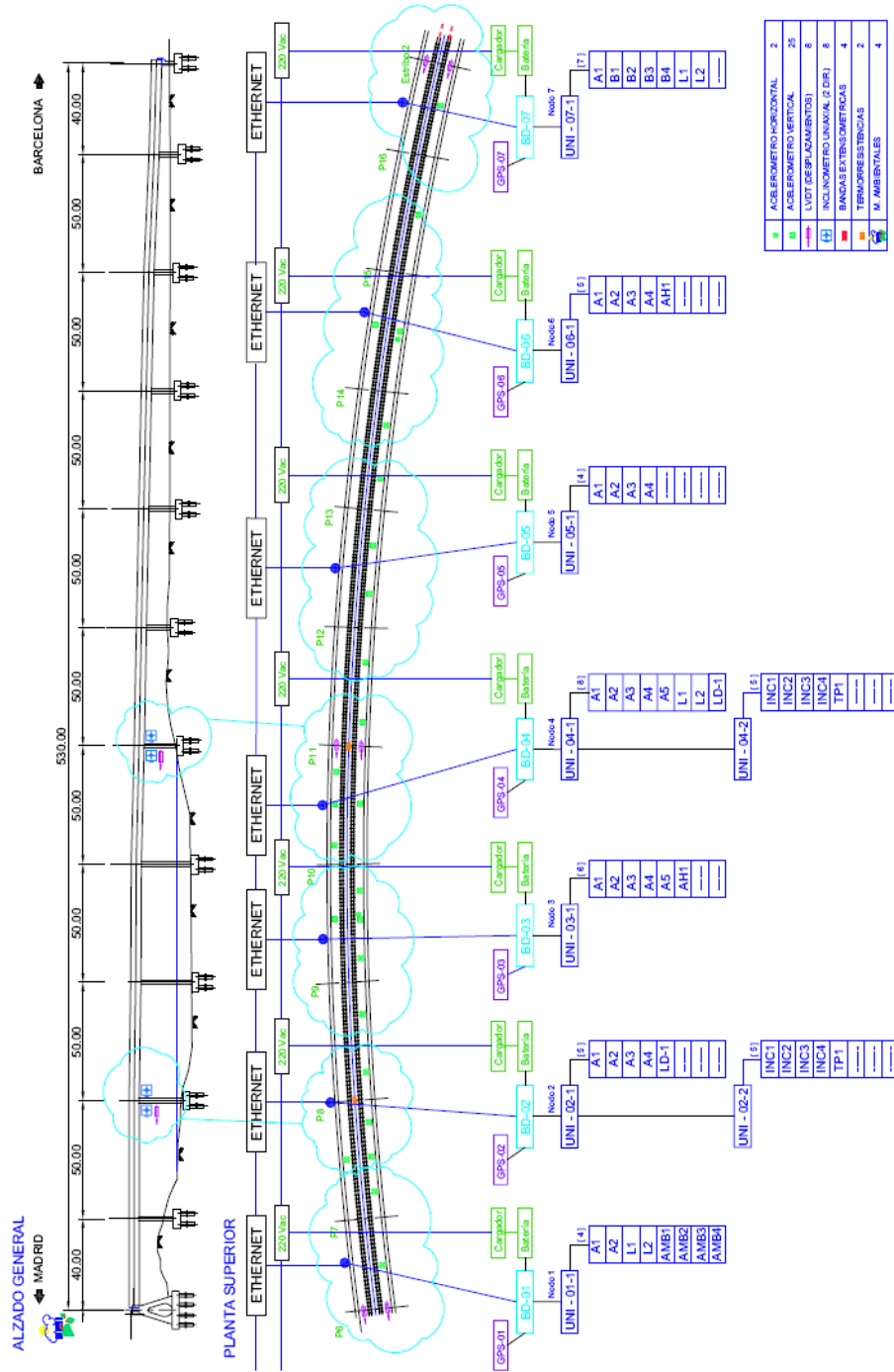


Figura 13. Plano de Instrumentación del viaducto de Sanboi (hormigón). Cortesía del CEDEX.

2.7.2. Registro continuo-discreto

2.7.2.1.Toma de datos

La toma de datos de la Instrumentación puesta en funcionamiento fue prácticamente continua (media frecuencia), sin embargo, se convirtió en un sistema continuo-discreto. Las principales características de este sistema de toma de datos fueron:

- Se realizó una medida continua en media frecuencia (20 Hz)
- Cada 10 minutos se calcularon los valores estadísticos más importantes (Máximo, Mínimo, Media, etc). Estos nuevos valores sustituían a los registrados de forma continua y son los únicos almacenados.
- Flexibilidad: posibilidad de registrar nuevos valores ante la demanda de otros estadísticos significativos como cuantiles, desviaciones típicas, etc.

La información sobre el tráfico en la línea se obtuvo directamente de ADIF.

2.7.2.2.Transmisión de datos

Los datos registrados fueron facilitados periódicamente a mes vencido.

2.7.2.3.Tratamiento de los datos

Esta fase exigió la utilización del software FAMOS 5.0 para el tratamiento de grandes volúmenes de datos. Este punto se abordó desde dos vertientes:

- Estadística descriptiva: Obtención de parámetros estadísticos significativos (Máximo, Mínimo, Media, Cuantil, etc.)
- Inferencia estadística: Obtención de modelos estadísticos de regresión para definición de correlaciones entre los parámetros registrados.

2.7.2.4.Interpretación de los datos

Una vez concluida la etapa de tratamiento de datos se dio comienzo a la interpretación que se realizó desde tres puntos de vista:

- Explicación de las correlaciones entre parámetros.
- Comprobación de la no superación de valores límites fijados en la Normativa.
- Comprobación de la respuesta medida en variables claramente estáticas con la resultante del modelo estructural del puente bajo las mismas acciones registradas (Temperatura y equivalente cuasi estático del viento).

Para ello se trabajó con el modelo de cálculo estructural, analizando la concordancia de los valores medidos con los esperados, simulando mediante equivalentes estáticos el comportamiento del viaducto.

2.7.3. Registros dinámicos

2.7.3.1. Toma de datos

Se propuso realizar un registro dinámico completo con periodicidad mensual, en lo que se dio en llamar “Evento Dinámico”.

En estos eventos se registraron datos en alta frecuencia de todos los sensores al paso de circulaciones convencionales. La duración media de los eventos resultó ser de unas 5 horas registrándose en este tiempo un promedio de 9 circulaciones de distintos trenes y a distintas velocidades.

2.7.3.2. Transmisión de datos

Los datos fueron facilitados a mes vencido al igual que los datos del continuo-discreto.

2.7.3.3. Tratamiento de los datos

Una vez recibida la información se procedió a iniciar la tarea de tratamiento de datos que exigía la utilización de un software de tratamiento de grandes volúmenes de datos. Esta fase se abordó desde dos vertientes:

- Estadística descriptiva: Obtención de parámetros estadísticos significativos (Máximo, Mínimo, Media, Cuantil,...).
- Análisis dinámico propiamente dicho: A través del registro continuo se obtuvo la caracterización dinámica de la señal, en términos de frecuencias propias, espectro de frecuencias, coeficiente de amortiguamiento, etc.

2.7.3.4. Interpretación de los datos

La interpretación de los datos del análisis dinámico se llevó a cabo desde dos puntos de vista:

- Comprobación de la no superación de los valores límite que recogen las normativas. Esta comprobación es inmediata una vez obtenidos los parámetros de aceleraciones verticales máximas en tablero, máximo desplazamiento en pilas, etc.
- Comparación de la respuesta medida con los valores ofrecidos por el modelo dinámico de la estructura bajo las sollicitaciones dinámicas observadas. Para ello es

necesario elaborar un complejo modelo de cálculo dinámico que represente los estados de carga solicitante (paso de tren y viento, fundamentalmente).

De esta forma se puede realizar un seguimiento del ajuste entre el comportamiento esperado del viaducto y el real.

2.7.3.5. Conclusiones

La metodología desarrollada en los puntos anteriores es una metodología válida para cualquier tipo de puente instrumentado y se consideró, en sí misma, una conclusión del proyecto.

Esta metodología se ha seguido aplicando por el autor de esta Tesis en el seguimiento de la Instrumentación en proyectos posteriores. A falta de textos reglamentarios, puede considerarse en sí mismo como norma de buena práctica.

2.8. Instrumentación de un puente en construcción

2.8.1. Calibración de la acción térmica en el Viaducto de Pujayo (Cantabria, España)

El Viaducto de Pujayo (perteneciente al tramo Molledo – Pesquera de la Autovía Cantabria – Meseta) permite el paso de la autovía sobre el valle del río Galerón. Se trata de un viaducto de hormigón pretensado, construido por el método de avance en voladizo, de 420 m de longitud total, distribuidos en 5 vanos perfectamente encajados en el valle de luces $60 + 3 \times 100 + 60$ m. La sección transversal del tablero, de canto variable entre 6.0 y 2.5 m, es un cajón monocelular con almas inclinadas, capaz de alojar, en una única plataforma de 26.10 m de anchura, las dos calzadas de la autovía. Las pilas, rectangulares de doble canto variable, tienen una altura máxima de 64 m.



Figura 14. Vista aérea del viaducto, con el pueblo de Pujayo al fondo.

De este modo la sección transversal del tablero está compuesta por un cajón monocelular de hormigón pretensado de almas inclinadas y con sendos voladizos laterales, construido por el método de avance en voladizo con dovelas hormigonadas “in situ”. El canto del tablero, con variación parabólica, alcanza una altura máxima de 6.0 m sobre la sección de apoyo en pila y una altura mínima de 2.5 m en el centro de luz. De esta forma la esbeltez (relación de la luz L frente al canto) varía desde un valor de $L/16.6$ en pila hasta los $L/40$ en centro de luz de los vanos, lo que indica la notable esbeltez de este viaducto. En los vanos laterales la parábola de definición del canto es la misma en los 50 m a cada lado de la pila, y se une al estribo con un tramo de 10 m de longitud y canto constante 2.5 m.

La anchura de la tabla superior del cajón es constante e igual a 15.70 m, mientras que la tabla inferior presenta una anchura variable entre los 7.10 m en la sección de pilas hasta los 12.17 m en la sección de centro de luz. Para completar los 26.10 m de anchura de la plataforma se disponen a cada lado del cajón central sendos voladizos laterales de 5.20 m de longitud y 0.25 m de canto. Estos voladizos están rigidizados cada 5.0 m por unos nervios transversales, que se prolongan desde los extremos hasta la parte interior del cajón.

El proceso constructivo considerado para el tablero del viaducto fue el de avance en voladizos sucesivos desde las pilas. Durante el avance en voladizo únicamente se construye el cajón central de 15.70 m de anchura, hormigonándose posteriormente los voladizos laterales del tablero una vez que se realiza el cierre de los vanos.

Siguiendo este esquema, una vez concluidas las pilas 1 y 4 se inició el avance en voladizo del tablero, materializándose la típica composición en T formada por la pila y los “brazos” del tablero que van prolongándose a cada lado de ella. Para garantizar la estabilidad del conjunto, la unión entre tablero y pilas ha sido diseñada de forma que, temporalmente, las pilas sean capaces de empotrar también el giro longitudinal del primero. Para ello se proyectaron unos muretes provisionales de hormigón, situados entre la coronación de las pilas y el fondo del tablero, a través de los cuales se prolongó la armadura vertical de las pilas hasta introducirse en las dovelas 0 del tablero.

Particularmente laborioso fue el inicio de los trabajos de construcción del tablero sobre la pila 1, pues era la primera vez que se acometía este tajo en la obra. Tanto las labores de ejecución de la dovela 0, como las de montaje y posicionamiento del potente carro metálico de avance de 140 t de peso, ocuparon un periodo de casi 4 meses.



Figura 16. Montaje de carros de avance sobre dovela 0.

El ciclo de construcción de una dovela comienza con el avance del carro hasta el frente de la última dovela hormigonada. Posteriormente se posiciona el carro con la contraflecha adecuada y se procede al ferrallado y hormigonado de la dovela. Por razones de optimización del ciclo las operaciones de ferrallado y hormigonado se realizaban en dos fases: primero la losa inferior del cajón y posteriormente las almas y la losa superior. Una vez hormigonada la dovela (siempre desde adelante a atrás para que la propia deformación del carro de avance no perjudique la junta entre dovelas) se desencofraba y finalmente se tesaban los tendones del pretensado isostático, o de construcción, finalizando así un ciclo con una duración media de 10 días (pero que, una vez optimizado y con condiciones meteorológicas favorables, se llegó a rebajar hasta los 7 días). De esta forma se construyeron un total de 9 dovelas de 5.0 m de longitud a cada lado de la pila 1, más una dovela extrema de 2.5 m de longitud.

Paralelamente a la construcción de la T de la pila 1 estas mismas operaciones se desarrollaron en la T de la pila 4, empleando otra pareja de carros.

Una vez acabada la T de la pila 1 la pareja de carros de avance fue desmontada y trasladada a la T de la pila 2, y con este mismo carro de avance se construyó a continuación también la T de la pila 3.



Figura 17. Construcción de la T de la pila 2.

El carácter altamente evolutivo de las estructuras construidas por el método de avance en voladizo, como es el caso del Viaducto de Pujayo, exige realizar, cuanto menos, un permanente control geométrico del tablero durante toda la obra.

Tradicionalmente se ha venido realizando este control mediante el empleo de medios topográficos clásicos, a través de los cuales se llevaba a cabo una actualización permanente de la posición de cada una de las dovelas del tablero, comprobando la correspondencia de la situación real del puente con los valores teóricamente esperados y corrigiendo, en su caso, el posicionamiento de las nuevas dovelas pendientes de hormigonar.

Si bien en el caso del Viaducto de Pujayo se mantuvo este sistema clásico de control, se incorporó también un Sistema de Instrumentación estática permanente de los principales parámetros que gobiernan el comportamiento del puente. Para ello se dispusieron una serie de sensores en distintas secciones del tablero y de las pilas, controlados electrónicamente en tiempo real mediante un sistema de adquisición de datos gobernado por un ordenador. La información suministrada por todos estos sensores fue transmitida vía internet en tiempo real a través de una antena parabólica instalada en el puente.

La principal aplicación del Sistema de Instrumentación estática fue la corrección de los efectos parásitos del gradiente y de las sobrecargas desequilibradas de obra sobre las contraflechas teóricas a la hora de posicionar la cota de los carros de avance. Por eso se controlaron en tiempo real los giros en cabeza de pila de cada una de las T mediante la instalación de clinómetros longitudinales. En el momento de posicionar la cota de los carros de avance se leía el giro de desequilibrio que tenía en ese instante la cabeza de pila y se corregía en consecuencia la contraflecha teórica.



Figura 18. Clinómetros.

Con los clinómetros también se controlaron los giros reales de la T al hormigonar las dovelas, así como si el hormigonado de cada par de dovelas resultaba equilibrado.

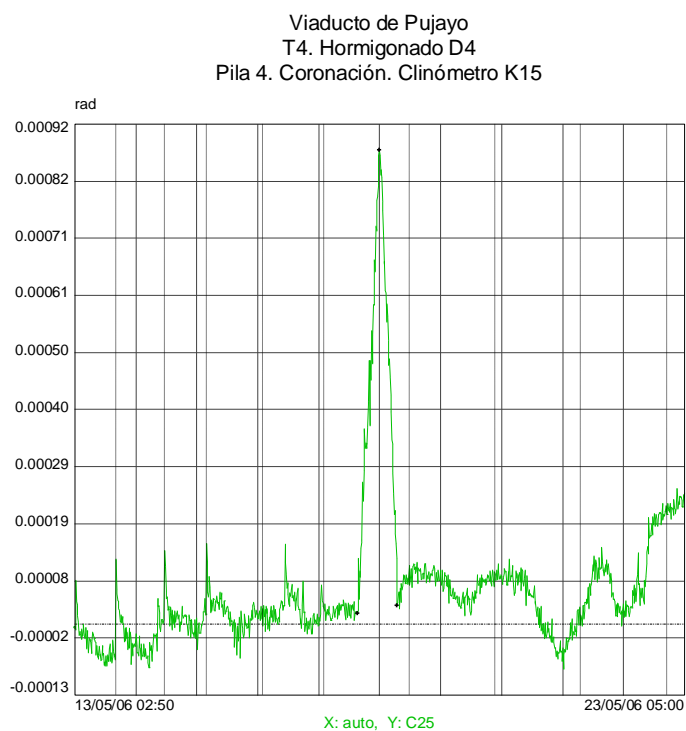


Figura 19. Giros en cabeza de pila 4 durante el hormigonado de la dovela 4 de la T de pila 4.

Aparte de clinómetros, el Sistema de Instrumentación se completó con sondas de temperatura y con extensómetros en las secciones clave del tablero (pila y centro luz). De esta forma se podían conocer y controlar los siguientes parámetros estructurales:

- Giros en las cimentaciones de las pilas (mediante clinómetros).
- Giros en la cabeza de las pilas (mediante clinómetros).
- Giros longitudinales del tablero (mediante clinómetros).
- Esfuerzos en cimentaciones y pilas (mediante extensómetros).
- Esfuerzos en el tablero (mediante extensómetros).
- Gradientes térmicos longitudinal y transversal en pilas (mediante sondas de temperatura).
- Gradientes térmicos vertical y horizontal en tablero (mediante sondas de temperatura).

Todo este Sistema de Instrumentación, puesto en funcionamiento en colaboración con Kinesia Ingeniería, permitió conocer a lo largo de todo el proceso cuál era el estado real tenso-deformacional del viaducto, pudiéndose comparar con los valores teóricamente esperados y verificándose la satisfactoria coincidencia de ambos.

2.8.2. Control de fuerzas en elementos auxiliares durante un proceso de izado de dovela en Puente sobre la Bahía de Cádiz (Cádiz, España)

El Puente sobre la Bahía de Cádiz también llamado Puente de La Pepa, o el Puente de la Constitución de 1812 es un puente que cruza la bahía de Cádiz. Tiene un gálibo máximo de 69 metros y 5 kilómetros de longitud total y está proyectado para ser un puente de gran capacidad de comunicaciones con dos carriles de autovía por sentido y otros dos carriles reservados para el transporte público metropolitano.



Figura 20. Construcción mediante avance en voladizo sobre Pila 12. Junio 2014.

Tiene, como datos más destacados:

- La longitud total de puente, viaductos y enlaces es de 5 km: 3157 metros en el puente de los que 1655 m serán sobre el mar, con un vano principal de 540 metros, récord de España, con cien metros más que el puente Ingeniero Carlos Fernández Casado, ilustre ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, sobre el embalse de Barrios de Luna. Además el vano es el tercero más grande de Europa de la clase de atirantados, después del Puente Rio-Antirio y el Puente de Normandía.
- La altura máxima respecto al Nivel del mar es de 69 metros, convirtiéndose así en uno de los puentes más altos de Europa, con dos pilonos de hasta 187 metros.
- El tablero, en la zona atirantada es una sección mixta hormigón-acero con un canto total de 3 metros, chapa inferior de 10 metros de anchura y dos chapas inclinadas con una anchura que varía entre 10.25 y 11.25 metros.

- El espesor total de la losa de hormigón es de 0.30 metros, formada por una prelosa nervada de 0.08 metros de espesor y una losa hormigonada in situ de 0.22 metros.
- En todo el tramo atirantado se disponen dos grandes vigas laterales formadas por dos vigas en C armadas, con un canto total de 1,40 metros, que permiten el anclaje de los tirantes al tablero con toda la variación de fuerzas e inclinaciones y la compresión longitudinal al tablero.

El esquema de Instrumentación de este puente consta de más de 500 sensores distribuidos en distintos puntos y ha sido puesto en marcha por KINESIA Ingeniería.

Es fácilmente entendible que el proceso constructivo de un puente de estas características esté compuesto por numerosas fases e hitos constructivos de gran complejidad técnica y la Instrumentación tiene una importante misión de control y asistencia en cada una de ellas.

El tramo metálico atirantado se construye por avance en voladizo. Una de las fases incluidas en este proceso es el izado de las dovelas.

El izado se realiza gracias a la previa colocación en el extremo de voladizo ya construido de un carro que eleva las dovelas metálicas colocadas en la base de la pila mediante cuatro cables. Los cables cuelgan de dos trolleys que, a su vez, están soportados por dos grandes cuchillos (derecho e izquierdo). Finalmente dos marcos, uno central y otro trasero arriostran transversalmente los cuchillos y se anclan a la parte de tablero ya construido.

Uno de los factores a controlar durante el izado de las dovelas es la fuerza en las barras de anclaje del marco trasero que irán entrando en carga hasta conseguir despegar la dovela del suelo. Las barras del marco delantero están sometidas a esfuerzos de compresión pero son importantes en el caso de la caída de la dovela. En ese hipotético caso las barras se traccionarían por el impacto y la posición del carro estaría controlada.

El izado, una vez que la dovela se encuentra suspendida, presenta otro punto crítico: el ripado de la dovela. El brazo con respecto al centro de gravedad del conjunto carro-dovela crece durante el ripado. De esta manera se consigue colocar la dovela en la posición definitiva.

Los valores leídos por las células de carga en las barras se comparan con los teóricos obteniéndose tensiones en las barras inferiores al 40% del límite elástico. De este modo se garantiza la seguridad del izado.

A continuación se incluyen los valores obtenidos mediante la Instrumentación durante el seguimiento de una operación de izado.

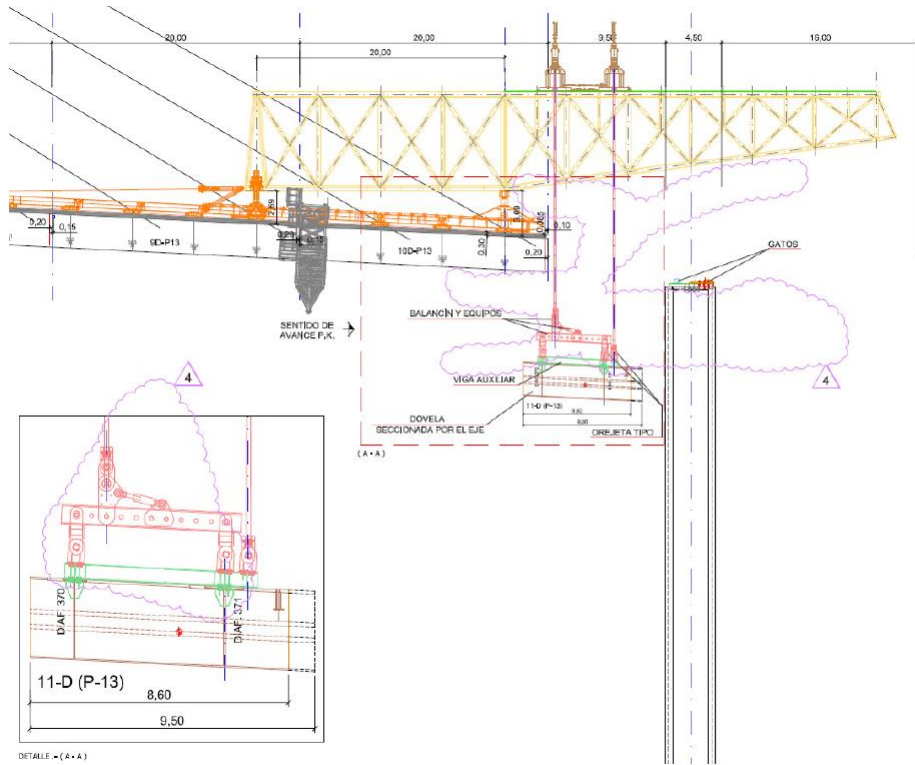


Figura 21. Carro de izado. Izado de dovela 11 derecha sobre pila 13. Cortesía UTE Bahía de Cádiz y Kinesia Ingeniería.

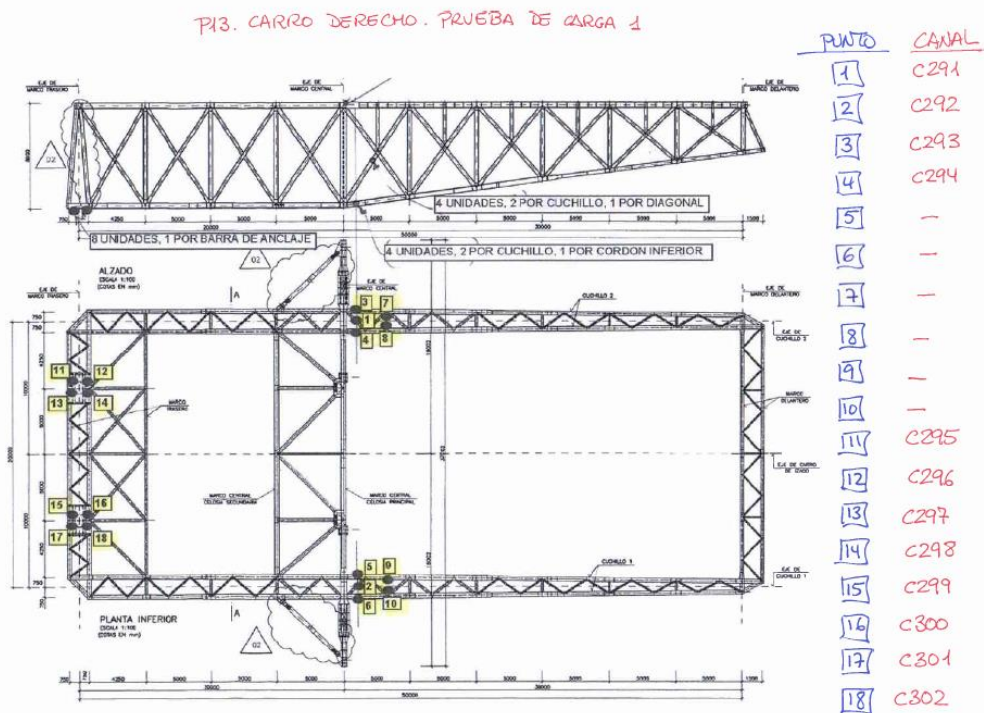


Figura 22. Esquema de Instrumentación del carro de avance mediante células de carga. Cortesía UTE Bahía de Cádiz y Kinesia Ingeniería.

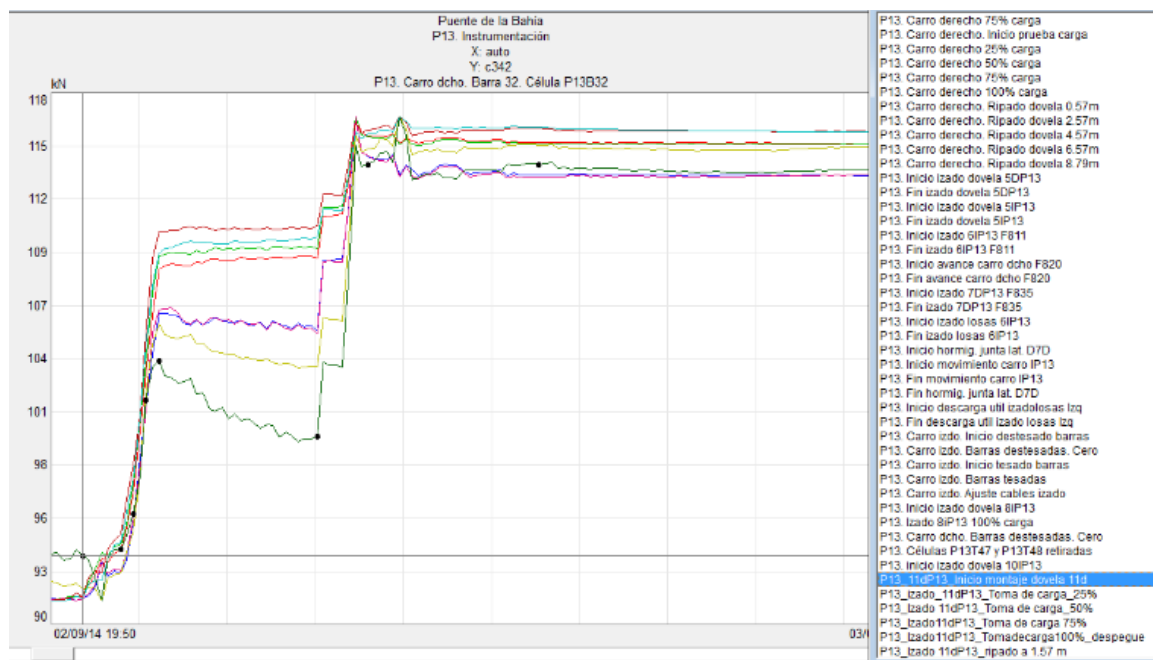


Figura 23. Inicio de montaje de dovela. Izado dovela 11 derecha sobre pila 13.
Cortesía UTE Bahía de Cádiz y Kinesia Ingeniería.

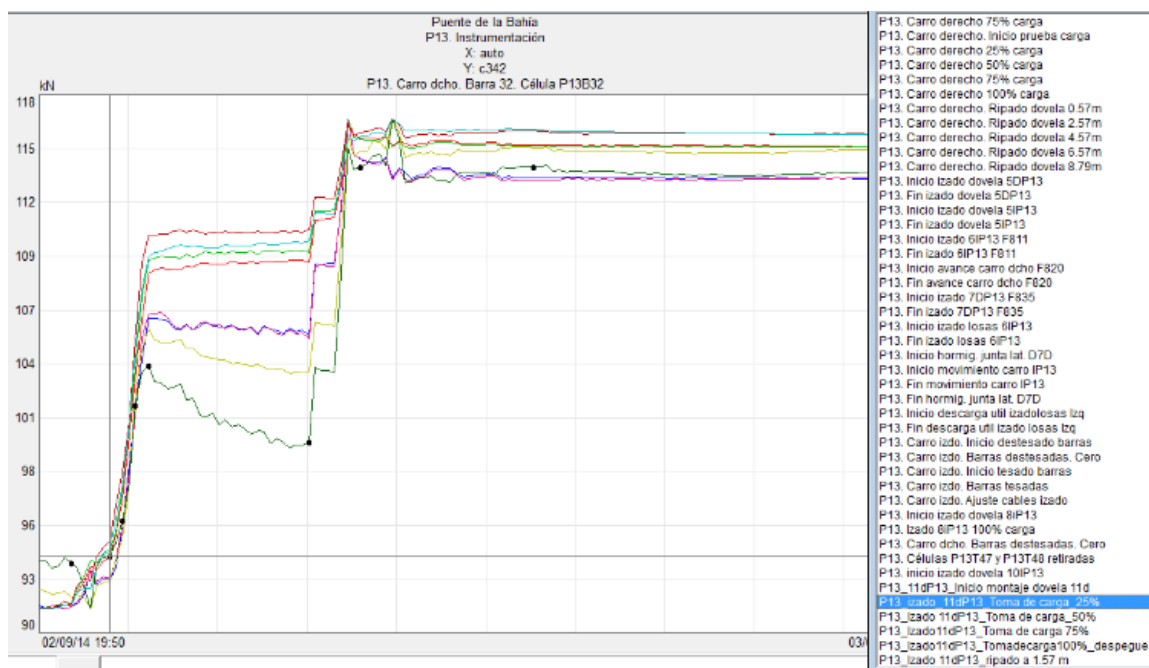


Figura 24. Toma de carga 25%. Izado dovela 11 derecha sobre pila 13. Cortesía
UTE Bahía de Cádiz y Kinesia Ingeniería.

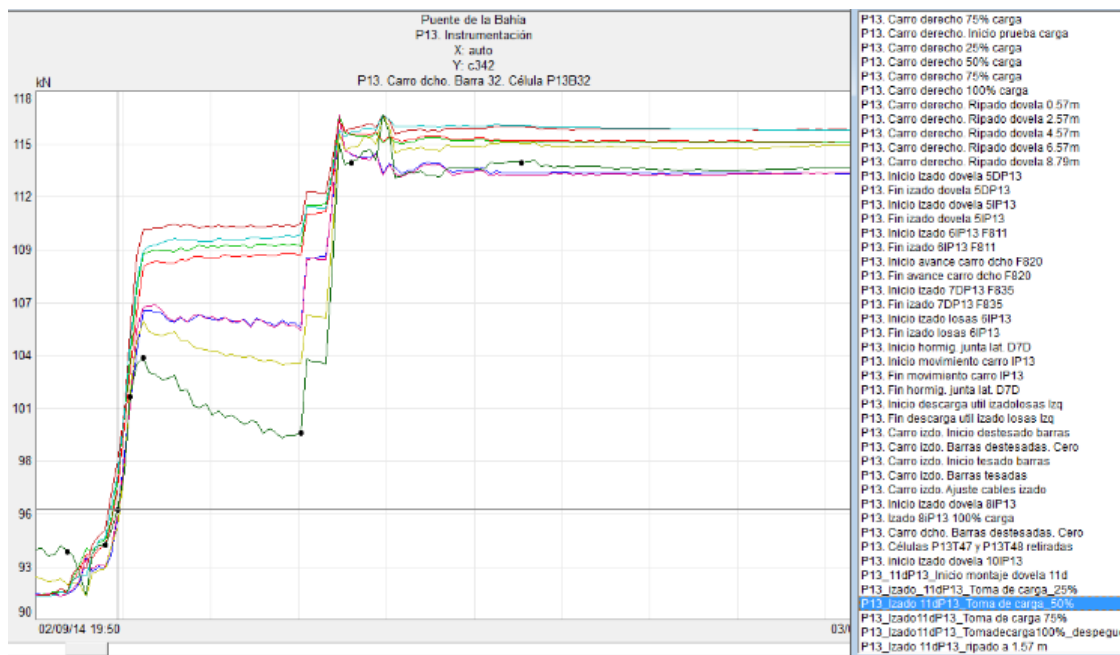


Figura 25. Toma de carga 50%. Izado dovela 11 derecha sobre pila 13. Cortesía UTE Bahía de Cádiz y Kinesia Ingeniería.

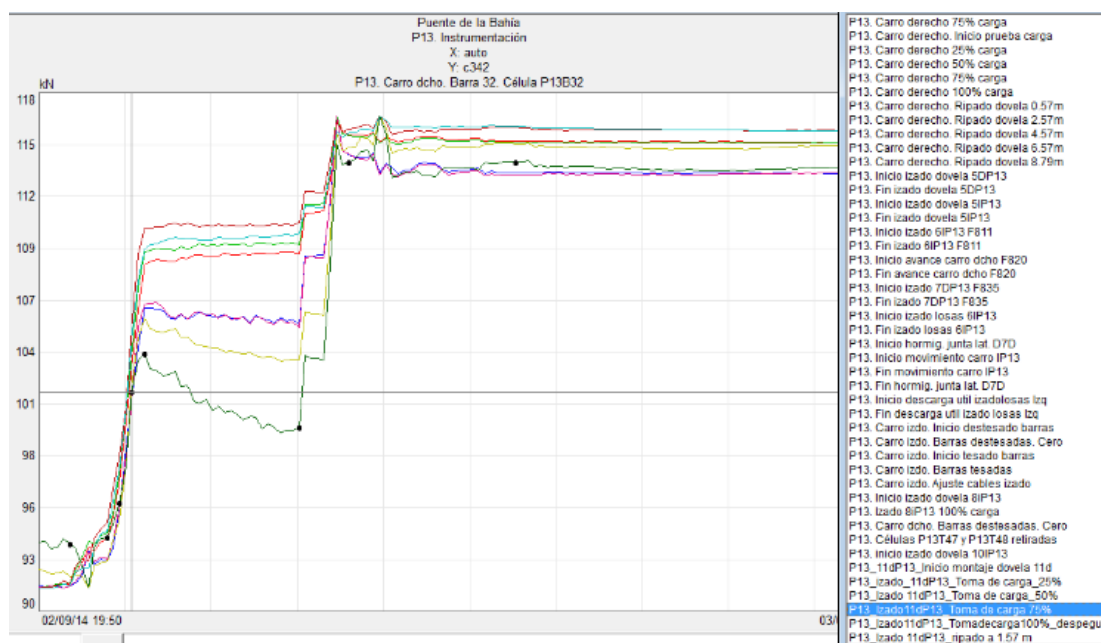


Figura 26. Toma de carga 75%. Izado dovela 11 derecha sobre pila 13. Cortesía UTE Bahía de Cádiz y Kinesia Ingeniería.

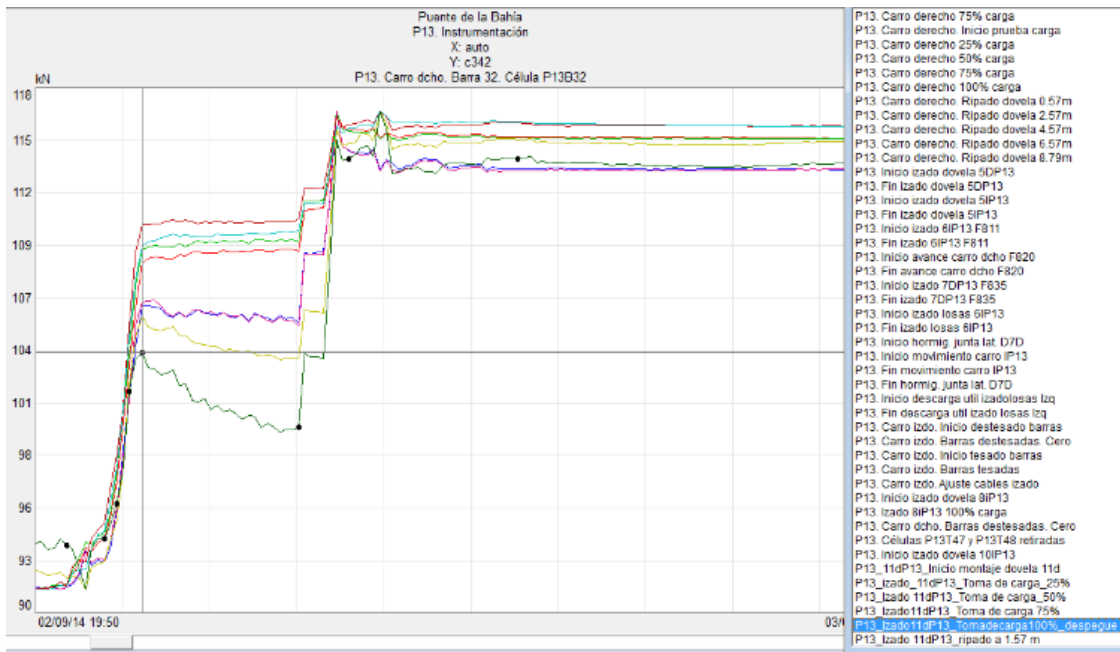


Figura 27. Toma de carga 100%. Izado dovela 11 derecha sobre pila 13.
Cortesía UTE Bahía de Cádiz y Kinesia Ingeniería.

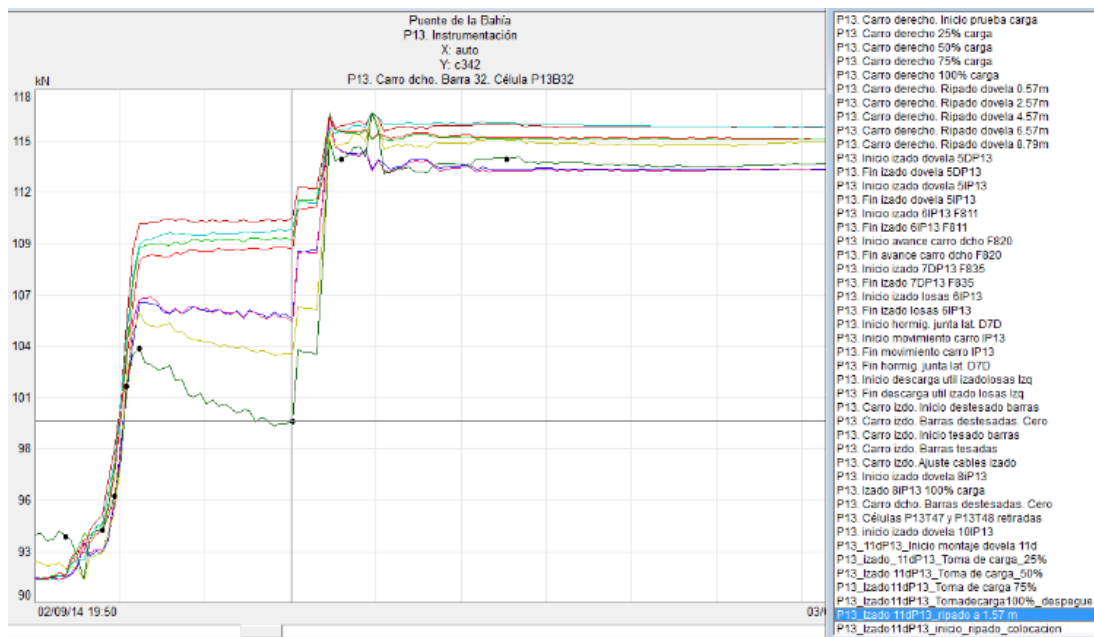


Figura 28. Ripado a 1.57 m. Izado dovela 11 derecha sobre pila 13. Cortesía UTE Bahía de Cádiz y Kinesia Ingeniería.

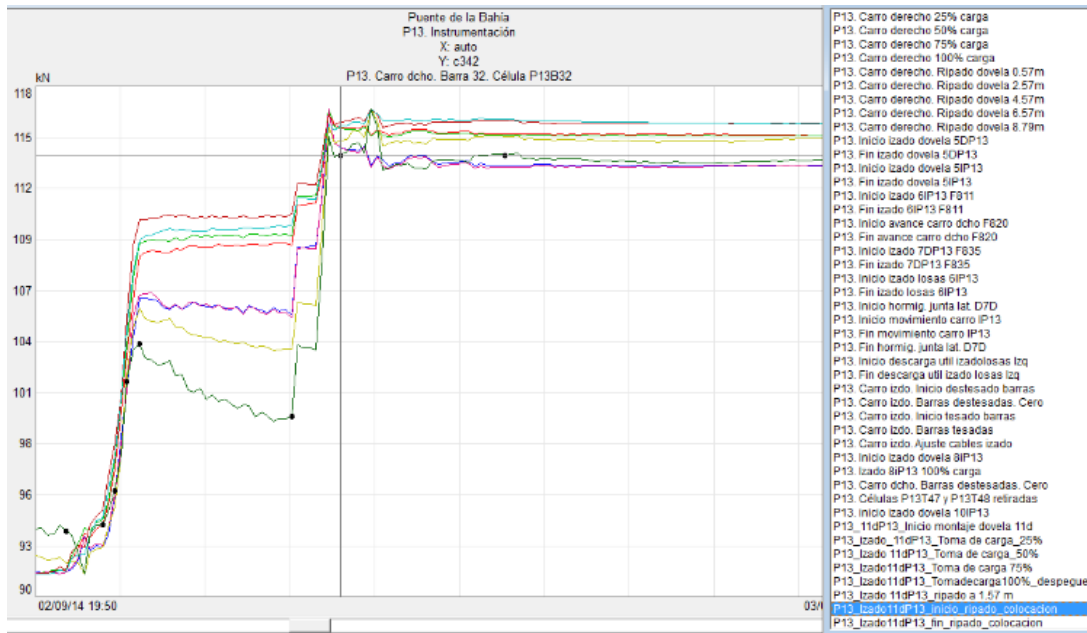


Figura 29. Inicio ripado y colocación. Izado dovela 11 derecha sobre pila 13.
Cortesía UTE Bahía de Cádiz y Kinesia Ingeniería.

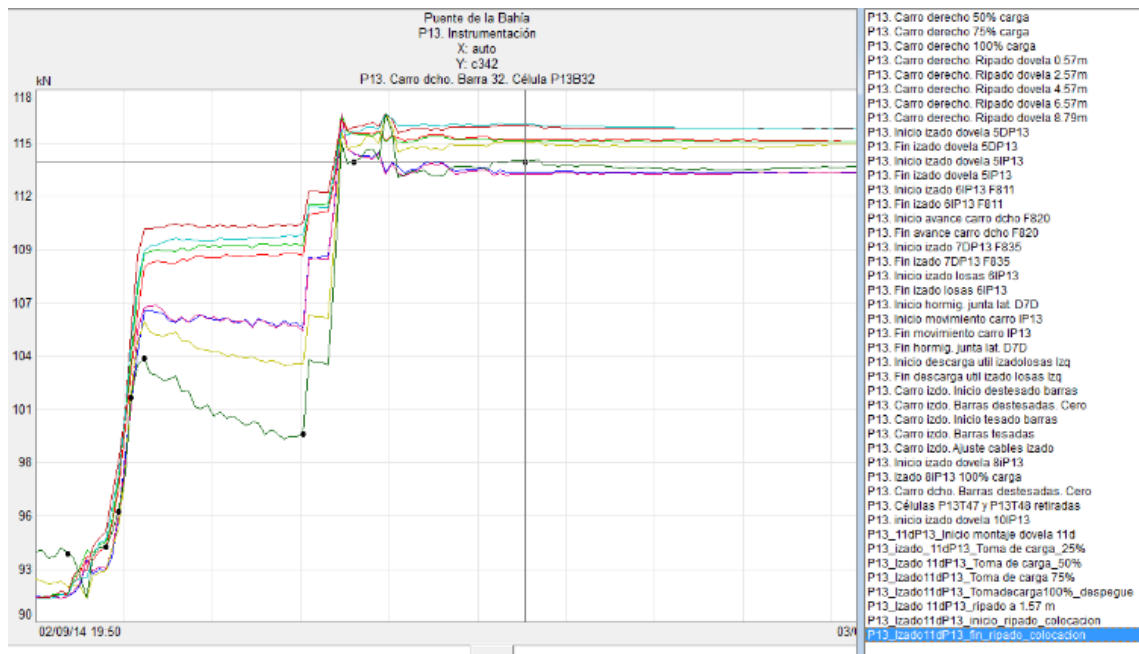


Figura 30. Fin ripado y colocación. Izado dovela 11 derecha sobre pila 13.
Cortesía UTE Bahía de Cádiz y Kinesia Ingeniería.

2.9. Instrumentación no electrónica

2.9.1. Introducción

Teniendo en cuenta que el objetivo fundamental de la observación del puente es obtener datos para conocer su comportamiento real es necesario destacar otro tipo de metodología basada en la toma de los datos de forma directa y manual, es decir, sin sensores electrónicos. Para ello se describe la metodología de trabajo desarrollada por el autor de esta Tesis en el proyecto denominado “Análisis y Medida del Comportamiento de los Puentes de las Líneas de Alta Velocidad encomendadas a ADIF” llevado a cabo por APIA XXI entre los años 2006 y 2009.

Este proyecto se situaba en la línea de los trabajos desarrollados por Inaudi [I] o los ya comentados del Puente Largo de Aranjuez [OF]. Algunos datos y conclusiones extraídos de estos trabajos están incluidos en la Tesis Doctoral de D. Oscar Ramón Ramos Gutierrez presentada de forma simultánea a ésta.

Todo el trabajo desarrollado se basó en la toma de medidas en inspecciones de campo realizadas sobre 100 viaductos seleccionados. Los trabajos dieron comienzo en julio de 2006 y continuaron hasta finales del año 2009 habiéndose realizado dos inspecciones por viaducto.

Posteriormente se realizó una intensificación de los trabajos sobre tres de esos viaductos con el fin de profundizar en algunos estudios como, por ejemplo, el comportamiento de los aparatos de dilatación de vía.

Todos los viaductos inspeccionados pertenecen a las Líneas Madrid-Zaragoza-Lérida, Córdoba-Málaga y Madrid-Segovia-Valladolid y fueron seleccionados teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Material.
- Disponibilidad de documentación.
- Tipología estructural.
- Ubicación y distancia entre puntos fijos.
- Longitud del vano mayor.
- Proceso constructivo.
- Altura y esbeltez de las pilas.
- Tipo y disposición de aparatos de apoyo y juntas de dilatación.
- Accesibilidad para la inspección.

- Localización geográfica.
- Año de construcción del viaducto.

A continuación se recoge una tabla con los viaductos inspeccionados así como su tipología. Como se puede comprobar se han inspeccionado 26 viaductos de sección viga (26%), 27 de sección losa (27%) y 47 de sección cajón (47%).

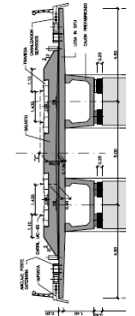
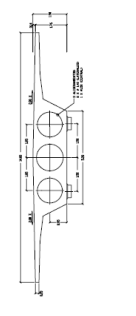

| TIPOLOGÍA | ISOSTÁTICO | CORTO | HIPERESTÁTICO | LARGO |
|--|---|--|--|--|
|  | Viaducto de la Colada del Santísimo Estructura E-4 sobre el metro de Arganda Viaducto del Jarama Viaducto sobre el río Peñiles Viaducto sobre el río Loren Viaducto de Hontoria Puente sobre arroyo Balsa Viaducto sobre A-4 Viaducto 705-000 Viaducto sobre el arroyo del Salado | Viaducto de Terer Viaducto de Valpiques Viaducto sobre N-232 Viaducto sobre Acequia Fuentes de Ebro Viaducto de Borgues Blancos Viaducto sobre N-240 Viaducto río A daja Puente sobre A-92 Viaducto de Valdecalaga Viaducto sobre M-206 Viaducto 3 Viaducto sobre M-204 Viaducto sobre N-320 Viaducto de Valdegrudas Viaducto sobre el Barranco del Otero Viaducto de Campablo Viaducto sobre N-122 Viaducto sobre A-2 Viaducto de la Concepción II Viaducto sobre carretera Somport-Sagunto Viaducto 300-700 Viaducto del Vellido Viaducto de Higueronias Viaducto de Campanillas Viaducto de Val de Palácín Viaducto de Val del Macho Viaducto sobre A-11 Viaducto sobre A-11 Viaducto de Val del Sorido Viaducto de Val de Perdideras Viaducto de Bensala III Viaducto del Valtoya | Viaducto sobre el Barranco de los Chermos Viaducto de Val del Lugar Viaducto sobre el río Anguera Viaducto sobre el río Morcos Viaducto del Ingeniero Viaducto sobre el río Yegüas Viaducto del Anchuelo I (Torres de la Alameda) Viaducto de Riera de la Femosa I Viaducto de Andomá Viaducto de Perogordo Viaducto sobre el río Cabra Viaducto sobre el río Guadalupe Viaducto de Chorreacás | Viaducto sobre el Barranco de Fuentelices Viaducto de Plasencia del Jalón Viaducto sobre el Segre I Viaducto sobre el río Jalón Viaducto del río Huena Viaducto del Cinca Viaducto de Vínaxa Viaducto del Valle Viaducto del Guadaquím Viaducto sobre el arroyo de las Piedras Viaducto del Espinazo Viaducto del Lévar |
|  | | | | |
|  | Viaducto del Genil Viaducto del Canal de Aragón | Madrid-Barcelona Madrid-Valladolid | Viaducto del Anchuelo II Viaducto sobre el arroyo de Valderachas Viaducto del Tejar Viaducto de Pradillos Viaducto de Benamita Viaducto sobre el río Blanco Viaducto del Chaparral Viaducto del Arroyo Sagides Viaducto de la Lesilla Viaducto sobre el arroyo de Valzarzo Viaducto sobre el arroyo Chacorra Viaducto sobre el arroyo de Pílonas Viaducto sobre el barranco de Haza del Conejo Viaducto sobre el barranco de la Covelana Viaducto sobre el barranco de San Lázaro Viaducto sobre el río Piedra Viaducto sobre el río Aranda Viaducto de Villanueva del Jalón Viaducto sobre Val de Vares Puente del Ebro Viaducto de Val de Castejón Viaducto de Val de Cabrerias Viaducto de Val de Ladriones Viaducto del Segre II Viaducto del Saboral Viaducto de Melalaha Viaducto de la Marcia Viaducto de Guadamazán | Córdoba-Málaga |

Figura 31. Selección de 100 viaductos pertenecientes a ADIF para seguimiento discontinuo (APIA XXI, S.A.)

2.9.2. Metodología para medición en campo

El desarrollo de los trabajos suponía una primera etapa de censo de estructuras y recopilación de información (proyecto construido, informes especiales, fichas de mantenimiento,...). Una vez recopilada toda la documentación se seleccionaron 100 viaductos aplicando los criterios ya comentados en el punto anterior. Una vez desarrollados estos trabajos de gabinete se dio paso al trabajo de campo.

Los trabajos de campo y sus objetivos se resumen a continuación:

- Inspección de las bases de pila de cara a detectar problemas de fisuración y monitorización de las posibles fisuras de origen estructural para controlar su evolución. Se hizo especial hincapié en aquellas pilas rígidas y susceptibles de sufrir los mayores movimientos relativos tablero-pila. También se prestó especial atención en las pilas altas y esbeltas por su flexibilidad, ya que de ellas se espera que puedan acompañar a los movimientos horizontales del tablero sin sufrir fisuración en la base derivada de esfuerzos de flexión de segundo orden. Es necesario poder distinguir entre fisuras estructurales (por alargamiento de la armadura, por tensiones de tracción o compresión excesiva del hormigón) y no estructurales (producidas en estado plástico o en estado de endurecimiento). Las que interesaban eran, en este caso, las primeras.



Figura 32. Monitor de fisuras en pila 4 del Viaducto Barranco del Chaparral (LAV Madrid-Zaragoza).

- Medida de la separación tablero-estribo móvil y colocación de referencias para obtención de medidas fiables en sucesivas mediciones. Con esta medida de lo que se trató fue conocer la respuesta del tablero ante los incrementos térmicos y los fenómenos reológicos. Por lo tanto, debía ir asociada a la medida de la temperatura en el instante de la medición. La primera de las medidas sirvió para posicionar el “cero” de referencia a partir del cual calcular los sucesivos movimientos del tablero. Con la segunda medida, y sucesivas, se podría así definir un movimiento y un gradiente térmico. Inicialmente se tomó únicamente la temperatura ambiente obteniéndose unos valores aproximados pero suficientes para modelizar la respuesta térmica de los tableros. Con estos datos, una vez caracterizada la respuesta del puente ante las variaciones térmicas, se pudieron estimar someramente los efectos de los fenómenos reológicos del hormigón pretensado. En este caso, dada la edad de los viaductos (entre 3 y 7 años, por entonces) la aportación de los fenómenos de retracción y fluencia a la deformación total del tablero era ya reducida y, por tanto, más difícil de precisar.

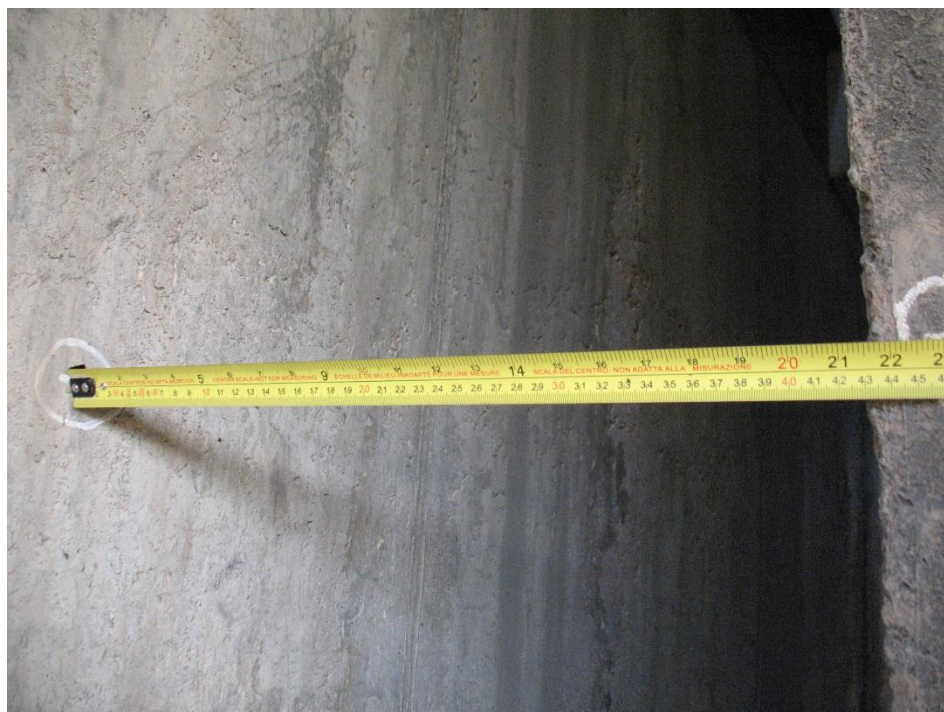


Figura 33. Medida del movimiento tablero-estribo en Viaducto Anchuelo II (LAV Madrid-Zaragoza).

- Medida de la temperatura ambiente y de la sección del tablero. La temperatura ambiente tomada en sombra se consideró suficientemente aproximada para estudiar las deformaciones por temperatura en el tablero. También se tomó la temperatura en distintos puntos en la sección del tablero. Estas medidas sirvieron para modelizar con mayor grado de precisión la respuesta del tablero ante las variaciones térmicas. En el caso de tableros tipo losa o viga bastó con la medida de la temperatura en el trasdós (derecha e izquierda) y alas. El valor medio de estos cuatro valores representó la sollicitación térmica en la sección. En el caso de las secciones tipo cajón se midió la temperatura de los paramentos desde el interior y el exterior así como la temperatura ambiente en el interior del cajón. El valor medio de las cinco medidas se consideró como el valor representativo de la temperatura del tablero.



Figura 34. Medida de la temperatura en alma de sección cajón del Viaducto río Huerva (LAV Madrid-Zaragoza).

- Inspección de los aparatos de apoyo y colocación de monitores de desplazamiento relativo tablero-pila. El principal problema para conocer los movimientos relativos tablero-pila que confirmarían el buen

funcionamiento de los aparatos de apoyo es la accesibilidad. Existen dos vías para acceder a los aparatos de apoyo: desde el exterior mediante el uso de una plataforma sobre camión o desde el interior del tablero, a través del paso de hombre en diafragma de pila. La primera de las visitas sirvió para tomar la referencia inicial o cero, a partir de la cual se referenciarían el resto de mediciones leídas con las regletas colocadas. Esa primera medición sirvió también para, de forma aproximada, conocer los máximos movimientos relativos tablero-pila desarrollados a lo largo de la vida en servicio del puente mediante la comparación de la parte sucia-limpia del aparato de apoyo. El monitor, una vez colocado, sirve para conocer la situación de dilatación-compresión del tablero en función de la temperatura y los fenómenos reológicos, así como el desplazamiento con respecto a la cabeza de la pila.



Figura 35. Monitor para el control del movimiento tablero-pila en Viaducto río Huerva (LAV Madrid-Zaragoza).

- Medida de la pérdida de verticalidad de pilas mediante topografía. Con este tipo de medida se trató de conocer los movimientos en cabeza de pila y completar de este modo la información obtenida con las regletas colocadas

en los aparatos de apoyo. En caso de que el movimiento leído en el monitor de desplazamientos tablero-pila no coincidía con el valor esperado se supuso que esa diferencia se debía al arrastre ejercido por el tablero sobre la pila en su movimiento de acortamiento o dilatación.



Figura 36. Control de la verticalidad de las pilas mediante topografía en Viaducto de Anchuelo I (LAV Madrid-Zaragoza).

- Medida del movimiento relativo de aguja y contraguja respecto a referencias colocadas en función de las variaciones térmicas del carril. En este caso de lo que se trató fue de conocer los movimientos de la aguja y la contraguja en función de las variaciones térmicas. La medida de la temperatura del carril se hizo, al igual que en el resto de medidas de temperatura, mediante el uso de una sonda de contacto. La medida del movimiento aguja/contraguja se hizo de extremo libre de carril (de aguja/contraguja) a la referencia colocada en una traviesa determinada. Posteriormente se medía el movimiento de la traviesa con respecto a un punto fijo colocado fuera de la plataforma de cara a caracterizar el movimiento absoluto de la aguja/contraguja. La combinación de los datos de temperatura en la sección

con los del carril se consideró valiosa desde el punto de vista del análisis de la interacción vía-estructura el cual no se desarrolló en el presente contrato.



Figura 37. Referencias para el control geométrico de la aguja y contraaguja en el aparato de dilatación de vía del Viaducto río Huerva (LAV Madrid-Zaragoza).

- Grado de sollicitación del ADV. Las medidas de los movimientos en aguja y contraaguja se complementaron con los movimientos (en proyección horizontal) de las distintas partes móviles del corazón del ADV. Conocida la carrera máxima teórica del aparato así como la carrera máxima real posible se pudo definir el grado de sollicitación al que se encontraban sometidos los ADV.



Figura 38. Aparato de dilatación de vía en estado de máxima capacidad. Viaducto río Guadalquivir (LAV Córdoba-Málaga).

2.9.3. Procesamiento de datos

Una vez compilados los datos de la campaña se iniciaban las tareas de procesamiento de datos cuyo volumen fue incrementándose progresivamente. Seguidamente, se daba lugar al análisis de los mismos. Este análisis se acometió desde dos vertientes:

- Estadística descriptiva: Obtención de parámetros estadísticos significativos (Máximo, Mínimo, Media, Cuantil, etc).
- Inferencia estadística: Obtención de modelos estadísticos de regresión para definición de correlaciones entre los parámetros registrados.

2.9.4. Análisis de datos

Los trabajos de gabinete (procesamiento y análisis de lo medido en campo, y contraste con lo teóricamente esperado) se fueron desarrollando de forma ininterrumpida y supusieron el cumplimiento de los puntos que se indican a continuación:

- Revisión de notas de cálculo y planos para obtención tanto de las características mecánicas como de las hipótesis tenidas en cuenta para el diseño.
- Cálculo de los valores teóricos de deformación por retracción y fluencia y temperatura mediante la aplicación de la normativa actual vigente “Instrucción de Hormigón Estructural (EHE)” e IAPF-07.

2.10. Resumen

- La Instrumentación de estructuras es un proceso que consiste en la captura continua o periódica, de forma permanente o habitual, de los parámetros más representativos que permiten conocer el estado de una estructura. Lo cual significa que puede realizarse a corto, mediano, largo plazo o inclusive durante la vida útil de la estructura.
- Las principales actividades que conforman la Instrumentación estructural son:
 - Selección de la estrategia de Instrumentación. *Qué se quiere ver.*
 - Instalación del Sistema de Instrumentación. *Cómo se quiere ver.*
 - Mantenimiento del Sistema de Instrumentación.
 - Manejo de los datos. *Saber ver.*
- Al iniciar un proyecto es necesario saber el funcionamiento físico que explica el fenómeno a instrumentar. Se trata de definir el objetivo de la

Instrumentación e identificar los parámetros a medir. Esta selección debe ser cuidadosamente analizada ya que los parámetros deben mostrar el comportamiento real de la estructura. Esto no es una tarea fácil ya que cada construcción posee sus propias particularidades tanto geométricas como funcionales.

- Una vez identificados los parámetros se seleccionan los distintos sensores que ayudarán a obtener las mediciones y a registrarlas correctamente. Al conjunto de todos los elementos que permiten llevar a cabo estas actividades se denomina Sistema de Instrumentación. Existen a su vez distintos tipos de Sistemas de Instrumentación que difieren entre sí, por sus principios de funcionamiento. Sin embargo, todos ellos constan de componentes similares (sensores, unidades para el almacenamiento y lectura de la información recopilada y programas de ordenador para el manejo del sistema y control de la información).
- La selección del Sistema de Instrumentación más adecuado depende, entre otros factores, de los objetivos a alcanzar, los parámetros elegidos, la precisión de las mediciones, la frecuencia de las capturas, las condiciones del lugar en donde será instalado (presencia de campos electromagnéticos, variaciones de temperatura, humedad, etc.), el procedimiento requerido para la instalación de los diferentes componentes del equipo, la posibilidad de automatizar el sistema, conectividad remota, la forma de manejar los datos, el Nivel en que la estructura será supervisada (global o local), etc.
- El diseño de la red de sensores depende de la geometría y el tipo de estructura analizada, ya que esto determina la manera de colocar los instrumentos y los resultados que se desean alcanzar con los parámetros seleccionados, de acuerdo con los puntos de interés. Es por ello que la instalación del equipo de Instrumentación es una etapa delicada y debe ser planeada a detalle considerando el estado del sitio donde se instalará, así como los tiempos en que se efectuará.
- En aquellas estructuras en fase de construcción donde se planea una Instrumentación permanente se debe prestar especial atención a la planificación y montaje del equipo ya que, de no ser así, se podría interferir en el desarrollo de la obra produciendo retardos indeseables. También puede

presentarse la situación de que los sensores requieran introducirse dentro de elementos de hormigón, en este caso se dispone de un periodo de tiempo muy corto entre la colocación del sensor, el vertido del hormigón y el fraguado del mismo. Esta es la razón por la cual resulta de vital importancia la definición de un plan y un calendario de actividades, ya que hay que sincronizar las acciones de la Instrumentación con las de la construcción. Una vez completada la instalación, el sistema debe ser protegido, sobre todo si aún se realizan trabajos constructivos. Se deben tomar todas las precauciones necesarias ante accidentes durante y después de la construcción que garanticen la integridad del equipo permanentemente.

- La adquisición de información normalmente se realiza durante la etapa constructiva y la vida útil de la estructura. De modo general, es recomendable que la frecuencia de adquisición de datos sea razonablemente establecida, debido a que una frecuencia de adquisición muy alta representa costes elevados. Esto solamente es justificable en el caso de estructuras que puedan correr el riesgo de un colapso repentino, ya que deben ser instrumentadas continuamente con la máxima frecuencia de mediciones posible. Por lo cual se puede decir que la frecuencia de mediciones depende principalmente del comportamiento esperado de la estructura.
- El manejo de los datos puede ser básico o avanzado. El manejo básico consiste en la ejecución de las mediciones (lectura de los sensores) almacenamiento de los datos (local o remoto) y el acceso a los datos.
- Los datos pueden ser registrados manualmente, semi-automáticamente o automáticamente, en el sitio o remotamente, periódicamente o continuamente, estática o dinámicamente. Estas opciones pueden ser combinadas de distintas formas. Para una Instrumentación a largo plazo, el óptimo se obtiene realizando el proceso automáticamente y de forma remota (en gabinete). Los datos pueden ser almacenados en forma de ficheros, reportes, tablas, gráficas y diagramas con diferentes tipos de soporte como archivos electrónicos o versiones impresas en papel. El modo de almacenamiento de los datos garantiza que no se pierdan y hace posible que el acceso a cualquier dato seleccionado sea rápido. Las posibles formas de almacenamiento y acceso de los datos se presentan en la figura siguiente.

- Los programas informáticos que administran y almacenan los registros de datos, forman parte del Sistema de Instrumentación. De otra forma, el manejo de los datos puede ser difícil, demandante y costoso.
- El tratamiento avanzado de los datos consiste en la visualización, interpretación, análisis, envío y uso de la información (generación de avisos y alarmas). Los datos registrados han de ser transformados en información relacionada con el comportamiento de la estructura. Este tratamiento puede ser realizado manual, semi-automática o automáticamente.
- El tratamiento manual de los datos consiste en la interpretación, visualización, envío y análisis de los datos. Se practica en los casos donde la cantidad de los datos es limitada. El tratamiento semi-automático de los datos consiste en la combinación de acciones manuales y automáticas. Generalmente, el envío de datos se realiza de forma manual y el análisis, automáticamente, empleando los algoritmos y herramientas adecuadas. Se debe tener mucho cuidado a la hora de seleccionarlos, ya que deben ser compatibles con el sistema de control elegido.
- El uso de estos recursos se aplica en casos en donde el análisis de la información se realiza de forma periódica. El manejo automático de la información es el más conveniente, ya que puede realizarse de forma rápida e independientemente de la cantidad de los datos o de la frecuencia del análisis. Y finalmente, en base a la información obtenida del análisis de los datos se pueden planificar acciones o nuevos estudios.
- No se pueden encontrar dos estructuras con las mismas características, por lo cual, la estrategia de Instrumentación es diferente para cada estructura y, con frecuencia, está limitada por el presupuesto disponible en el proyecto. El aspecto económico es importante para el desarrollo de una estrategia óptima de Instrumentación, ya que es necesario proporcionar buenas evaluaciones del comportamiento de la estructura con escasos recursos económicos.
- La experiencia de algunos especialistas en Instrumentación de estructuras permite estimar que el presupuesto destinado para instrumentar una estructura nueva oscila entre 0,1% y 1,5% del coste total de la construcción, dependiendo del tamaño de puente y los objetivos buscados. El aspecto

económico es importante para el desarrollo de una estrategia óptima de Instrumentación, ya que es necesario proporcionar buenas evaluaciones del comportamiento de la estructura con escasos recursos económicos.

CAPÍTULO III

ESTADÍSTICA APLICADA AL CONTROL DE PUENTES

“En la práctica, con la perspectiva adecuada, los datos pueden reutilizarse inteligentemente para convertirse en un manantial de innovación y servicios nuevos.

Los datos pueden revelar secretos a quienes tengan la humildad, el deseo y las herramientas para escuchar”

V. Mayer-Schönberger

En este Capítulo se describen los fundamentos teóricos del Control Estadístico y las Bandas de Predicción. La idea del Control Estadístico no es otra que proporcionar un control de la estabilidad del proceso medido y señalar los problemas cuya eliminación pueden reducir su variación y mejorar de manera permanente el sistema. La eliminación de dichos problemas conlleva el conocimiento del fenómeno físico-resistente estudiado. Esta idea es habitual en el ámbito de los procesos de fabricación y ese es precisamente el punto de vista que se adopta, el de la Instrumentación como proceso que genera datos.

Por su parte, las Bandas Predicción proporcionan una representación visual de la forma en la que la incertidumbre depende del valor de la variable independiente. Esta representación es fácilmente interpretable para el control del puente, de ahí su utilidad.

Se circunscribe finalmente el procedimiento en la gestión de puentes mediante las Cadenas de Markov, herramienta habitual en los Sistemas de Gestión de Puentes.

3.1. Introducción

Un proceso es un conjunto de actividades o acciones que transforman elementos de entrada en resultados.

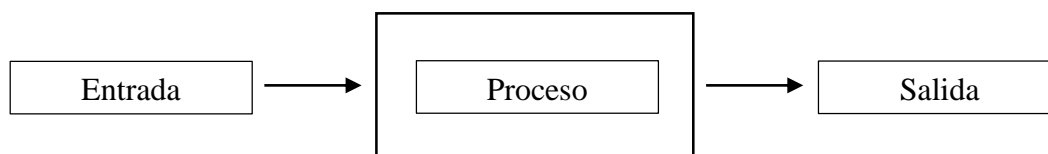


Figura 39. Procesos.

En el caso de la Instrumentación de un puente la entrada es la excitación o comportamiento del mismo frente a una acción. La salida es el dato de medición y, por lo tanto, el proceso que se estudia es el del esquema de Instrumentación que convierte la respuesta de la estructura en un dato útil representativo de un parámetro.

Como la conformidad del dato de salida no es evidente y necesita tratamiento estadístico se dice que el proceso es especial.

Las características esenciales de un proceso son:

- La variabilidad: nunca dos resultados son exactamente iguales.
- La repetitibilidad: a más repeticiones más experiencia.

Las causas de la variabilidad son:

- Causas comunes o aleatorias:
 - Pequeñas influencias incontrolables.
 - Suelen ser muchas y difíciles de eliminar.
 - Admiten una distribución estadística estable.
 - Define la capacidad de un proceso de cumplir con las tolerancias.
- Causas especiales:
 - Todas influyen de forma significativa.
 - Suelen ser pocas y fáciles de eliminar.
 - Presentan una distribución estadística errática.
 - Corrigiendo la causa se vuelve al estado de normalidad.

Por lo tanto, se puede decir que la reducción de la variabilidad significa mejorar, además del conocimiento del fenómeno observado, la calidad de la medición.

Al trazar una serie de datos medidos en un gráfico se observa que las medidas son objeto de variación. Dependiendo del tipo de variación se pueden considerar tres tipos básicos:

- Serie de ruido blanco: en este tipo de serie, la desviación de la media es estadísticamente independiente, es decir, es como si se obtuviera mediante un dibujo aleatorio de un gran conjunto de posibles desviaciones. (Se supone que este conjunto está descrito por una función de distribución teniendo de media cero y a menudo se asume que es una distribución normal). Una propiedad clave de las series de ruido blanco es que el orden en que se producen los datos no dice nada de la serie. Como consecuencia, los valores pasados de las series no sirven para predecir valores futuros.
- Serie estacionaria: representa un ruido correlacionado en el que una desviación de la media dada no es estadísticamente independiente de las desviaciones adyacentes. La dependencia estadística implica la probabilidad de que una desviación determinada depende de la magnitud de las otras. De este modo, las desviaciones positivas tienden a seguir, y a ser seguidas, por desviaciones positivas, y desviaciones negativas por desviaciones negativas. Normalmente, este tipo de series presentan una visible estacionalidad y, por lo tanto, son fáciles de filtrar entendiendo su significado físico. Son fácilmente controlables.
- Variaciones no estacionarias. Este tipo de series se produce frecuentemente en finanzas y economía. Es necesario considerarlas aquí porque muchos procesos deben estabilizarse usando control reactivo (filtrado). Tal control será necesario cuando el proceso se ve afectado por factores no controlables como la temperatura ambiente, por ejemplo. Ahora para designar un sistema de control reactivo eficiente necesitamos saber algo de la perturbación que estamos intentando controlar, para poder neutralizarla. Si el control es eficiente, la serie será una serie estacionaria como las anteriormente comentadas. Este tipo de series son difíciles de mantener bajo control.

Por otra parte, en todo proceso instrumentado se reúnen datos con el propósito de determinar la naturaleza de la relación entre, como mínimo, dos cantidades. Por consiguiente, se generan datos bivariados, es decir, un conjunto de pares ordenados $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$. En muchos casos, al graficar los pares ordenados que se generan se

encontrarán, aproximadamente, a lo largo de una línea recta. En estos casos los datos son potencialmente útiles para calcular la ecuación de una recta a partir de la cual se calculan las Bandas de Predicción.

En definitiva, se considera que son dos las herramientas estadísticas fundamentales para el análisis de los datos procedentes de la Instrumentación: el Control Estadístico de Calidad y los Modelos de Regresión Lineal. La primera de ellas para entender y justificar la robusted del fenómeno estudiado y, la segunda, para dotar de capacidad predictiva a los modelos calculados.

3.2. Control Estadístico de Calidad

Lo más representativo y por lo que se la conoce a la estadística de control son los Diagramas de Control. El principio básico de estos diagramas consiste en que en cualquier proceso hay siempre una variación de resultado. Parte de esa variación se deberá a causas inherentes al proceso y es muy difícil especificarlas. A estas causas se les llama causas comunes o probables. Cuando éstas son las únicas causas de la variación, se dice que el proceso está en un estado de control estadístico o en control.

Algunas veces se presentan factores especiales que producen mayor variabilidad que las causas comunes. A éstas se les denomina causas especiales o asignables. La temperatura y la humedad son causas especiales en los grandes puentes.

Los Diagramas de Control permiten decidir si un proceso parece estar en control, o si están presentes una o más causas especiales.

Existen diversos tipos de Diagramas de Control, el uso de determinado diagrama dependerá de si la característica de calidad que se midió es una variable continua, binaria o discreta.

A los Diagramas de Control utilizados para variables continuas se les denomina Diagramas de Control variables. Entre los ejemplos están el diagrama \bar{X} y el diagrama R y el diagrama S . A los Diagramas de Control utilizados para variables binarias o discretas se les llama Diagramas de Control de atributos. El diagrama P es el diagrama más utilizado para variables binarias, mientras que el diagrama C se utiliza para variables discretas.

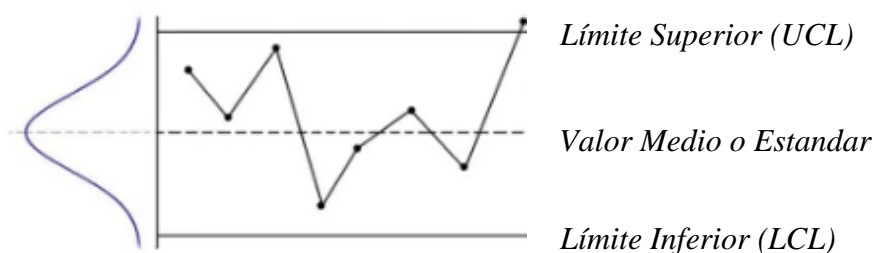


Figura 40. Aspecto general de un Diagrama de Control.

En general, el control del proceso a analizar debe realizarse continuamente en un proceso de seguimiento. Existen tres fases básicas en el uso de los Diagramas de Control. Primero, se reúnen los datos; después se grafican para determinar si el proceso está en control y, por último, una vez que el proceso está en control, se estima la capacidad. Un proceso que en un determinado momento está en control puede pasar a estar fuera de control posteriormente, conforme se vuelvan a presentar las causas especiales. Por esta razón debe darse seguimiento a los procesos continuamente.

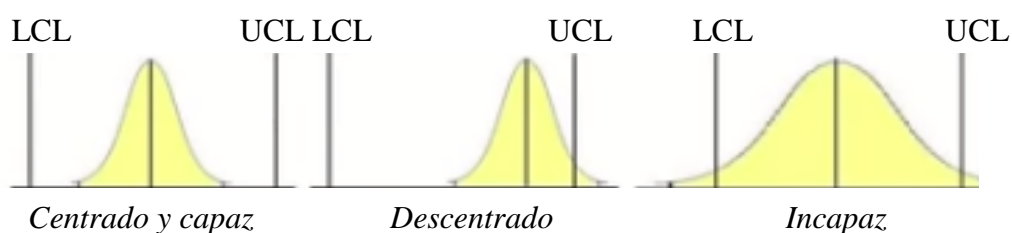


Figura 41. Capacidad y centrado. LCL, Límite Inferior; UCL, Límite Superior.

En este trabajo se propone filtrar previamente la influencia de las causas especiales con el fin de alcanzar un conocimiento profundo y riguroso del fenómeno estudiado como superposición de todas ellas (causas especiales y comunes).

3.3. Diagramas de Control para variables

3.3.1. Breve definición

Un diagrama de control es la representación gráfica de una serie de datos con respecto a la variable tiempo sobre la cual se representan un valor medio, un límite superior y un límite inferior constantes. Estas tres líneas horizontales, los límites de control, están dibujados de tal forma que cuando el proceso está en control, casi todos los puntos estarán

dentro de los límites. Un punto graficado fuera de los límites de control es una evidencia de que el proceso no está en control.

3.3.2. Tipos de diagramas

Cuando se realiza una medición de calidad en una escala de variables, a los datos se les conoce como datos de variables. Para estos datos, primero se utiliza un diagrama R o un diagrama S con el fin de controlar la variabilidad del proceso, y después se utiliza un diagrama \bar{X} para controlar la media del proceso.

Para definir si un proceso está bajo control estadístico debe trabajarse con datos cuya variabilidad dependa de causas comunes, no a causas especiales. Por consiguiente, en este caso una buena opción es extraer muestras de diversos paquetes, cada uno en intervalos regulares. Los paquetes en cada muestra serán producidos lo más próximos en el tiempo entre sí. De este modo las posibles variaciones especiales no afectarán a cada paquete de la muestra.

Cada muestra dada estará representada por su media muestral \bar{X} , su desviación estándar muestral s y su rango muestral R (diferencia entre el mayor y el menor). Entre todas las muestras se definirá la media de las muestras $\bar{\bar{X}}$, la media de los rangos muestrales \bar{R} y la media de las desviaciones estándar muestrales \bar{s} .

Se supone que cada una de las muestras constituye una muestra de una población normal con media μ y desviación estándar σ . A la cantidad μ se le llama media del proceso, y a σ desviación estándar del proceso. La idea detrás de los Diagramas de Control es que cada valor \bar{X} se aproxima a la media del proceso durante el tiempo en que se tomó la muestra, mientras que los valores de R y s se pueden utilizar para aproximar la desviación estándar muestral. Si el proceso está en control, entonces la media y la desviación estándar del proceso son iguales en cada muestra. Si el proceso está fuera de control, la media del proceso μ o la desviación estándar σ , o ambas, diferirán de muestra en muestra. Por tanto, los valores de \bar{X} , R o s excederá estos límites. Un Diagrama de Control grafica los valores de \bar{X} , R o s junto con los límites de control, de forma que puede verse muy fácilmente si la variación es lo bastante grande para concluir que el proceso está fuera de control.

Puesto que se supone que la variación dentro de cada muestra se debe solamente a causas comunes, esta variación no debe ser muy diferente de una a otra muestra. Por consiguiente, lo primero es comprobar para tener la certeza que la cantidad de la variación

dentro de cada muestra, ya sea medida por el rango muestral o desviación estándar muestral, no varía demasiado de una muestra a otra. Con este propósito se utiliza el diagrama S para calcular la variación de la desviación estándar muestral. Primero se estudiará el diagrama R , ya que es el más tradicional.

3.3.3. Diagrama R

El eje horizontal representa las muestras. Los rangos muestrales están graficados en el eje vertical. Las tres líneas horizontales son las más importantes. La recta en el centro del diagrama es el valor \bar{R} y se le llama recta central. Las rectas superior e inferior indican los límites de control 3σ superior e inferior (UCL y LCL , respectivamente).

Por lo tanto, en un diagrama R la recta central y los límites de control 3σ superior e inferior están dados por los valores $UCL = D_4 \bar{R}$ y $LCL = D_3 \bar{R}$. Los valores D_3 y D_4 dependen del tamaño de la muestra y se puede encontrar tabulado en [N].

Se puede demostrar mediante métodos avanzados que las cantidades $\mu_R \pm 3\sigma_R$ pueden estimarse con múltiplos de \bar{R} . Dichos múltiplos se representan con D_3 y D_4 .

Una vez se han calculado los límites de control y se han graficado los puntos, puede utilizarse el diagrama R para determinar si el proceso está en control con respecto a la variación. Cuando una muestra excede el límite superior evidencia que está operando una causa especial y que la variación del proceso no está en control. La acción apropiada es determinar la naturaleza de la causa especial, y después eliminar la muestra que no está en control y calcular de nuevo los límites.

3.3.4. Diagrama \bar{X}

Una vez puesta en control la variación del proceso, se puede determinar si la media del proceso está bajo control al dibujar el diagrama \bar{X} . Las medias muestrales se grafican en el eje vertical. Como en todos los Diagramas de Control, el diagrama \bar{X} tiene una recta central y límites de control superior e inferior.

Para calcular la recta central y los límites de control, se puede suponer que la desviación estándar del proceso es igual en todas las muestras, ya que se ha utilizado al diagrama R para que la variación del proceso esté en control. Si la media del proceso μ también está en control, entonces también es igual en todas las muestras. En ese caso, se extraen las medias muestrales de una población normal con media $\mu_{\bar{X}} = \mu$ y desviación estándar $\sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ donde n es el tamaño de la muestra. Idealmente se debería trazar la recta

central en μ y los límites de control 3σ en $\mu \pm 3\sigma_{\bar{X}}$. Sin embargo, con frecuencia no se conocen los valores de μ y $\sigma_{\bar{X}}$ y se debe estimar a partir de los datos. Se estima μ con $\bar{\bar{X}}$, el promedio de las medias muestrales. Por consiguiente, la recta central se ubica en $\bar{\bar{X}}$. La cantidad $\sigma_{\bar{X}}$ se puede estimar ya sea mediante el rango promedio \bar{R} o usando las desviaciones estándar muestrales.

Por lo tanto, en un diagrama \bar{X} cuando se utiliza \bar{R} para estimar $\sigma_{\bar{X}}$, la recta central y los límites de control 3σ superior e inferior están dados por los valores $UCL = \bar{\bar{X}} + A_2 \bar{R}$ y $LCL = \bar{\bar{X}} - A_2 \bar{R}$. El valor A_2 depende del tamaño de la muestra y se puede encontrar tabulado en [N].

Se puede demostrar mediante métodos avanzados que las cantidades $\mu_R \pm 3\sigma_R$ pueden estimarse como múltiplo de \bar{R} .

3.3.5. Funcionamiento del Diagrama de Control

Existe una estrecha conexión entre los Diagramas de Control y las pruebas de hipótesis. La hipótesis nula es que los procesos están en un estado de control. Un punto fuera de los límites de control 3σ representa una evidencia en contra de la hipótesis nula. Como en cualquier prueba de hipótesis, se puede cometer un error. Por ejemplo, ocasionalmente algún punto se encontrará fuera de los límites 3σ incluso cuando el proceso está en control. A esto se le llama falso negativo. También puede suceder que un proceso no está en control o no tenga algún punto fuera de los límites de control, en especial si no se observan durante un periodo suficientemente largo. A esto se le llama fallo de detección o falso positivo.

En 1956 los ingenieros de la compañía Western Electric [N] propusieron una lista de condiciones para demostrar que un proceso está fuera de control. La idea detrás de estas condiciones es que si en el Diagrama de Control persiste una tendencia o patrón durante un gran periodo, puede ser una señal de ausencia de control, incluso sin que ninguno de los puntos del diagrama estuviera fuera de los límites de control. Según Western Electric, cualquiera de las siguientes condiciones es prueba de que un proceso está fuera de control:

- Cualquier punto del diagrama fuera de los límites 3σ .
- Dos de tres puntos consecutivos del diagrama por arriba del límite superior 2σ , o dos de tres puntos consecutivos del diagrama por debajo del límite inferior 2σ .

- Cuatro de cinco puntos consecutivos del diagrama por arriba del límite superior σ , o cuatro de cinco puntos consecutivos del diagrama por debajo del límite inferior σ .
- Ocho puntos consecutivos del diagrama que estén del mismo lado que la recta central.

Es opinión del autor de este trabajo que para rechazar un punto o medida incluido en el Diagrama de Control es necesario tener tanto un conocimiento del proceso o fenómeno de estudio, como de los acontecimientos acontecidos en torno al dato sobre el que existe la discrepancia. Solamente desde la experiencia, tal y como les sucedió a los ingenieros de Western Electric, se pueden definir criterios de rechazo adecuados.

3.3.6. Diagrama S

Mientras que el diagrama R evalúa la variabilidad con el rango muestral el S utiliza la desviación estándar muestral. Por lo tanto, en un diagrama R la recta central y los límites de control 3σ superior e inferior están dados por los valores $UCL = B_4 \bar{s}$ y $LCL = B_3 \bar{s}$. Los valores B_3 y B_4 dependen del tamaño de la muestra y se puede encontrar tabulado en [N]..

Se puede demostrar mediante métodos avanzados que las cantidades $\mu_s \pm 3\sigma_s$ pueden estimarse con múltiplos de \bar{s} . Dichos múltiplos se representan con B_3 y B_4 .

3.3.7. Capacidad del proceso C

Convencionalmente, el valor mínimo aceptable para C es 1. Es decir, se considera que un proceso es mínimamente capaz si la media del proceso se encuentra a tres desviaciones estándar del límite de especificación más cercano. En general, se considera que un valor C de 1.33, el cual indica que la media del proceso está a cuatro desviaciones estándar del límite de especificación más cercano, es bueno.

El índice C es igual a $\frac{\hat{\mu} - LCL}{3\hat{\sigma}}$ o $\frac{UCL - \hat{\mu}}{3\hat{\sigma}}$ cualquiera que sea menor.

3.3.8. Conclusiones

Dependiendo del tipo de variable de que se trate se hace uso de un determinado tipo de Diagramas de Control. A los diagramas utilizados para variables continuas se les denomina Diagramas de Control de variables. Entre los ejemplos están el diagrama X y el diagrama R .

Una vez que se han calculado los límites de control y se han representado los puntos se podrá comprobar si la variable está en control con respecto a la variación (R) y el valor medio (X).

3.4. Regresión Lineal y Modelos de Predicción en Procesos Estocásticos

3.4.1. Introducción

Una de las primeras aplicaciones de la estadística consistió en estudiar la variación de las características físicas en poblaciones humanas. Con ese fin, los estadígrafos crearon un parámetro llamado coeficiente de correlación como forma de describir la relación tan cercana entre dos características físicas (x e y).

Supóngase, por lo tanto, la representación gráfica de una serie de pares ordenados (x e y). El grado en que los puntos tienden a agruparse alrededor de una recta que refleja la fuerza de la relación lineal entre las dos características medidas x e y . La impresión visual de una gráfica de puntos puede ser engañosa respecto de lo anterior, debido al cambio de escala de los ejes, lo que puede hacer que el agrupamiento parezca más junto o más disperso. En consecuencia, se define el coeficiente de correlación, que es una medida numérica de la fuerza de la relación lineal entre dos variable. Este coeficiente se denota como r .

En principio, el coeficiente de correlación se puede calcular para cualquier conjunto de puntos. Éstos, en muchos casos, constituyen una muestra aleatoria de una población de puntos. En dichos casos el coeficiente de correlación con frecuencia se llama correlación muestral y es una estimación de la correlación poblacional. La correlación muestral es útil en la construcción de intervalos de confianza y la realización de pruebas de hipótesis acerca de la correlación poblacional.

Es un hecho matemático que el coeficiente de correlación se encuentra siempre entre -1 y 1 . Valores positivos del coeficiente de correlación indican que la recta de mínimos cuadrados tiene pendiente positiva, ello significa que valores mayores de una variable están asociados con valores mayores que los demás. Por el contrario, valores negativos del coeficiente de correlación indican que la recta de mínimos cuadrados tiene pendiente negativa, lo anterior muestra que valores mayores de una variable están relacionados con valores menores que los demás. En este contexto, valores del coeficiente de correlación cercanos a 1 o -1 indican fuerte correlación lineal; así mismo, valores

cercanos a 0 indican débil relación lineal. En definitiva, si $r \neq 0$ se dice que x e y están correlacionados. Si $r=0$, se dice que x e y no están correlacionados.

3.4.2. Recta de mínimos cuadrados

Cuando dos variables tienen una relación lineal, el diagrama de dispersión tiende a estar agrupado alrededor de la recta de mínimos cuadrados. La recta vendrá definida por la ecuación $y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i$ donde y_i se llama variable dependiente, x_i se conoce como variable independiente, β_0 y β_1 son los coeficientes de regresión y ε_i es el error.

Si se prescinde del valor del error entonces se puede escribir la ecuación de la recta como

$$\widehat{\beta}_0 + \widehat{\beta}_1 x$$

donde $\widehat{\beta}_0$ y $\widehat{\beta}_1$ son los coeficientes de mínimos cuadrados.

El coeficiente $\widehat{\beta}_1$ representa la pendiente de la recta de mínimos cuadrados mientras que $\widehat{\beta}_0$ representa el intercepto de la recta.

La recta de mínimos cuadrados es la que mejor ajusta los datos. Para cada punto de datos (x_i, y_i) la distancia vertical al punto (x_i, \widehat{y}_i) en la recta de mínimos cuadrados es $e_i = y_i - \widehat{y}_i$ que se denomina residuo. A la cantidad \widehat{y}_i se denomina valor ajustado. El residuo e_i representa la diferencia entre el valor observado y_i en los datos y el pronosticado por la recta de mínimos cuadrados. La recta de mínimos cuadrados se define como aquella para la que la suma de cuadrados de los residuos $\sum_1^n e_i^2$ se minimiza. En este sentido, la recta de mínimos cuadrados ajusta mejor los datos que cualquier otra recta.

Para calcular la ecuación de la recta de mínimos cuadrados se deben determinar los valores para la pendiente $\widehat{\beta}_1$ y para el intercepto $\widehat{\beta}_0$ que minimizan la suma del residuo.

Para hacer esto primero se expresa e_i en función de $\widehat{\beta}_0$ y $\widehat{\beta}_1$:

$$e_i = y_i - \widehat{y}_i = y_i - \widehat{\beta}_0 - \widehat{\beta}_1 x$$

Por tanto, $\widehat{\beta}_0$ y $\widehat{\beta}_1$ son las cantidades que minimizan la suma $S = \sum_1^n e_i^2 = \sum_1^n (y_i - \widehat{\beta}_0 - \widehat{\beta}_1 x)^2$ estas cantidades son:

$$\widehat{\beta}_1 = \frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$\widehat{\beta}_0 = \bar{y} - \widehat{\beta}_1 \bar{x}$$

3.4.3. Inferencia sobre la respuesta media

Al utilizar \hat{y} para determinar un intervalo de confianza se debe conocer su desviación estándar. Esta última se obtiene mediante \hat{y} como una combinación lineal de los y_i .

Puesto que $\hat{y} = \widehat{\beta}_0 + \widehat{\beta}_1 x$ se tiene:

$$\hat{y} = \sum_1^n \left[\frac{1}{n} + (x - \bar{x}) \frac{x_i - \bar{x}}{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2} \right] y_i$$

Puesto que en la práctica no se conoce por lo general el valor de σ , se aproxima con s . La desviación estándar de \hat{y} es aproximada por:

$$s_{\hat{y}} = s \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}}$$

la cantidad $[\hat{y} - (\widehat{\beta}_0 + \widehat{\beta}_1 x)]/s_{\hat{y}}$ se tiene una distribución t de Student con $n-2$ grados de libertad.

En estas condiciones se puede proporcionar la expresión para un intervalo de confianza destinado a la respuesta media.

α es el llamado error aleatorio o Nivel de significación, esto es, una medida de las posibilidades de fallar en la estimación mediante tal intervalo. Por lo tanto, un intervalo con un Nivel de confianza de $100(1-\alpha)\%$ para la cantidad $\beta_0 + \beta_1 x_i$ está dado por:

$$\widehat{\beta}_0 + \widehat{\beta}_1 x \pm t_{n-2, \alpha/2} s_{\hat{y}} \text{ donde } s_{\hat{y}} = s \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}}$$

3.4.4. Bandas de Predicción para futuras observaciones

Supóngase que se quiere pronosticar un valor \hat{y}_i a partir de una recta de mínimos cuadrados conocida. Esta estimación requiere de un intervalo de predicción con el fin de determinar la incertidumbre en el pronóstico. El error en la predicción dada por \hat{y}_i representa el error de la predicción como

$$\hat{y}_i - [\widehat{\beta}_0 + \widehat{\beta}_1 x_i] - \varepsilon_i$$

La incertidumbre en la predicción es la desviación estándar de ese error de predicción. La cantidad $\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x$ es constante y no afecta a la desviación estándar. Las cantidades \hat{y}_i y ε son independientes, ya que \hat{y}_i se calcula de los datos mientras que ε no es parte de ese conjunto de datos. Ello da como resultado que la desviación estándar del error de predicción se aproxime por ahora se puede determinar la expresión apropiada para el intervalo de predicción:

$$s_{pred} = \sqrt{(s_{\hat{y}}^2 + s^2)}$$

Teniendo en cuenta que $s_{\hat{y}} = s \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x-\bar{x})^2}{\sum_1^n (x_i-\bar{x})^2}}$ resulta que un intervalo de predicción con un Nivel de 100 (1- α) % para la cantidad $\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x$ está dado por

$$\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_i \pm t_{n-2, \alpha/2} s_{pred} \quad \text{donde } s_{pred} = s \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x-\bar{x})^2}{\sum_1^n (x_i-\bar{x})^2}}$$

Tanto los intervalos de confianza como las Bandas de Predicción corresponden a un valor específico de x . Al calcular los intervalos para muchos valores de x y conectar los puntos con una curva suave se obtienen las bandas de confianza o Bandas de Predicción, respectivamente.

Las bandas de confianza y predicción proporcionan una representación visual agradable de la forma en la que la incertidumbre depende del valor de la variable independiente. Obsérvese que tanto el intervalo de confianza como el de predicción son más angostos cuando $x = \bar{x}$. Esto se debe al término $(x - \bar{x})^2$ que aparece en el numerador en las expresiones para $s_{\hat{y}}$ y s_{pred} . Se concluye que las predicciones basadas en la recta de mínimos cuadrados son más precisas cerca del centro del diagrama de dispersión y lo son menos cerca de los extremos.

Obsérvese que el intervalo de predicción es más amplio que el de confianza, porque el valor 1 se suma a la cantidad bajo la raíz cuadrada para considerar la incertidumbre adicional.

3.5. Predicción del deterioro

El deterioro de una estructura es un proceso asociado al concepto de entropía y, por lo tanto, se considera un proceso natural. Es por ello que la predicción del estado de conservación del puente o sus elementos con vista a la planificación y optimización de

las estrategias del mantenimiento se considera fundamental, más cuando se estudia una red de puentes.

Los costes de mantenimiento en una estructura son dependientes del momento en el que se desarrollen (tiempo) de tal manera que intervenir en momentos inadecuados puede tener consecuencias económicas importantes.

3.5.1. Modelos de deterioro o evolución

Los modelos de deterioro de los diferentes elementos estructurales del puente, o de los puentes, se pueden clasificar tal y como se indica a continuación:

- **Función del Ratio de Fallo:** una función de distribución de la vida de un elemento o estructura representa la incertidumbre sobre el tiempo de fallo de la misma. Si dicha función de distribución de probabilidad $F(t)$ tiene una función de densidad de probabilidad $f(t)$, la función del ratio de fallo $r(t)$ se define como:

$$r(t) = f(t)/(1-F(t))$$

Un modelo de estas características no es interesante en un entorno de gestión de estructuras puesto que solo es capaz de ofrecer un único dato, es decir, la probabilidad de fallo.

- **Modelo de deterioro o evolución basado en un Proceso Estocástico:** otra forma de tener en cuenta las incertidumbres en los procesos de deterioro dependientes del tiempo es considerarlo como un procedimiento estocástico. Normalmente los procesos estocásticos en modelización son del tipo Gaussiano y Gamma. Un proceso Gamma es un proceso estocástico con incrementos independientes, no negativos, representados por una función de distribución Gamma. Conceptualmente se ajusta bien al proceso de deterioro de una estructura que aumenta con el tiempo en una dirección, frente a otros como el Gaussiano en el que la resistencia de la estructura con el tiempo aumenta o disminuye alternativamente. Por lo tanto, se puede decir que si una variable está bajo control y responde a un modelo Gaussiano, es decir, no se identifica una tendencia, quiere decir que no hay anomalías o defectos. Sin embargo, cuando no responde a un modelo Gaussiano y existe una tendencia se debe profundizar en el estudio.
- **Modelo de deterioro basado en el índice de fiabilidad dependiente del tiempo:** según distintos autores, la mayoría de intervenciones depende fundamentalmente de una disminución de la capacidad portante del puente, más que de su estado de

conservación o Nivel de deterioro de elementos independientes del mismo. Muchos expertos opinan que la gestión basada en criterios de fiabilidad representa el futuro de los modelos de predicción en los Sistemas de Gestión de Puentes. Su principal ventaja es que se basa directamente en el índice de fiabilidad (o capacidad portante) del puente, lo que facilita en gran medida la adopción de criterios directos de intervención y vida útil. Por el contrario es un método complejo en el que los efectos de las intervenciones de mantenimiento son difíciles de implementar.

- Modelo de deterioro estocástico: de entre todos ellos (Cadenas de Markov a tiempo discreto, Martingalas, Procesos de Poisson y de renovación, Cadenas de Markov a tiempo continuo y Procesos de Colas, Movimiento Browniano y difusiones) se considera que para la gestión de puentes el modelo más adecuado es el procedente de las Cadenas de Markov que asumen que la condición de un elemento o estructura puede ser definida en términos de un número determinado de estados de conservación, de tal forma que la condición del siguiente estado o intervalo solo depende de la condición del estado anterior y de la acción a realizar, y de ninguna otra variable más, incluido el tiempo. Unas probabilidades de transición enlazan el estado actual con una determinada intervención o Nivel de mantenimiento con un estado futuro y pueden ser entendidas como el ratio de deterioro del elemento. La probabilidad de transición se define como la probabilidad de que un determinado componente estructural cambie de un estado de conservación a otro, dependiendo de la acción de mantenimiento. Su gran ventaja es que expresa sus predicciones de la misma forma en la que normalmente se realizan las inspecciones en una estructura, ya que al estar basado en unos determinados estados de conservación es fácilmente adaptable a los datos procedentes de una inspección visual y permite incorporar nuevas inspecciones. El modelo de deterioro markoviano es el más utilizado entre los sistemas de gestión de puentes tipo PONTIS o BRIDGIT. También es utilizado como modelo de predicción en la mayoría de los sistemas de gestión de pavimentos. El sistema PONTIS utiliza la programación lineal markoviana para optimizar la estrategia de costes de mantenimiento de conjuntos de elementos comunes de los puentes, por eso, en este trabajo se usa este tipo de modelo.

3.6. Resumen

- Los procedimientos adecuados para analizar una serie de datos, así como para interpretar los resultados, vienen condicionados por tres características

básicas de deseable cumplimiento [BP]. Estas características son: la estacionalidad, la periodicidad y la normalidad de los datos.

- La estacionalidad busca entender la variable medida como un ruido correlacionado debido a que los parámetros que se estudian responden a un fenómeno físico.
- Interesa conocer la periodicidad tanto de las causas especiales como de las ocultas. La Función de Autocorrelación es una herramienta matemática utilizada frecuentemente en el procesado de señales y ayuda a descubrir señales enmascaradas bajo el ruido o a identificar la frecuencia fundamental de una señal que no contiene dicha componente, pero aparecen numerosas frecuencias armónicas de ésta. Con la Función de Autocorrelación se comprueba la periodicidad de los datos estudiados.
- Normalidad: cuando la variable medida se ajusta a una distribución Gaussiana quiere decir que no hay incrementos solo positivos o negativos sino que aumentan o disminuyen alternativamente, y que solo depende de una variable.
- En esta Tesis se propone la Estadística de Control como mejora para el control de los parámetros medidos frente a los Test de Estacionalidad convencionales.
- Para saber si el comportamiento de un puente está bajo control, o no, es necesario analizar los datos una vez descontados los efectos procedentes de variables principales, como por ejemplo la temperatura. De este modo, se puede distinguir la influencia de la variable principal en la medida y, por otro, la parte inherente o no justificable de la misma.
- Por lo tanto, saber si una variable está bajo control o no realmente significa saber si la parte inherente o no justificable está bajo control o, por el contrario, existe una tendencia o deriva.
- Finalmente, solo cuando se tiene la certeza de que la variable está bajo control se procede a analizar series de pares ordenados (x e y , por ejemplo) y medir numéricamente la fuerza de la relación lineal entre ellas.
- Una propiedad importante del coeficiente de correlación es que permanece constante al multiplicar cada valor de una variable por una constante

positiva, al sumar una constante a cada valor de una variable y se pueden intercambiar los valores de x e y .

- Los datos atípicos son los datos apartados del cuerpo principal de los datos. Estos datos se pueden corregir o eliminar adecuadamente. Interpretar los datos atípicos puede ser difícil porque hay pocas reglas fáciles de seguir.
- La correlación no es causalidad. La correlación entre dos variables representa la capacidad de una variable (dependiente) de ser explicada por la otra (independiente).
- Cuando la fuerza de la relación demuestra la existencia de un modelo suficientemente robusto se procede a la definición de las Bandas de Predicción para futuras observaciones mediante inferencia estadística sobre la respuesta media.
- Los estimadores no son lo mismo que los valores verdaderos: los valores verdaderos son constantes cuyos valores no se conocen. Los estimadores son cantidades que se calculan a partir de datos. Se utilizan los estimadores como aproximaciones de los valores verdaderos.
- Los residuos no son lo mismo que los errores: cada residuo e_i es la diferencia $y_i - \hat{y}_i$ entre el valor observado, o valor medido, el valor y_i y el valor ajustado calculado por la recta de mínimos cuadrados.

$$\hat{y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x$$

- Las extrapolaciones fuera del rango de datos no ofrecen garantías de que se siga conservando la linealidad en la correlación
- La recta de mínimos cuadrados solo se ajusta bien a los datos que presentan cierta tendencia lineal o en el caso de lo no lineales a los que se les ha aplicado un proceso de transformación de variable.
- El modelo de deterioro markoviano, a nivel de red, es el más utilizado entre los Sistemas de Gestión de Puentes tipo PONTIS o BRIDGIT. También es utilizado como modelo de predicción en la mayoría de los sistemas de gestión de pavimentos. El sistema PONTIS utiliza la programación lineal markoviana para optimizar la estrategia de costes de mantenimiento de conjuntos de elementos comunes de los puentes.

CAPÍTULO IV

APLICACIONES PRÁCTICAS: PUENTE “INFIERNILLO 0” Y PUENTE “EL BELTRÁN”

“La física no ha encontrado líneas rectas, sólo ha encontrado ondas; la Física no ha encontrado sólidos, solo campos de acontecimientos de alta frecuencia”.

Richard Buckminster Fuller

En este Capítulo se presentan los resultados del seguimiento de la Instrumentación procedente de dos puentes singulares en México que fueron desarrollados por el autor de esta Tesis. En cada uno de ellos se perseguían unos objetivos bien definidos. En el caso del Puente “Infiernillo 0” se trataba de controlar la evolución del giro de su pila central mientras que en el caso del Puente “El Beltrán” se trataba de dotar herramientas para el posterior control del puente a partir de la Instrumentación, y de la validación de los coeficientes de deslizamiento garantizados por los fabricantes de los aparatos de apoyo tipo POT existentes.

4.1. Puente “Infiernillo 0”

4.1.1. Antecedentes

En una de las inspecciones realizadas en el puente Infiernillo 0, en el km 251+500, Carretera Federal de Cuota “Patzcuaro-Lázaro Cárdenas”, en el Estado de Michoacán, en México, se detectó una notable inclinación de la pila central del tramo metálico. Esa inclinación se produjo, según los conservadores de la estructura, tras una de las descargas

del embalse Infiernillo, situado aguas arriba del puente, cuya avenida provocó un giro importante en la pila. Entre las decisiones tomadas para corregir el deterioro del puente, se determinó la Instrumentación del puente en tanto se adoptaban las medidas necesarias para su corrección.

El trabajo de Instrumentación, tratamiento y análisis fue desarrollado por el autor de esta Tesis en el año 2013.

El seguimiento del puente comenzó en julio de 2013 y un mes después se produjo en México la llegada del huracán Ingrid, que fue el segundo huracán de la temporada de huracanes del 2013 y el más destructivo, aunque no fue el más intenso. Ingrid se desarrolló a partir de la Depresión Tropical Diez, formada el día 12 de septiembre.

Durante los días 15 y 16 de septiembre, Ingrid en convergencia con el Huracán Manuel en el océano Pacífico, provocaron lluvias intensas en 22 de los 32 estados de la república mexicana, dejando a su paso más de 200.000 damnificados y 157 muertos al menos a su paso.

Entre los días 20 y 22 de septiembre los huracanes Ingrid y Manuel vuelven a tomar tierra provocando más lluvias y daños.

El fenómeno conocido como Ingrid-Manuel fue la segunda ocasión en que dos fenómenos de este tipo interactuaban y asolaban de esta forma México. Es por ello que el fenómeno está entre los más costosos mortíferos de la historia del país.

Sin embargo, para el puente objeto de seguimiento la situación crítica se produjo cuando el embalse localizado aguas arriba comenzó a desaguar y no se consiguió estabilizar la lámina de flujo hasta comenzado el mes de noviembre.

4.1.2. Descripción

El puente Infiernillo 0 combina un tramo de vanos de vigas de hormigón y dos arcos superiores alcanzando una longitud total de 359.02 m ($25.42+25.84+26.60+2x101.65+26.60+25.84+25.42$).

APIA XXI fue el encargado de la Instrumentación para controlar los movimientos y saber si el giro evolucionaba, se había estabilizado o tendía a reducirse ofreciendo, en caso necesario, un proyecto de rehabilitación.

Se colocaron transductores de desplazamiento en extremos tablero-pila y tablero-estribo, acelerómetros, clinómetros y sensores de temperatura.

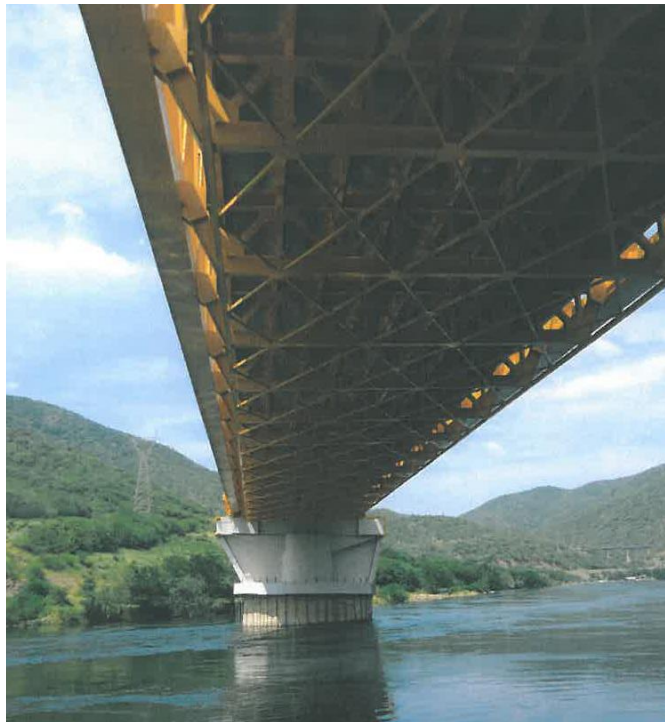


Figura 42. Vista de la pila inclinada desde el Estribo 1.

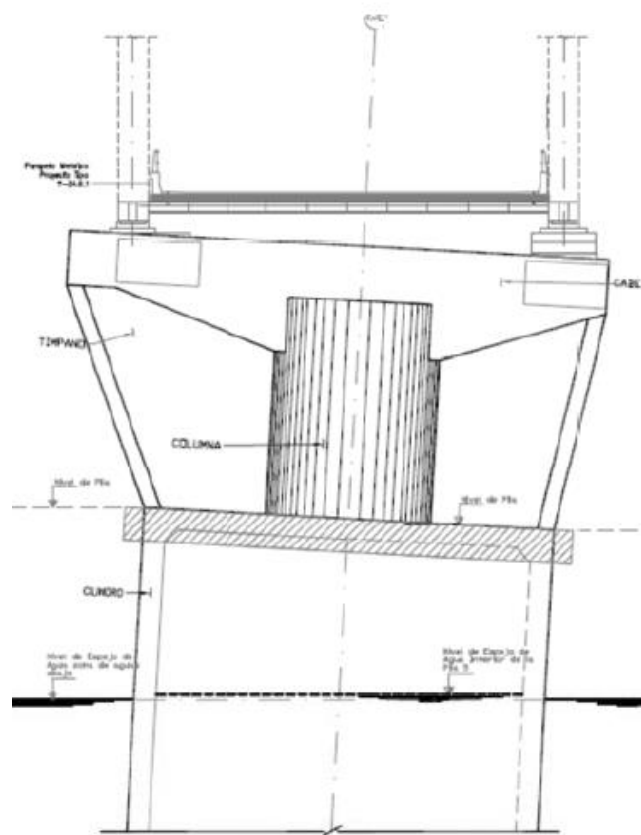


Figura 43. Croquis de la pila inclinada desde el Estribo 1. Cortesía de Ineco.

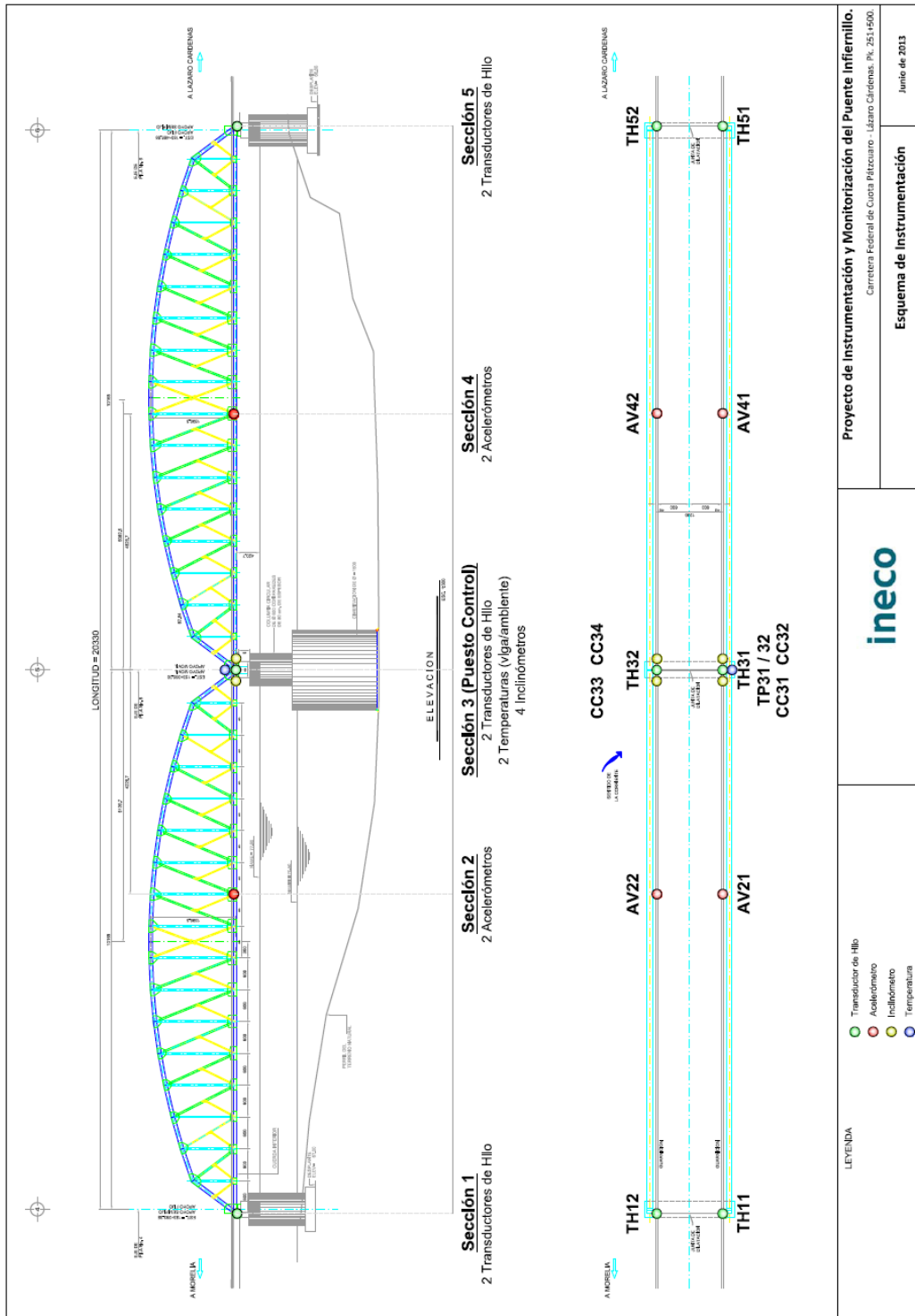


Figura 44. Esquema de Instrumentación. Cortesía de Ineco.

Se analizó el comportamiento de la pila inclinada, pila nº5 del puente, durante un año pudiéndose distinguir los siguientes hitos:

- 10/07/2013: día tipo en el cual el Nivel de la presa era mínimo.
- 20/09/2013: día de temporal bajo los efectos de los huracanes Manuel e Ingrid y la presa desaguando.
- 22/09/2013: los huracanes Manuel e Ingrid vuelven a tomar tierra (se reactiva el temporal) y la presa, en máximos Niveles de embalse, continúa desaguando.
- 26/09/2013: los huracanes remiten pero la presa continúa desaguando. No se ha alcanzado la estabilidad del flujo de agua.
- 1/11/2013: se alcanza la estabilidad de flujo.



*Figura 46. Aspecto del cauce aguas arriba del puente. Foto tomada por Apia XXI
IMC 17/05/2013.*



*Figura 47. Aspecto del cauce aguas arriba del puente. Foto tomada por Apia XXI
IMC el 21/09/2013.*



Figura 48. Nivel aproximado mínimo y máximo. Foto tomada por Apia XXI IMC los días 17/05/2013 y 21/09/2013.



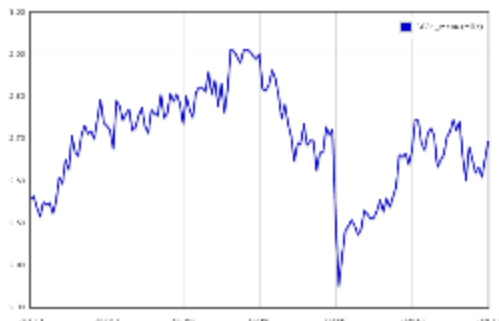
Figura 49. Flujo del río aguas abajo de la pila n°5. Foto tomada por Apia XXI IMC el 17/05/2013.



Figura 50. Turbulencias desarrolladas aguas abajo de la pila n°5. Foto tomada por Apia XXI IMC el 21/09/2013.

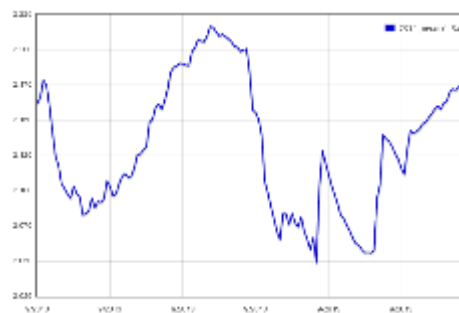
4.1.3. Comparativa de los giros en un día tipo (10/07/2013), en dos días de temporal (20/09/2013 y 22/09/2013) y un día una vez pasado el temporal (26/09/2013)

4.1.3.1. CC31. Longitudinal aguas abajo



Rango día 10/07/2013= 0.50 mRad

Medio día 10/07/2013= 2.60 mRad



Rango día 20/09/2013= 0.20 mRad

Medio día 20/09/2013= 2.10 mRad



Rango día 22/09/2013= 0.35 mRad

Medio día 22/09/2013= 2.15 mRad



Rango día 26/09/2013= 0.10 mRad

Medio día 26/09/2013= 2.80 mRad

Figura 51. Giro longitudinal aguas abajo.

CC31 representa el clinómetro que mide el giro longitudinal aguas abajo.

De la observación directa de las gráficas se puede decir que los valores medios no sufrieron variaciones significativas.

Los rangos (diferencia entre el máximo y el mínimo valor medio a lo largo del día) parecen mantenerse estables.

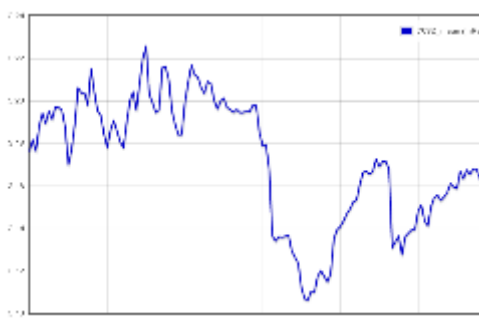
Analizando más profundamente se podría decir que durante los días de temporal los valores medios fueron ligeramente inferiores a los de los días de mayor estabilidad.

4.1.3.2. CC32. Transversal aguas abajo



Rango día 10/07/2013= 0.20 mRad

Medio día 10/07/2013= 3.15 mRad



Rango día 20/09/2013= 0.12 mRad

Medio día 20/09/2013= 3.16 mRad



Rango día 22/09/2013= 0.12 mRad

Medio día 22/09/2013= 3.24 mRad



Rango día 26/09/2013= 0.12 mRad

Medio día 26/09/2013= 3.34 mRad

Figura 52. Giro transversal aguas abajo.

CC32 representa el clinómetro que mide el giro transversal aguas abajo.

De la observación directa de las gráficas se puede decir que los valores medios no sufrieron variaciones significativas.

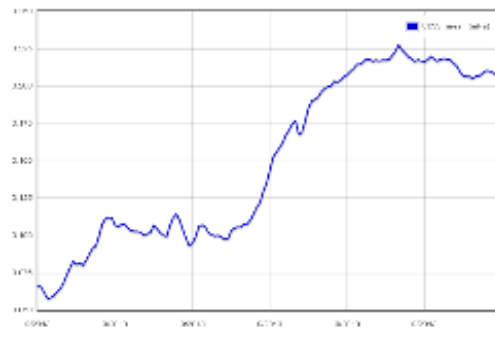
Los rangos (diferencia entre el máximo y el mínimo valor medio a lo largo del día) parecen mantenerse estables o incluso reducirse.

4.1.3.3. CC33. Longitudinal aguas arriba



Rango día 10/07/2013= 1.00 mRad

Medio día 10/07/2013= 4.90 mRad



Rango día 20/09/2013= 0.25 mRad

Medio día 20/09/2013= 3.15 mRad



Rango día 22/09/2013= 0.25 mRad

Medio día 22/09/2013= 3.15 mRad



Rango día 26/09/2013= 0.40 mRad

Medio día 26/09/2013= 3.00 mRad

Figura 53. Giro longitudinal aguas arriba.

CC33 representa el clinómetro que mide el giro longitudinal aguas arriba.

De la observación directa de las gráficas se puede decir que los valores medios parecen haberse reducido.

Los rangos (diferencia entre el máximo y el mínimo valor medio a lo largo del día) parecen mantenerse estables o incluso reducirse.

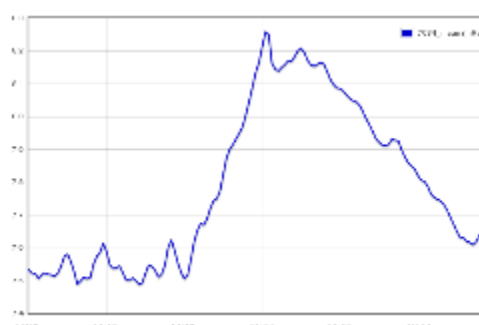
Analizando más profundamente se podría decir que durante los días de temporal los valores medios son ligeramente inferiores a los de los días de mayor estabilidad. Lo mismo sucede con los rangos.

4.1.3.4. CC34. Transversal aguas arriba



Rango día 10/07/2013= 1.00 mRad

Medio día 10/07/2013= 7.70 mRad



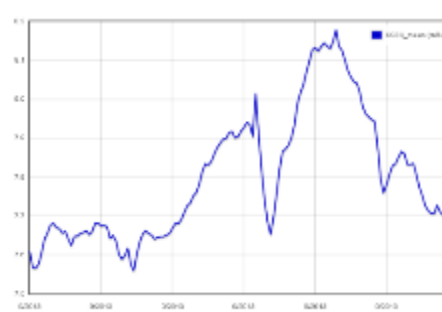
Rango día 20/09/2013= 0.80 mRad

Medio día 20/09/2013= 7.80 mRad



Rango día 22/09/2013= 0.70 mRad

Medio día 22/09/2013= 7.75 mRad



Rango día 26/09/2013= 0.80 mRad

Medio día 26/09/2013= 7.80 mRad

Figura 54. Giro transversal aguas arriba.

CC34 representa el clinómetro que mide el giro transversal aguas abajo.

De la observación directa de las gráficas se puede decir que los valores medios parecen mantenerse.

Los rangos (diferencia entre el máximo y el mínimo valor medio a lo largo del día) parecen mantenerse estables o incluso reducirse.

4.1.3.5. Conclusiones parciales

Los valores medios de los giros no sufrieron ningún tipo de aumento ni evolución. Parece que se mantuvieron sensiblemente estables y que se podrían justificar desde el punto de vista térmico.

A pesar de lo turbulento del flujo y las esperables socavaciones en cimentación no parece que, aun habiéndose producido, haya tenido consecuencias en la inclinación de la pila.

4.1.4. Control Estadístico

4.1.4.1. CC31. Longitudinal aguas abajo

La siguiente gráfica recoge los valores máximos, mínimos y medios del giro CC31.

No se observa una tendencia destacable en el valor medio ni en los valores máximos y mínimos.

Lo que sí se aprecia es una variación de los valores máximos y mínimos en los días correspondientes al temporal y una posterior recuperación hacia los valores previos al temporal.

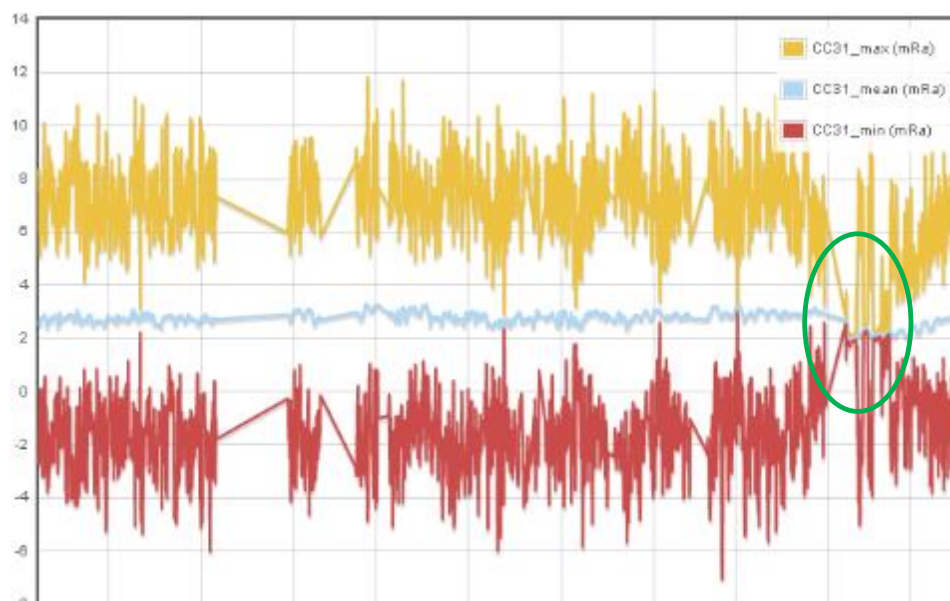


Figura 55. Registros CC31_max, CC31_mean, CC31_min.

En las siguientes gráficas se analiza la evolución de esos valores máximos y mínimos.

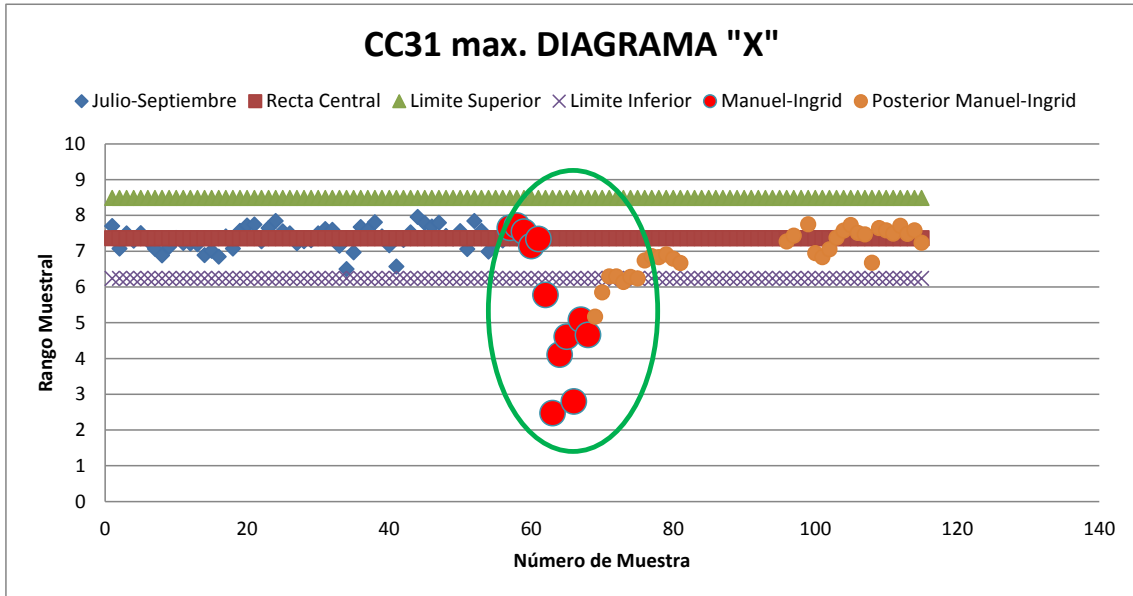


Figura 56. Diagrama X. CC31_max (mRad). Capacidad del Proceso (C)=1.

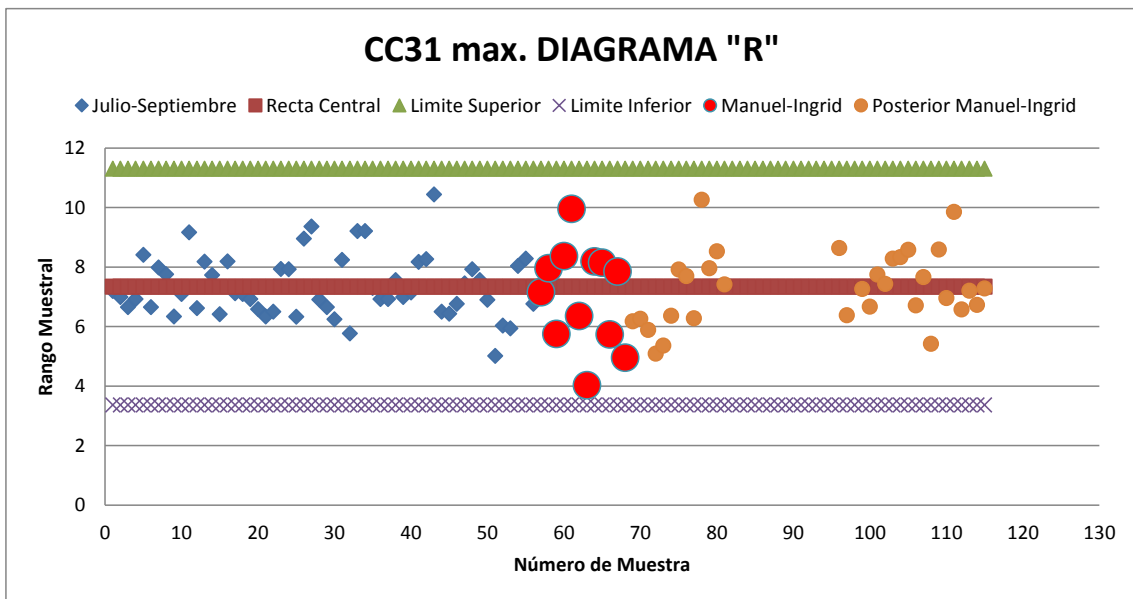


Figura 57. Diagrama R. CC31_max (mRad). Capacidad del Proceso (C)=1.

Cada muestra indicada en la gráfica, cada punto, representa un día. Hasta principios del mes de Septiembre, hasta la muestra 60 prácticamente, los valores máximos estaban controlados variando entorno a un valor medio. Los días 17, 18, 19 y 20 de septiembre (puntos rojos en círculo verde) presentan valores máximos que superan los límites esperados y, por lo tanto, la situación del giro está fuera de control. Posteriormente parece que se vuelven a estabilizar y se recupera la situación de control inicial.

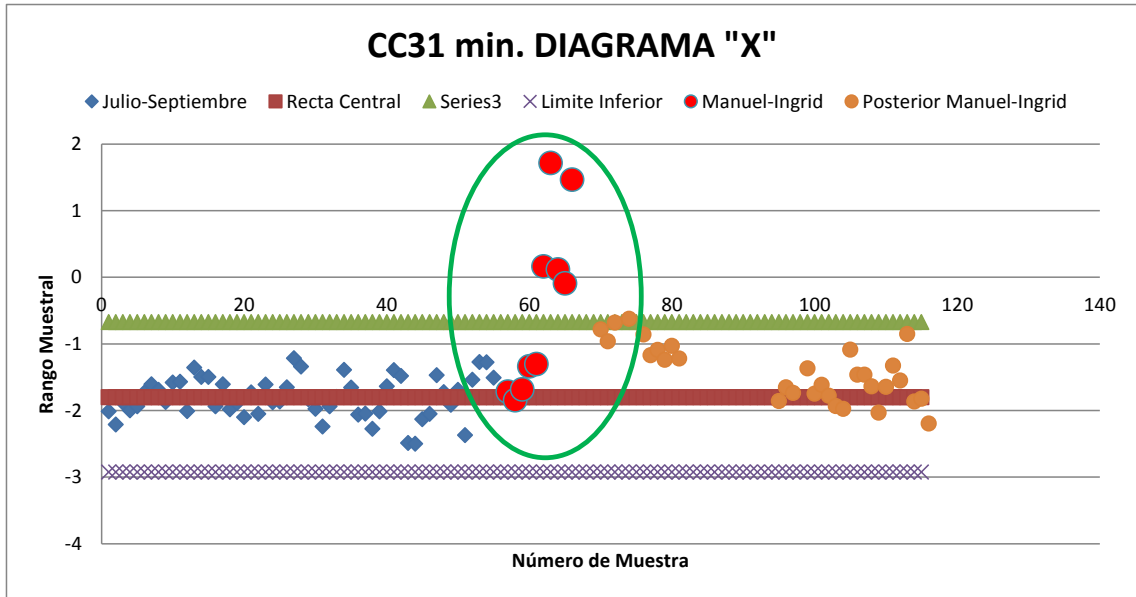


Figura 58. Diagrama X. CC31_min (mRad). Capacidad del Proceso (C)=1.

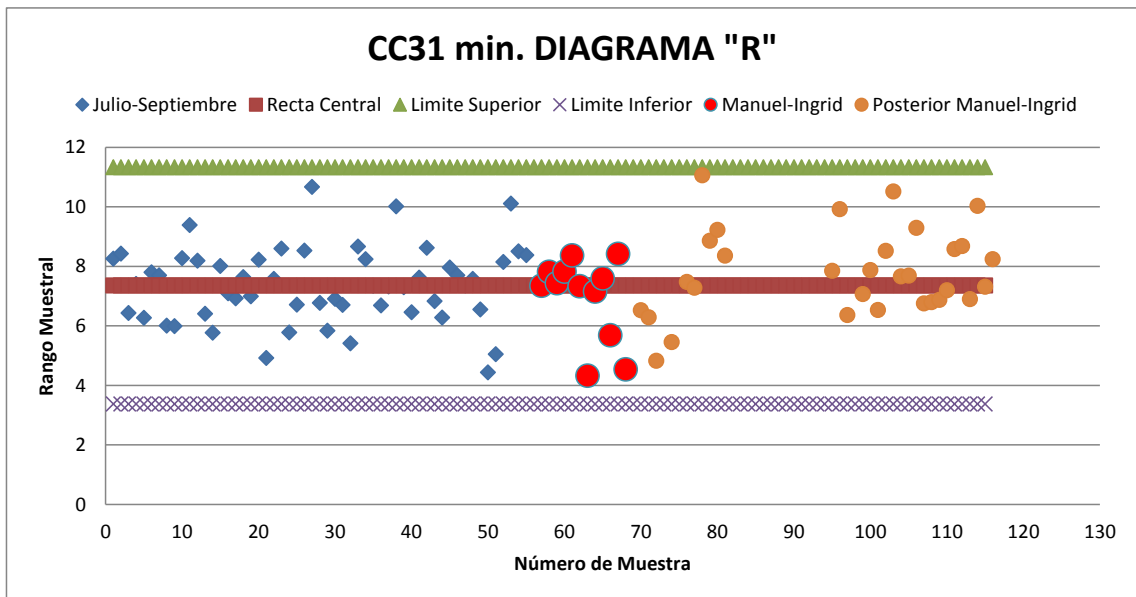


Figura 59. Diagrama R. CC31_min (mRad). Capacidad del Proceso (C)=1.

Lo mismo se observa una vez analizados los valores mínimos.

4.1.4.2. CC32. Transversal aguas abajo

La siguiente gráfica recoge los valores máximos, mínimos y medios del giro CC32.

No se observa una tendencia destacable en el valor medio ni en los valores máximos y mínimos.

Lo que sí se aprecia es una variación de los valores máximos y mínimos en los días correspondientes al temporal y una posterior recuperación hacia los valores previos al temporal.

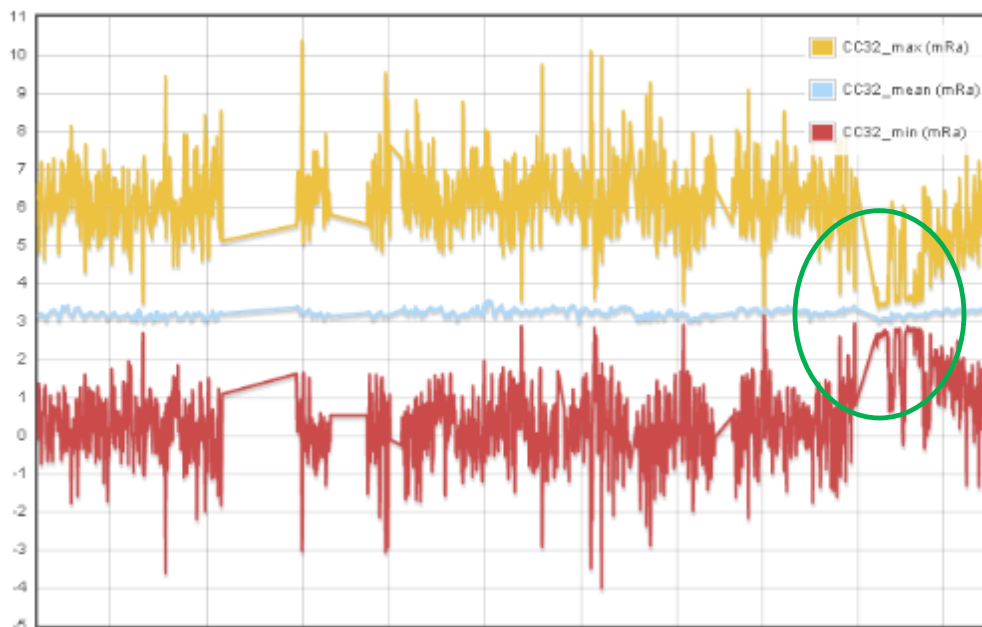


Figura 60. Registros CC32_max, CC32_mean, CC32_min.

En las siguientes gráficas se analiza la evolución de esos valores máximos y mínimos.

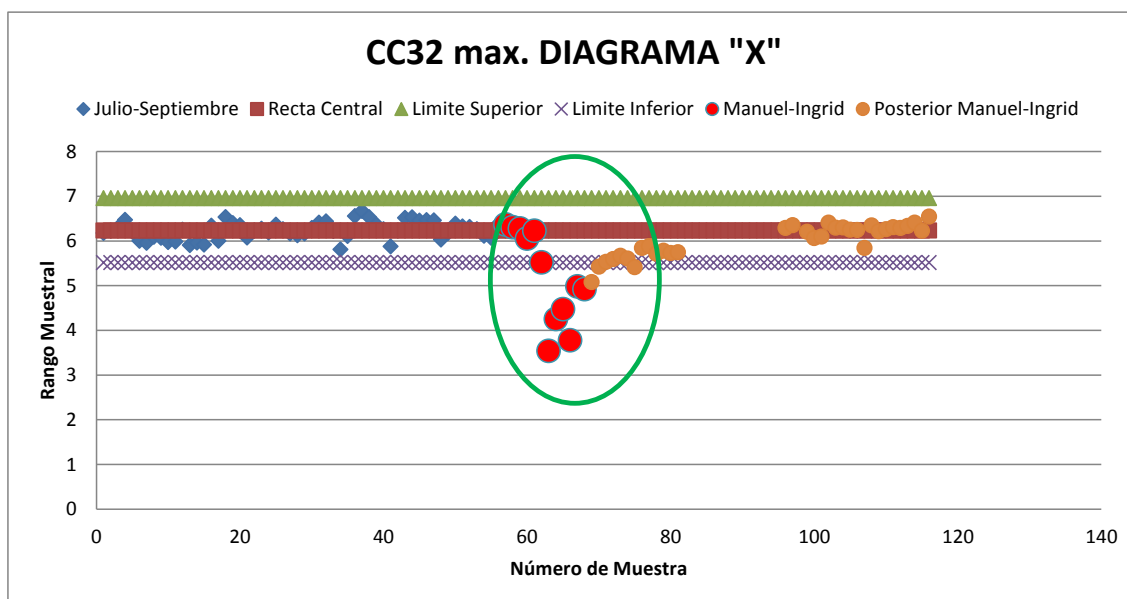


Figura 61. Diagrama X. CC32_max (mRad). Capacidad del Proceso (C)=1.

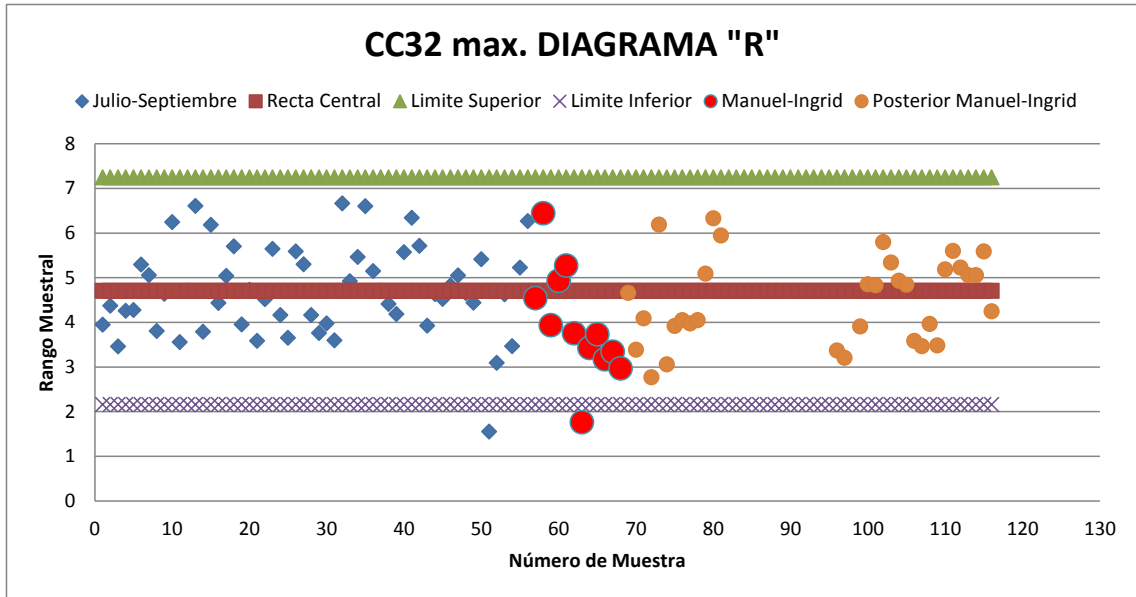


Figura 62. Diagrama R. CC32_max (mRad). Capacidad del Proceso (C)=1.

Cada muestra indicada en la gráfica, cada punto, representa un día. Hasta principios del mes de Septiembre, hasta la muestra 60 prácticamente, los valores máximos estaban controlados variando entorno a un valor medio. Los días 17, 18, 19 y 20 de septiembre (puntos rojos en círculo verde) presentan valores máximos que superan los límites esperados y, por lo tanto, la situación del giro está fuera de control. Posteriormente parece que se vuelven a estabilizar y se recupera la situación de control inicial.

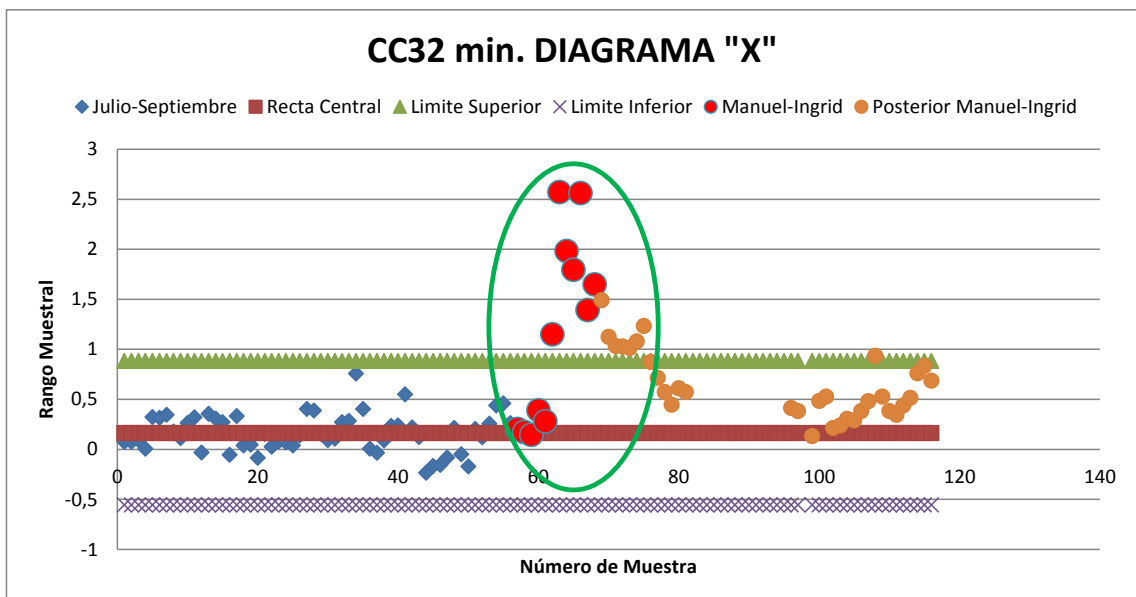


Figura 63. Diagrama X. CC32_min (mRad). Capacidad del Proceso (C)=1.

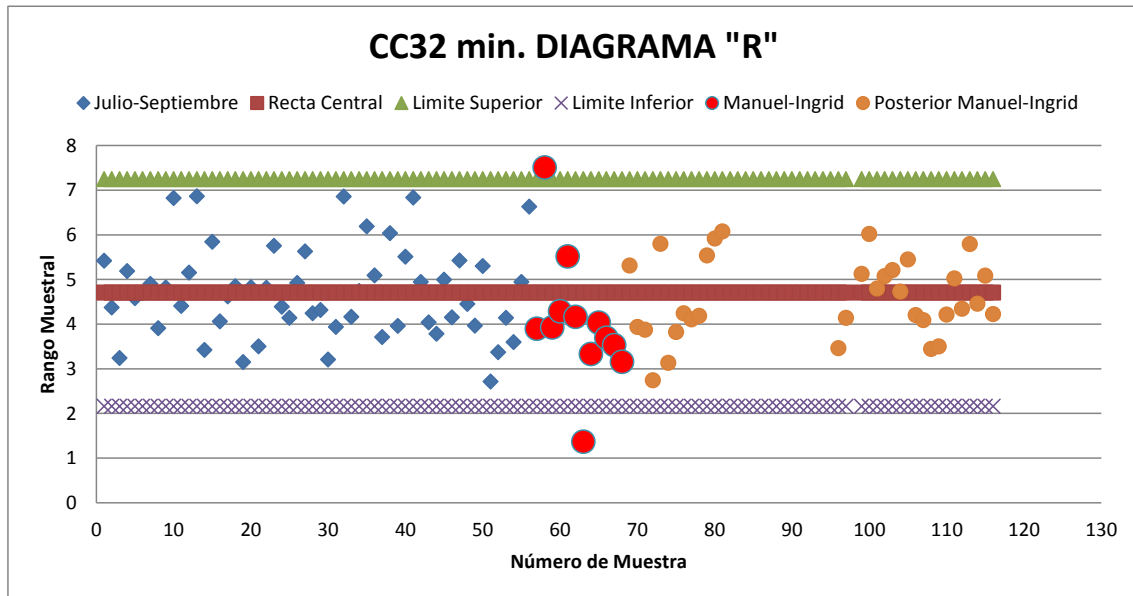


Figura 64. Diagrama R. CC32_min (mRad). Capacidad del Proceso (C)=1.

Lo mismo se observa una vez analizados los valores mínimos.

4.1.4.3. CC33. Longitudinal aguas arriba

La siguiente gráfica recoge los valores máximos, mínimos y medios del giro CC33.

No se observa una tendencia destacable en el valor medio ni en los valores máximos y mínimos.

Lo que sí se aprecia es una variación de los valores máximos y mínimos en los días correspondientes al temporal y una posterior recuperación hacia los valores previos al temporal.

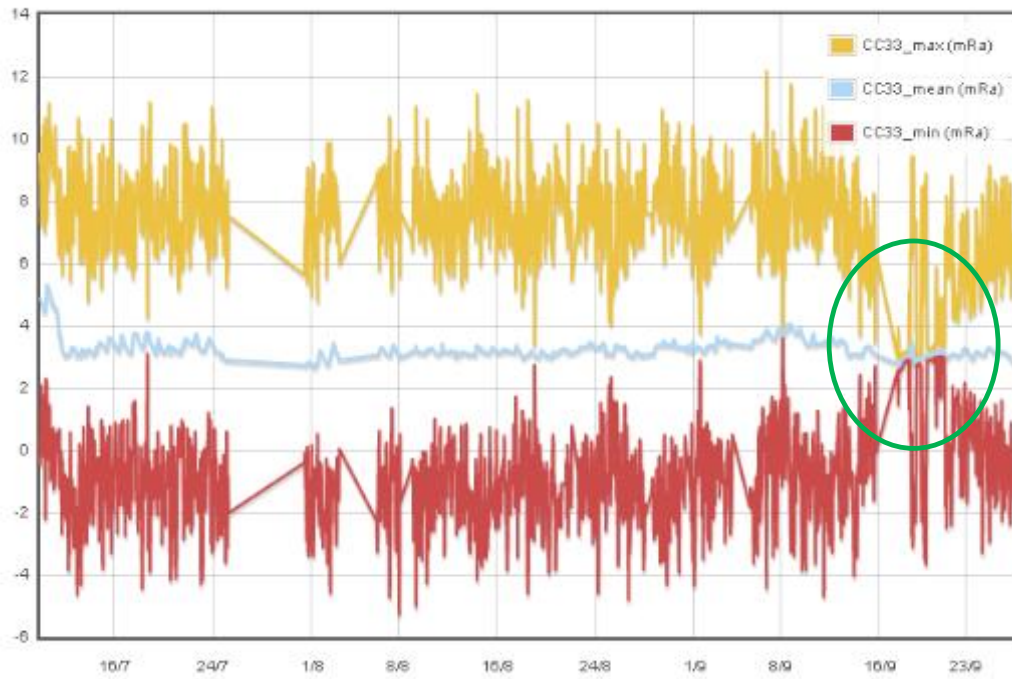


Figura 65. Registros CC33_max, CC33_mean, CC33_min.

En las siguientes gráficas se analiza la evolución de esos valores máximos y mínimos.

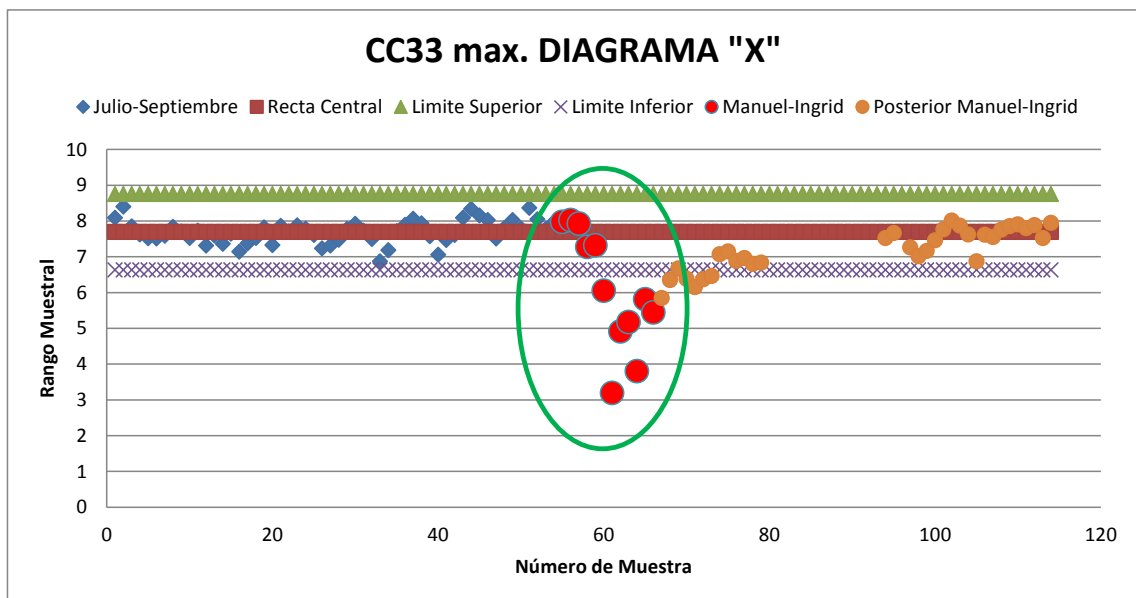


Figura 66. Diagrama X. CC33_max (mRad). Capacidad del Proceso (C)=1.

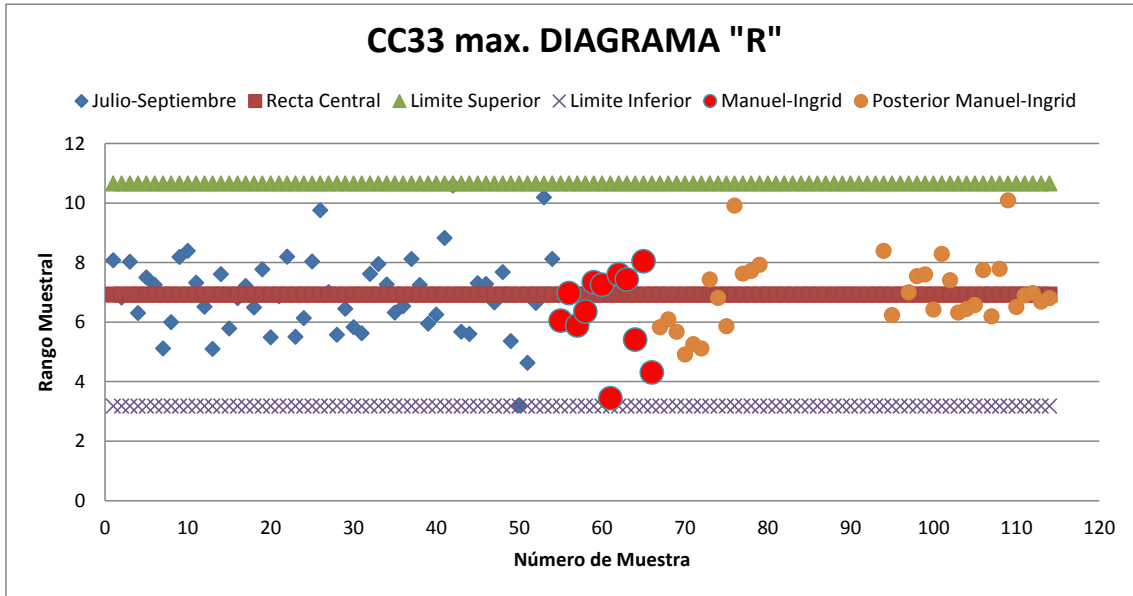


Figura 67. Diagrama R. CC33_max (mRad). Capacidad del Proceso (C)=1.

Cada muestra indicada en la gráfica, cada punto, representa un día. Hasta principios del mes de Septiembre, hasta la muestra 60 prácticamente, los valores máximos estaban controlados variando entorno a un valor medio. Los días 17, 18, 19 y 20 de septiembre (puntos rojos en círculo verde) presentan valores máximos que superan los límites esperados y, por lo tanto, la situación del giro está fuera de control. Posteriormente parece que se vuelven a estabilizar y se recupera la situación de control inicial.

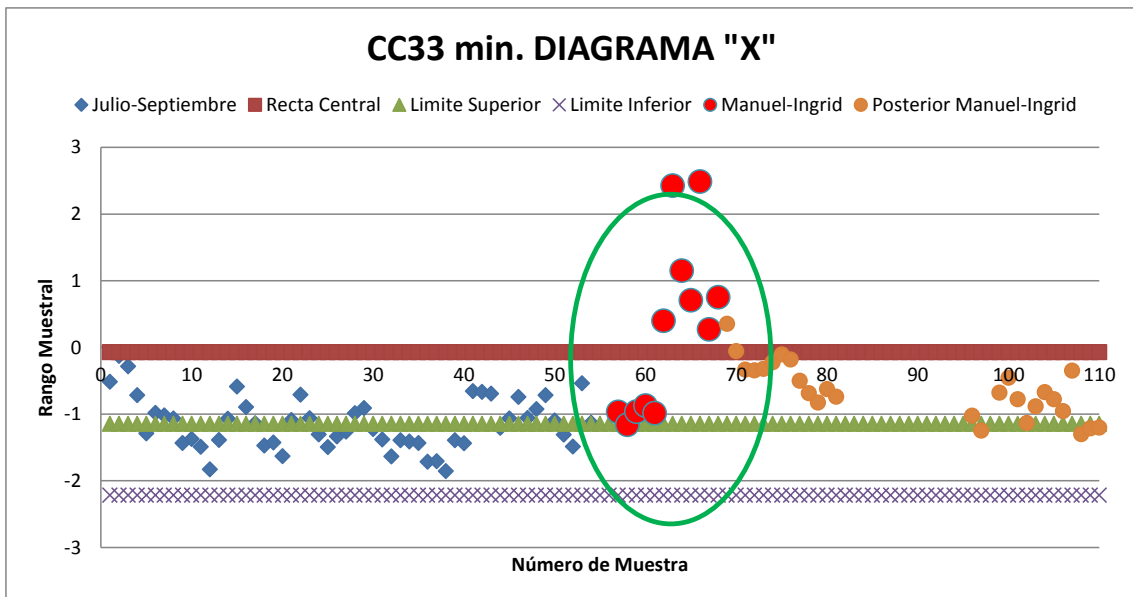


Figura 68. Diagrama X. CC31_min (mRad). Capacidad del Proceso (C)=1.

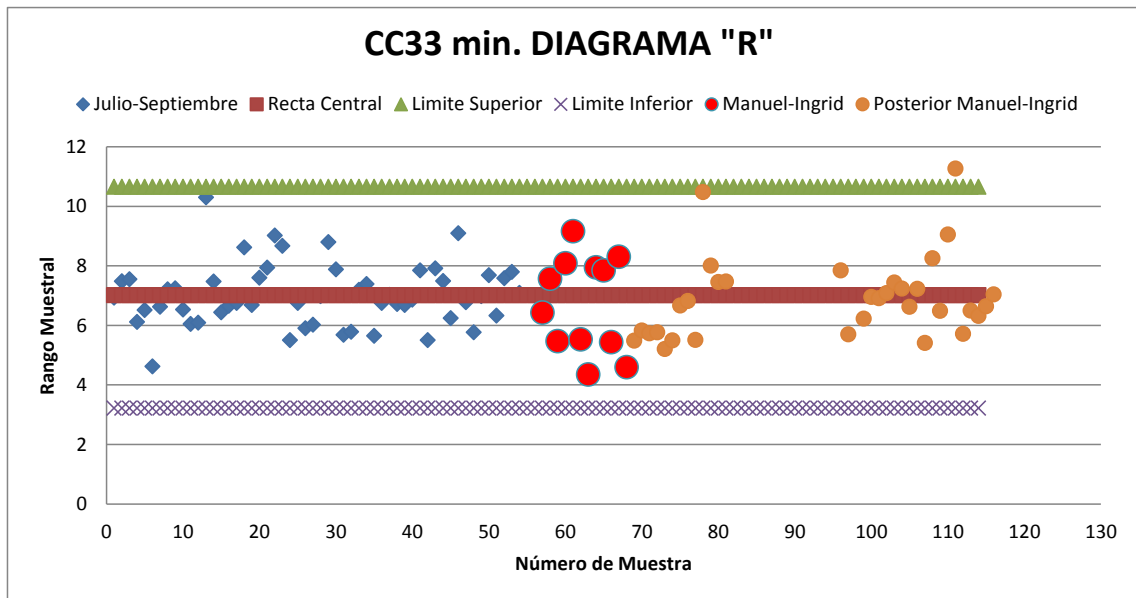


Figura 69. Diagrama X. CC33_min (mRad). Capacidad del Proceso (C)=1.

Lo mismo se observa una vez analizados los valores mínimos.

4.1.4.4. CC34. Transversal aguas arriba

La siguiente gráfica recoge los valores máximos, mínimos y medios del giro CC34.

No se observa una tendencia destacable en el valor medio ni en los valores máximos y mínimos.

Lo que sí se aprecia es una variación de los valores máximos y mínimos en los días correspondientes al temporal y una posterior recuperación hacia los valores previos al temporal.

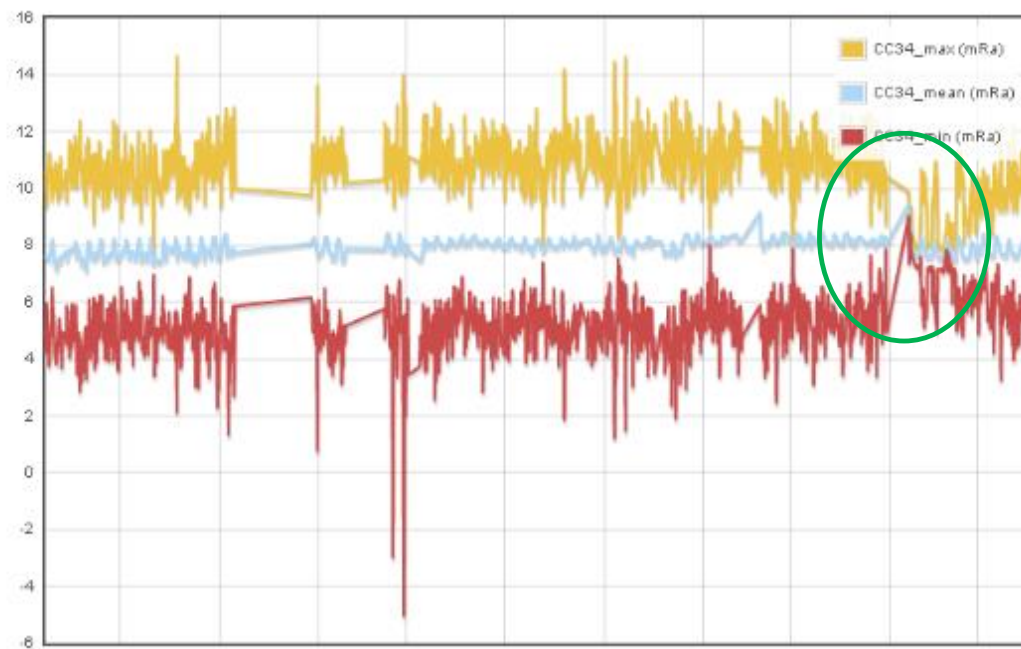


Figura 70. Registros CC34_max, CC34_mean, CC34_min.

En las siguientes gráficas se analiza la evolución de esos valores máximos y mínimos.

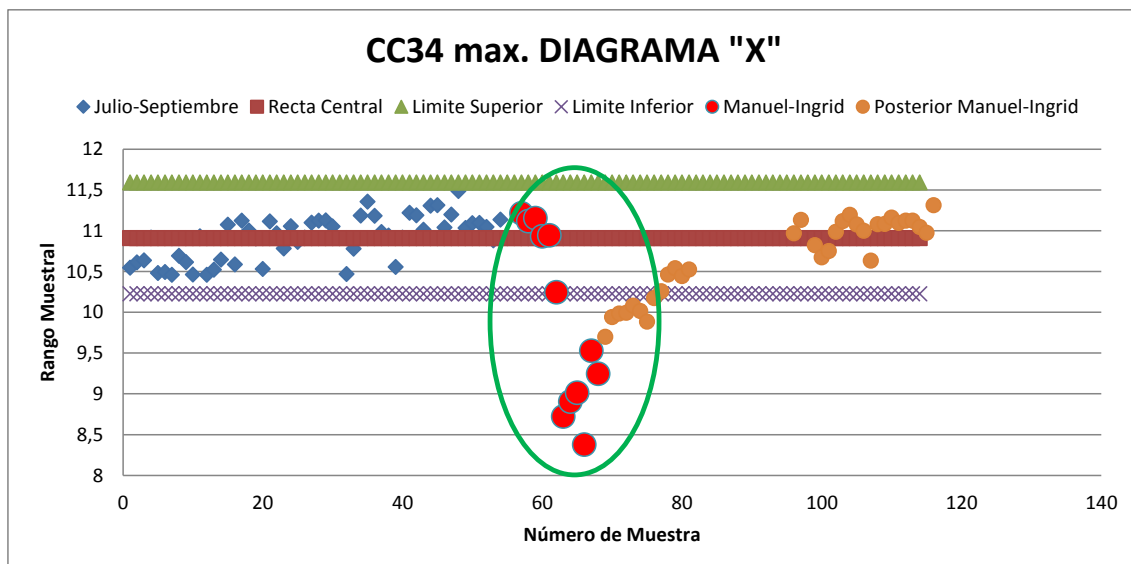


Figura 71. Diagrama X. CC34_max (mRad). Capacidad del Proceso (C)=1.

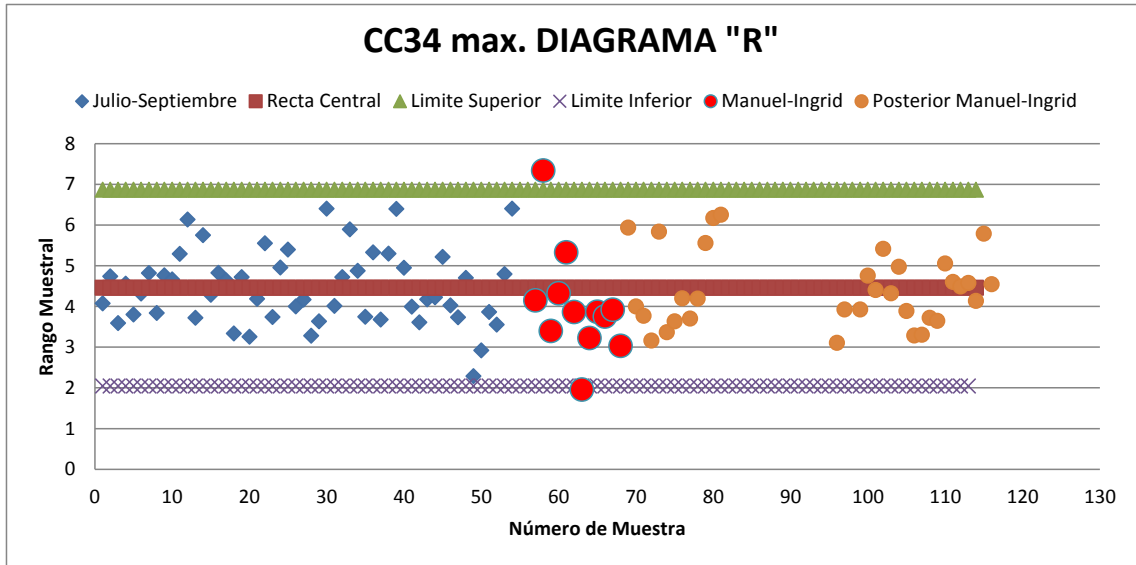


Figura 72. Diagrama R. CC34_max (mRad). Capacidad del Proceso (C)=1.

Cada muestra indicada en la gráfica, cada punto, representa un día. Hasta principios del mes de Septiembre, hasta la muestra 60 prácticamente, los valores máximos estaban controlados variando entorno a un valor medio. Los días 17, 18, 19 y 20 de septiembre (puntos rojos en círculo verde) presentan valores máximos que superan los límites esperados y, por lo tanto, la situación del giro está fuera de control. Posteriormente parece que se vuelven a estabilizar y se recupera la situación de control inicial.

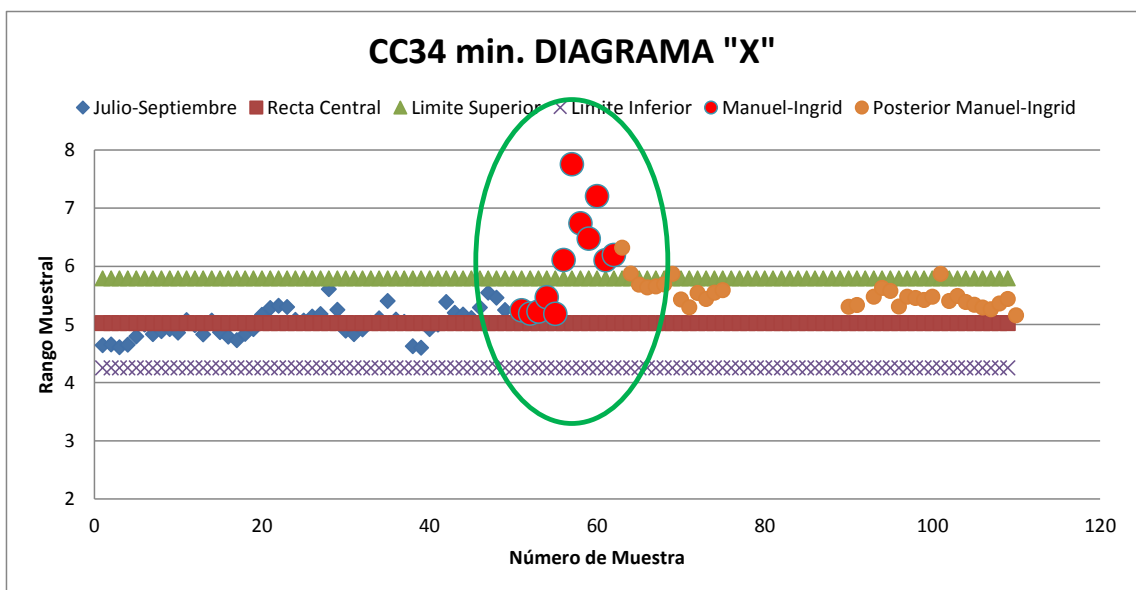


Figura 73. Diagrama X. CC34_min (mRad). Capacidad del Proceso (C)=1.

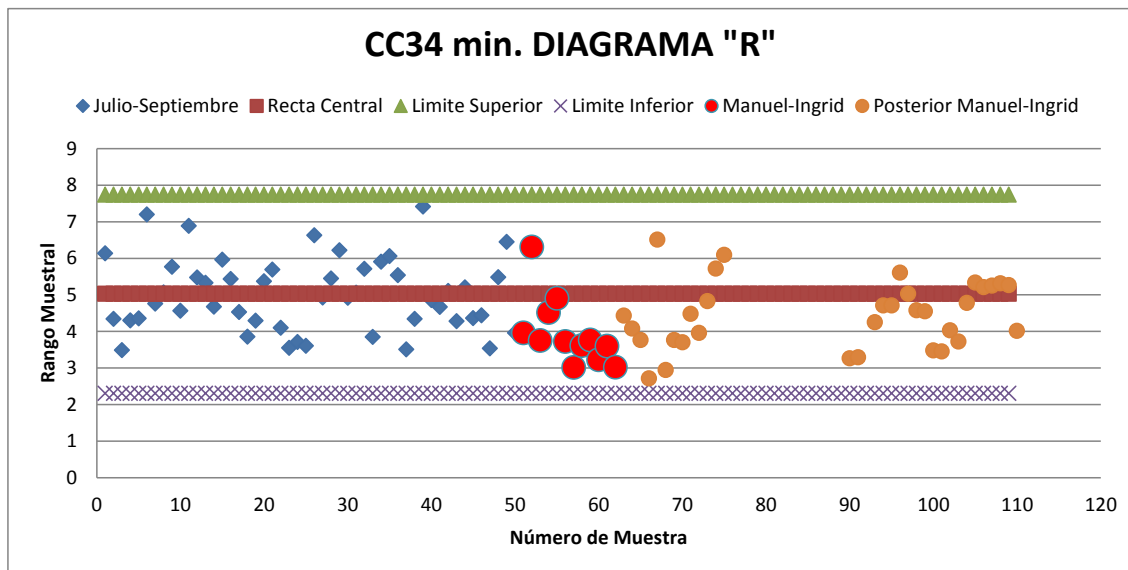


Figura 74. Diagrama R. CC34_min (mRad). Capacidad del Proceso (C)=1.

Lo mismo se observa una vez analizados los valores mínimos.

4.1.5. Predicciones en futuras observaciones. Bandas de Predicción del giro transversal medio diario

4.1.5.1. CC32

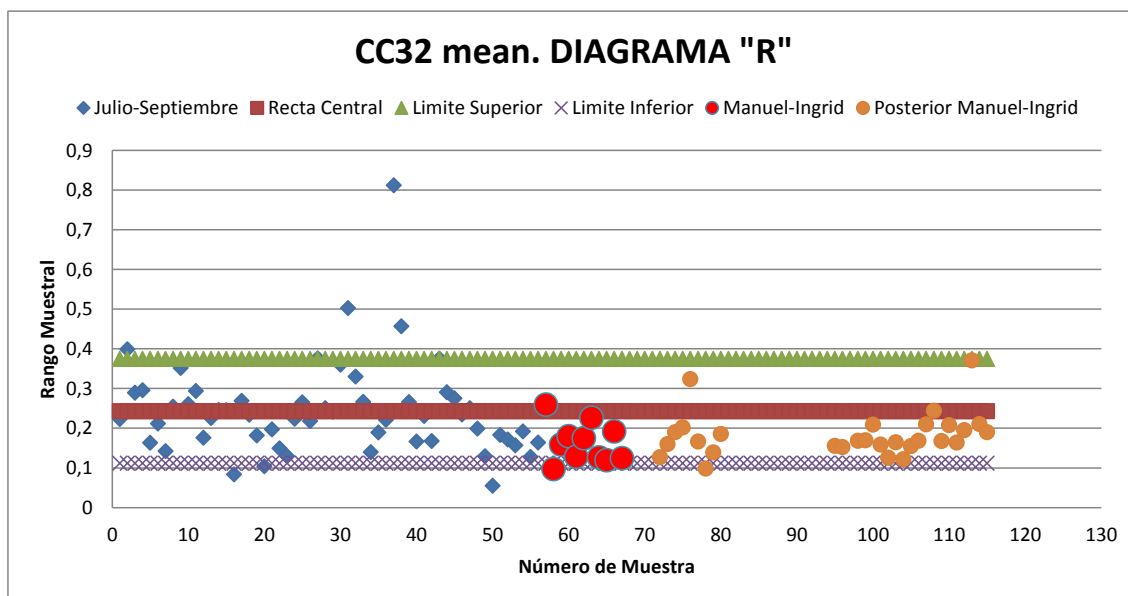


Figura 75. Diagrama X. CC32_mean. Capacidad del Proceso (C)=1.

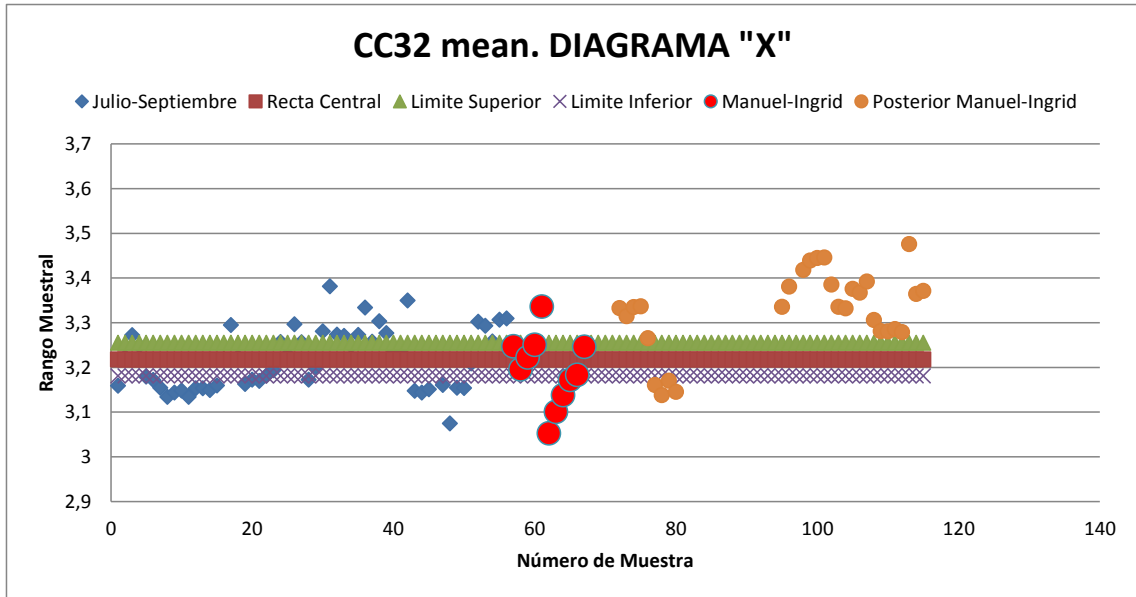


Figura 76. Diagrama X. CC32_mean. Capacidad del Proceso (C)=1.

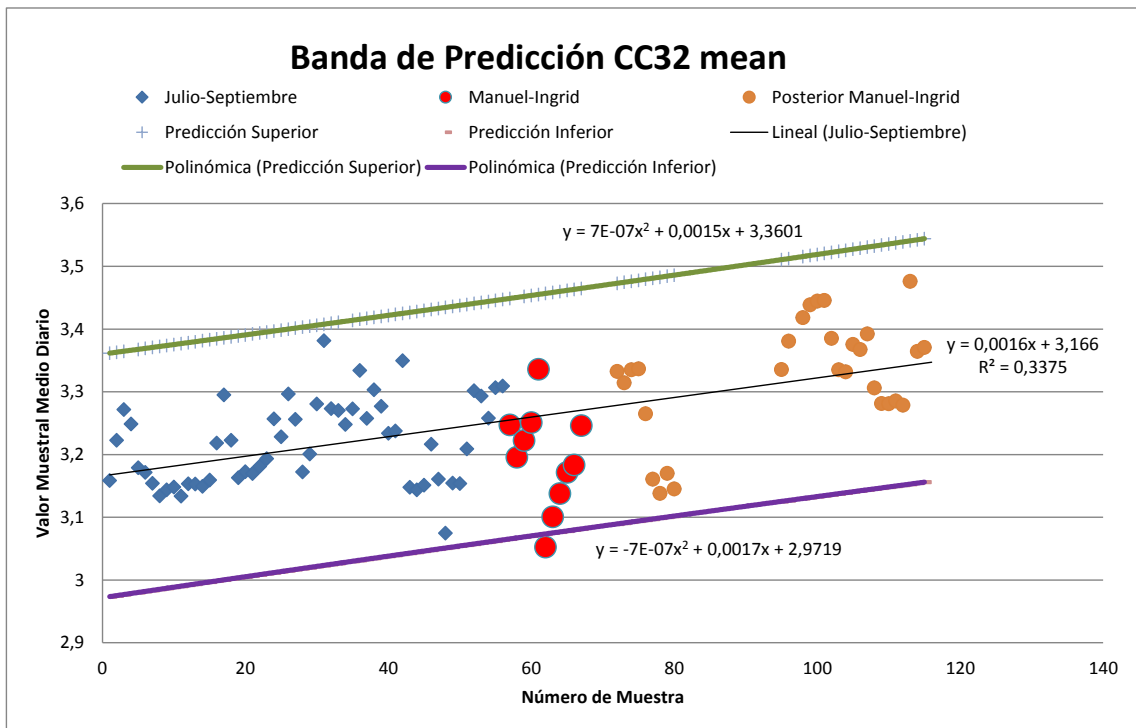


Figura 77. Banda de predicción CC32_mean.

Se observa la existencia de una tendencia en el giro transversal medio de la pila hacia aguas arriba, Figura 76. De este modo durante los días de desagüe de la presa la pila tendió a reducir su inclinación por efecto del empuje del agua porque el empuje se oponía

a su inclinación creciente. Una vez reducido el nivel del agua y los empujes sobre la pila, ésta vuelve a cabecear hacia aguas arriba.

4.1.5.2. CC34

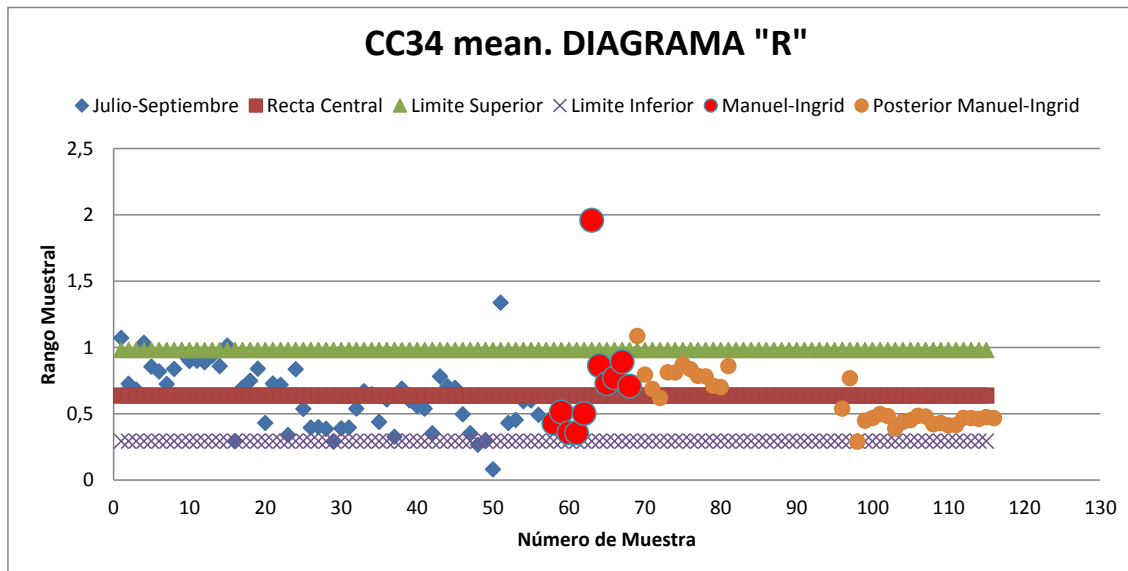


Figura 78. Diagrama R. CC34_mean. Capacidad del Proceso (C)=1.

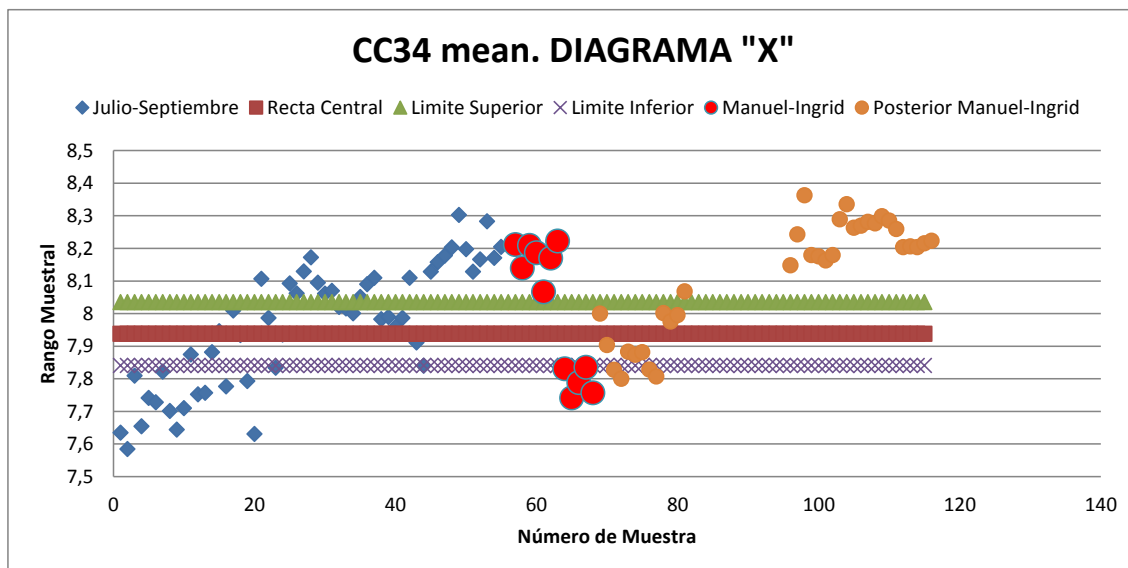


Figura 79. Diagrama X. CC34_mean. Capacidad del Proceso (C)=1.

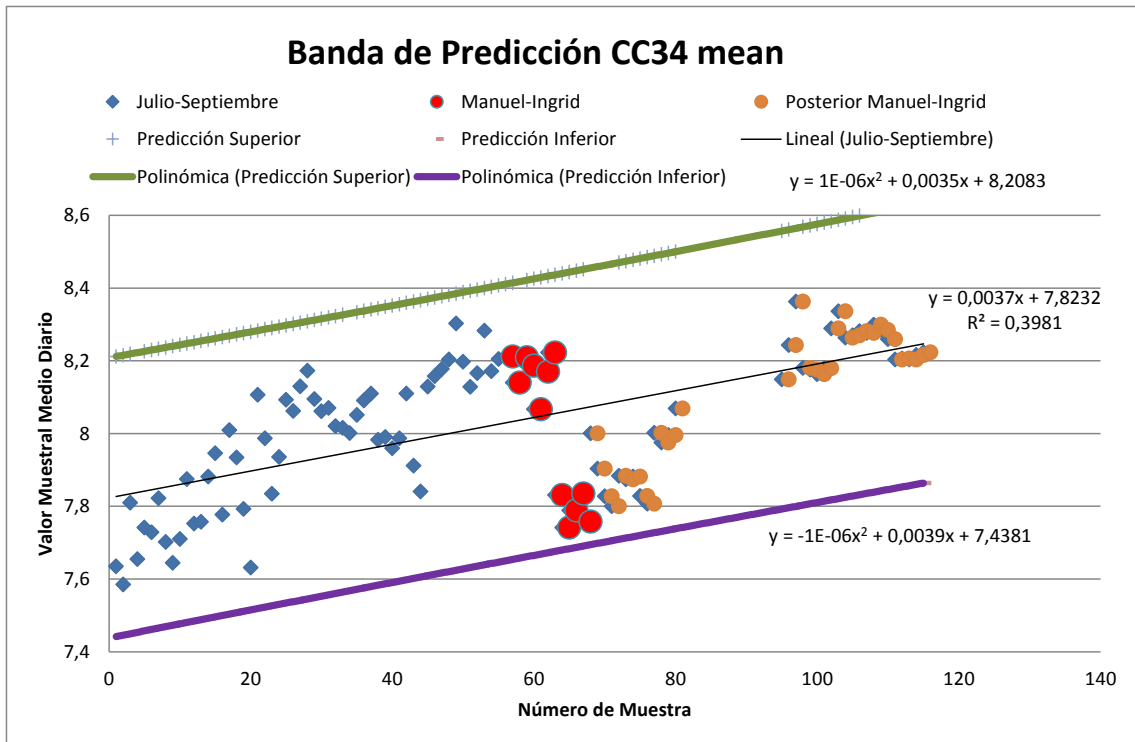


Figura 80. Banda de predicción CC34_mean.

Se observa la existencia de una tendencia en el giro transversal medio de la pila hacia aguas arriba, Figura 79. De este modo durante los días de desagüe de la presa la pila tendió a reducir su inclinación por efecto del empuje del agua porque el empuje se oponía a su inclinación creciente. Una vez reducido el nivel del agua y los empujes sobre la pila, ésta vuelve a cabecear hacia aguas arriba.

4.1.6. Conclusiones

- Básicamente, el problema trataba de estudiar el comportamiento de una pila corta parcialmente sumergida y sin soleamiento y, por lo tanto, se esperaba un comportamiento de la pila en términos de giro muy pequeño por la gran rigidez del sistema. De este modo se podía decir que la influencia de la temperatura como factor especial era despreciable.
- Hasta antes de la llegada de los huracanes Ingrid y Manuel los giros en la pila central, pila nº5 del puente, estaban controlados tanto en valores medios como máximos y mínimos.
- Entre los días 15 y 21 de septiembre el comportamiento esperado de la pila se vio afectado por la llegada de los huracanes y la apertura de las

compuertas de la presa. Los giros sufrieron variaciones no esperadas hasta el momento pero no excesivamente significativas.

- Pasado el día 21, y hasta día 26 de septiembre, los giros volvieron a retomar el comportamiento que venían describiendo hasta la llegada de los temporales. La pila tendió a recuperar el grado de inclinación inicial.
- Al analizar en conjunto todos los datos de los giros registrados hasta la finales de noviembre (26/11/2013) se observó la existencia de una tendencia en el incremento del giro transversal de la pila hacia aguas arriba. De este modo durante los días de desagüe de la presa la pila tendió a reducir su inclinación por efecto del empuje del agua porque el empuje se oponía a su inclinación creciente. Una vez reducido el Nivel del agua y los empujes sobre la pila, ésta volvió a cabecear hacia aguas arriba. Se obtuvo una velocidad media del incremento del giro transversal de 0.005 mRad/día.
- Las acciones a las que se encuentra sometida la pila son críticas (pie de embalse) y, lejos de una recuperación en el giro, la pila continúa con la tendencia de giro inicial, es decir, agua arriba.
- Todo parece indicar que las corrientes de agua sobre la cimentación de la pila han dado lugar a la formación de cavidades y/o fenómenos de descompresión del terreno en el entorno de la base de apoyo. Por lo tanto, parece vano la existencia de un problema de socavación de tipo local, al menos. La existencia de la pila en el cauce produce la contracción de la lámina de agua y la concentración de caudal en esta zona da lugar a la formación de torbellinos que se desarrollan en forma de tirabuzón alrededor de la pila. Los materiales del lecho son arrancados del borde aguas arriba por la componente vertical del flujo, elevados e impulsados por la corriente. Se forma una hoya de forma cónica en el caso de suelos sin cohesión, cuyo punto más profundo se encuentra en el borde de aguas arriba de la pila. Teóricamente, los materiales vuelven a ser depositados aguas abajo.

Como consecuencia de las conclusiones obtenidas con la Instrumentación APIA XXI realizó el correspondiente proyecto de recalce de la pila mediante micropilotes y refuerzo con escollera en la base de la misma.

Actualmente, noviembre de 2015, el Sistema de Instrumentación se encuentra en fase de reactivación.

4.2. Puente “El Beltrán”

4.2.1. Antecedentes

En el presente punto se procede a presentar el análisis de los datos procedentes de la Instrumentación del Puente Beltrán que se encuentra en el km 119+500 de la Autopista Guadalajara-Colima (México) cuyo objetivo principal era aportar información general sobre el comportamiento del puente frente a las acciones de tipo lento o cuasi-estáticas (temperatura, principalmente).

4.2.2. Descripción del puente

El Puente Beltrán se encuentra en el km 119+500 de la Autopista Guadalajara-Colima. Tiene una longitud total de 297.49 m distribuida en 4 vanos (73.60+12.40+134.90+76.59). El tablero, de hormigón pretensado, es de tipo cajón unicelular de canto variable entre 4.40 m en centro de vano central y 7.50 m en secciones sobre pilas 2, 3 y 4. Los espesores de las almas de las secciones son de 0.50 m. Las losas superior e inferior presentan espesores de 0.50 m y 0.75 m respectivamente.

Las pilas 2 y 3 son de sección cajón huecas y espesor de 0.40 m. Presentan una altura de 24.25 m, ancho constante de 6.00 m y un canto de 1.50 m. El contacto tablero-pila se establece a través de aparatos de apoyo tipo POT.

La pila 4 está rígidamente conectada al tablero materializando un punto fijo en la estructura. Esta pila tiene 120.45 m de altura y sección cajón variable. En la base el ancho y el canto son de 6.00 m mientras que en cabeza el canto se reduce a 4.00 m variando linealmente con la altura en una relación 1:60. El espesor de los paramentos de la pila 4 es de 0.80 m.

La singularidad del puente se encuentra en el empotramiento tablero-pila 4, la combinación de pila alta con pilas bajas y la importante longitud del vano central (más de 130 m).

Aunque inicialmente la combinación de alturas de pilas y longitudes de vanos parece poco convencional se ha comprobado que, a grandes rasgos, el esquema estructural de funcionamiento del puente es adecuado.



Figura 81. Aspecto del vano central y pila 4 del Puente Beltrán. Foto tomada por Apia XXI IMC.

4.2.3. Medidas a realizar

La Instrumentación del Puente Beltrán se realizó exclusivamente con sensores y tecnología basada en la fibra óptica.

Debido a la singularidad del viaducto, se monitorizó el comportamiento estructural de la pila más elevada, Pila n°4, mediante el control de las inclinaciones y vibraciones en la cabeza de dicha pila. Además se instalaron sensores en diferentes puntos del viaducto para complementar dichas medidas con el registro de los desplazamientos del tablero en las otras dos pilas del viaducto y en los estribos, así como el registro de las vibraciones en los vanos contiguos a la pila objeto de estudio. También se midieron microdeformaciones en los tres vanos del viaducto.

Las variables controladas y los puntos en los que se realizó la medición se comentan a continuación.

4.2.3.1. Movimientos de las pilas

Se instalaron dos clinómetros unidireccionales en cabeza de la pila más alta, Pila n°4, uno para cada dirección.

Se midieron los giros longitudinales y transversales respecto a los dos ejes perpendiculares del plano horizontal en dicha pila, y con ello las inclinaciones verticales asociadas.

El total de sensores para registro de inclinaciones fue de 2 clinómetros unidireccionales.

4.2.3.2. Desplazamientos relativos estribo/pila-tablero

Se instalaron sensores de desplazamiento relativos longitudinales entre el tablero y las cabezas de pila y estribos.

En la pila n°2 y en el estribo n°1 se instalaron, respectivamente, un sensor de desplazamiento longitudinal.

En la pila n°3 y el estribo n°2, lado Colima, se instalaron, respectivamente, dos sensores de desplazamiento, uno longitudinal y otro transversal.

El total de sensores para registro de los desplazamientos del tablero fue de 6 sensores de precisión, medidas del orden del centímetro, de tipo hilo.

4.2.3.3. Aceleraciones verticales y horizontales transversales en tablero

Se instalaron sensores para medir aceleraciones en diversos puntos del tablero, registrando la “vibración ambiental” debida tanto al paso de los vehículos como a la excitación del viento.

En el caso de las aceleraciones verticales, se instalaron 3 acelerómetros, dos en aproximadamente la mitad de dos de los vanos (vanos 3 y 4) y otro sobre una de las pilas (pila n°4).

En el caso de las aceleraciones horizontales transversales, éstos se instalaron en la misma posición donde se ubicaron los acelerómetros verticales.

El total de sensores para registro de vibraciones fue de 3 acelerómetros verticales y 3 acelerómetros transversales.

4.2.3.4. Microdeformaciones (tensiones) en el tablero

Se midieron las microdeformaciones en dirección longitudinal en distintos puntos del tablero, indicativas del Nivel de tensión en diversas secciones de centro de vano.

En una sección del cajón de hormigón, se colocaron extensómetros longitudinales próximos a la fibra inferior de ambas almas de la sección, en el interior del cajón y de forma simétrica respecto del eje longitudinal del viaducto, adicionalmente, en la misma sección, en una de las almas se colocó otro extensómetro en las cercanías de la fibra superior. Esta disposición de tres extensómetros se repite en las tres secciones transversales principales, esencialmente en centros de vano.

El total de sensores para registro de microdeformaciones fue de 9 extensómetros.

4.2.4. Instalación

Al tratarse de un viaducto visitable, la mayor parte de la Instrumentación se realizó por el interior del viaducto, sin embargo, puesto que el acceso a la zona de apoyos de las cabezas de las pilas no es posible desde el interior del viaducto, fue necesario el empleo de equipos de trabajos en altura para realizar la instalación de determinados sensores, como es el caso de los transductores de hilo para registrar el movimiento del tablero respecto a las pilas.

La frecuencia de muestreo de los sensores depende del sistema de adquisición que los alimenta. En este caso, el equipo de adquisición de fibra óptica empleado permitía tener una frecuencia de muestreo elevada en todos los sensores, alrededor de 200 Hz, y posteriormente almacenar los datos con una frecuencia menor, según sus características dinámicas. Esto es útil, para el caso de los desplazamientos del tablero y de los clinómetros donde, al tratarse de fenómenos de carácter estático, no es necesario el registro con frecuencias de adquisición elevadas.

Sin embargo, el caso de los acelerómetros es diferente, puesto que la información que proporcionan este tipo de sensores es de carácter plenamente dinámico, por lo que requieren una frecuencia de adquisición y almacenamiento superior.

Dentro del viaducto, en las cercanías del Estribo 1, lado Guadalajara, se estableció el puesto de control local (PLC), donde se llevó la corriente necesaria para la alimentación de los sensores y de los equipos de registro. La energía se llevó hasta este punto a través de un sistema de paneles solares.

En dicho puesto de control, mediante un concentrador, se gestionó toda la información recibida de los equipos de medida.

Una vez almacenado en el servidor, y mediante diferentes aplicaciones web, se pudo realizar un control remoto de la instalación, así como la visualización de los datos que se registraron en todo momento.

La medición se realizó de forma continua, es decir, mediante un registro constante y Instrumentación automática. Este modo de registro permite realizar el análisis completo de los datos obtenidos en un periodo concreto de tiempo. De esta forma, las señales obtenidas en cada sensor recogen el comportamiento del viaducto tanto al paso de los distintos vehículos como por las condiciones ambientales, dependiendo de las características propias de cada sensor.



*Figura 82. Detalle de anclaje de fibra óptica y caja de conexiones en tablero.
Cortesía de Ineco.*

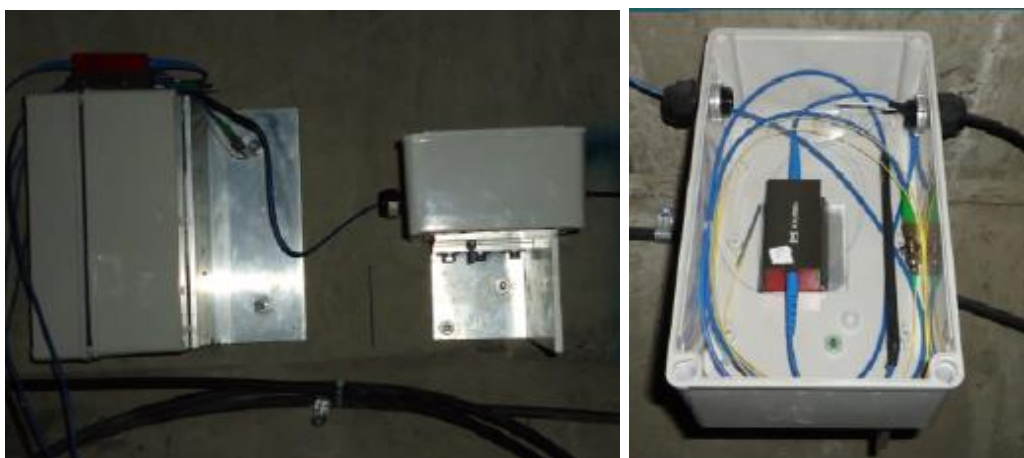


Figura 83. Detalle de acelerómetros. Cortesía de Ineco.

4.2.5. Metodología desarrollada

4.2.6. Modelo de cálculo

Se desarrolló un modelo dinámico en 3D con el software SOFISTIK en el que se modelizaron tablero, pilas, estribos y aparatos de apoyo.

Los parámetros geométricos y características mecánicas de ambos modelos se han extraído de la información contenida en los planos “as built” del puente.

Sobre este modelo de cálculo se realizaron sendos cálculos en el dominio de la frecuencia (obtención de modos y frecuencias propias de vibración).

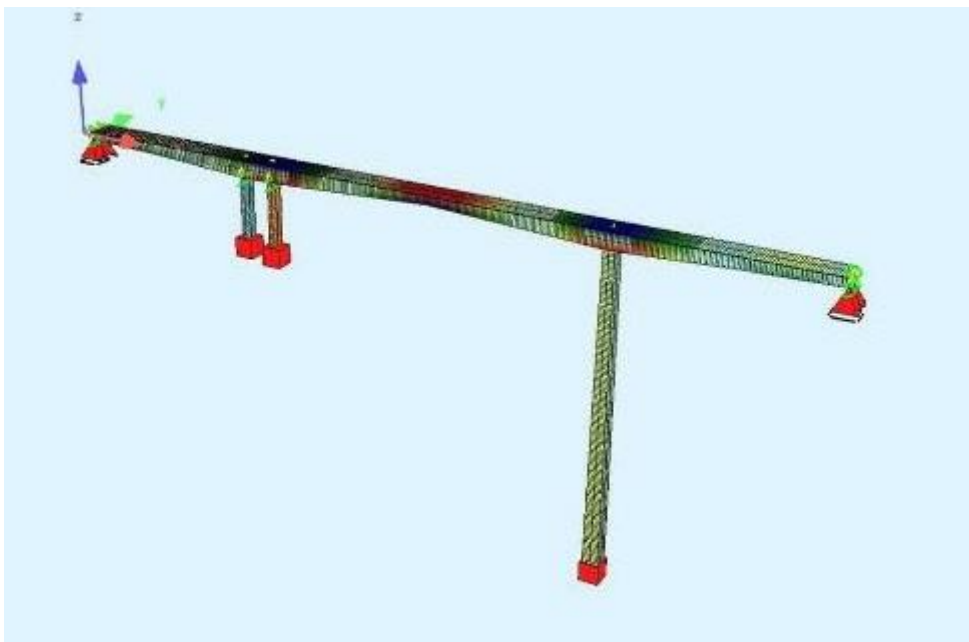


Figura 85. Aspecto general del modelo de cálculo 3D realizado del Puente Beltrán.

Los resultados de los modelos de cálculos se compararon con los resultados obtenidos mediante la Instrumentación.

En cuanto a los vínculos, por ser un pórtico 3D se impidieron los 6 posibles movimientos en aquellos elementos empotrados en el terreno como pilas y estribos. En las pilas intermedias se impidieron tanto el movimiento horizontal como el giro en el eje Z.

Los materiales, en este caso, fueron dos: hormigón y un material ficticio que representa las propiedades deslizantes de los POT.

De cara a la discretización se distinguieron las siguientes partes:

- Tablero: el tablero quedó dividido en vanos de longitud variable, dando lugar a una discretización de la longitud total del tablero en elementos de 2.5 m aproximadamente, dependiendo del vano.
- Pilas: la discretización de los elementos pila se hicieron teniendo en cuenta la longitud de trepa.

La necesidad de evaluar los esfuerzos dinámicos a los que se encontraban sometidas las pilas hizo necesario tener en cuenta la relación tablero-pila a través de los aparatos de apoyo deslizantes tipo POT. Esto dio lugar a una modelización especial en lo que en otros modelos más sencillos podría ser un nudo rígido sin mayor interés.

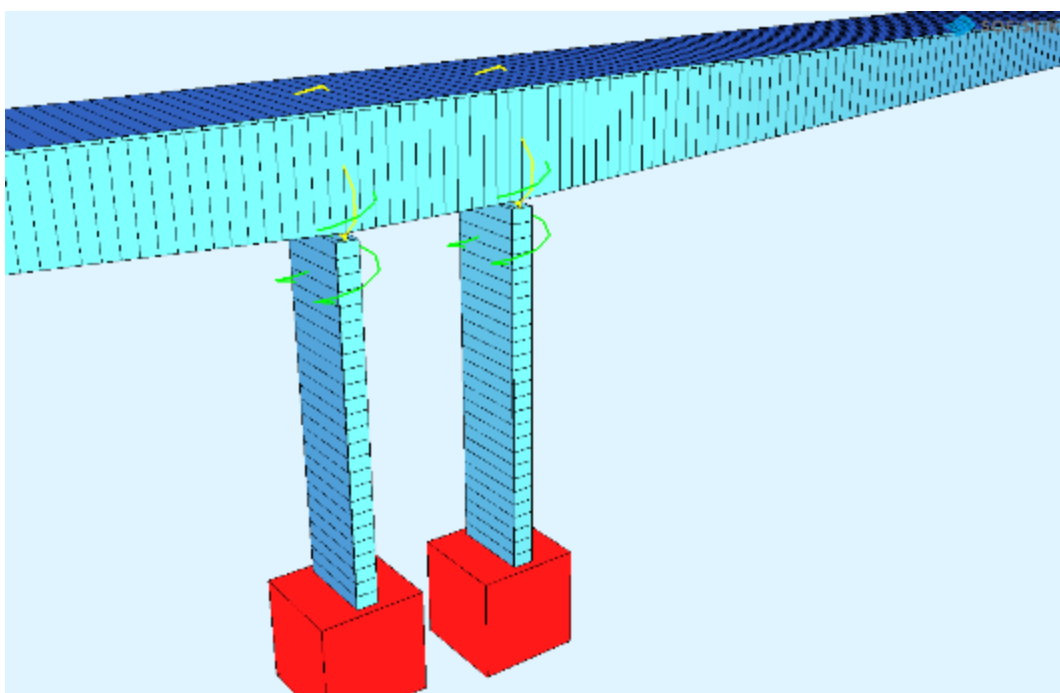


Figura 86. Modelización de los aparatos de apoyo tipo POT en pilas 2 y 3.

Como se ve en la representación anterior, tanto la posición de los aparatos de apoyo, como el eje de pila y el eje de tablero quedan representados. Las características deslizantes de los aparatos de apoyo también se modelizaron.

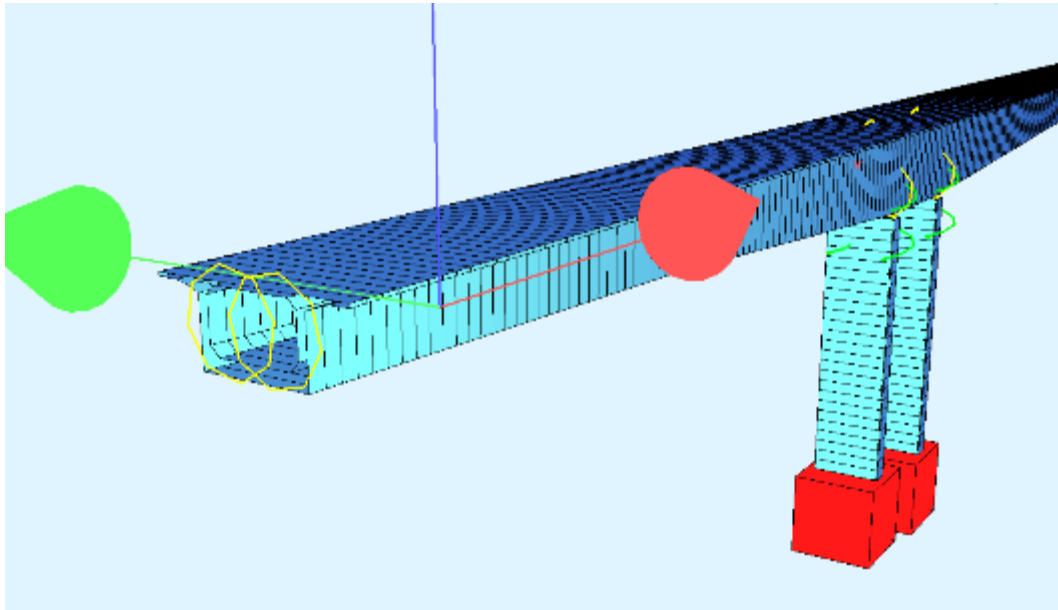


Figura 87. Modelización del cajón del tablero y estribo 1.

En la ilustración anterior se presenta la modelización de los estribos. Se observa cómo frente a la imposibilidad de movimiento por parte del estribo se deja libre de coacción al tablero y se relacionan ambos, estribo y tablero, por medio de las condiciones deslizantes de los aparatos de apoyo tipo POT.

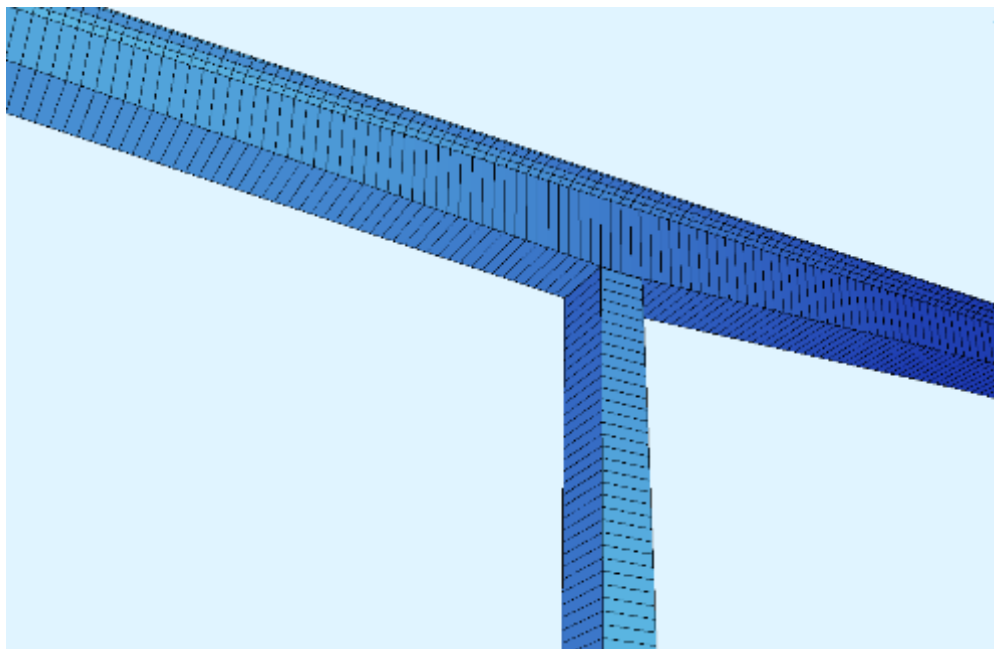


Figura 88. Modelización del tablero y pila 4 de sección variable. Empotramiento tablero-pila 4.

Los modelos creados anteriormente aplicaron métodos de cálculo dinámico basados en la integración en el tiempo del modelo estructural considerando las acciones de las cargas móviles.

El principal objetivo de este tipo de modelos fue obtener las frecuencias propias de vibración. Para ello fue fundamental conocer las características mecánicas de pilas y tablero.

Del mismo modo, la calibración del modelo de elementos finitos propuesto se realizó teniendo en cuenta los datos reales facilitados por los extensómetros.

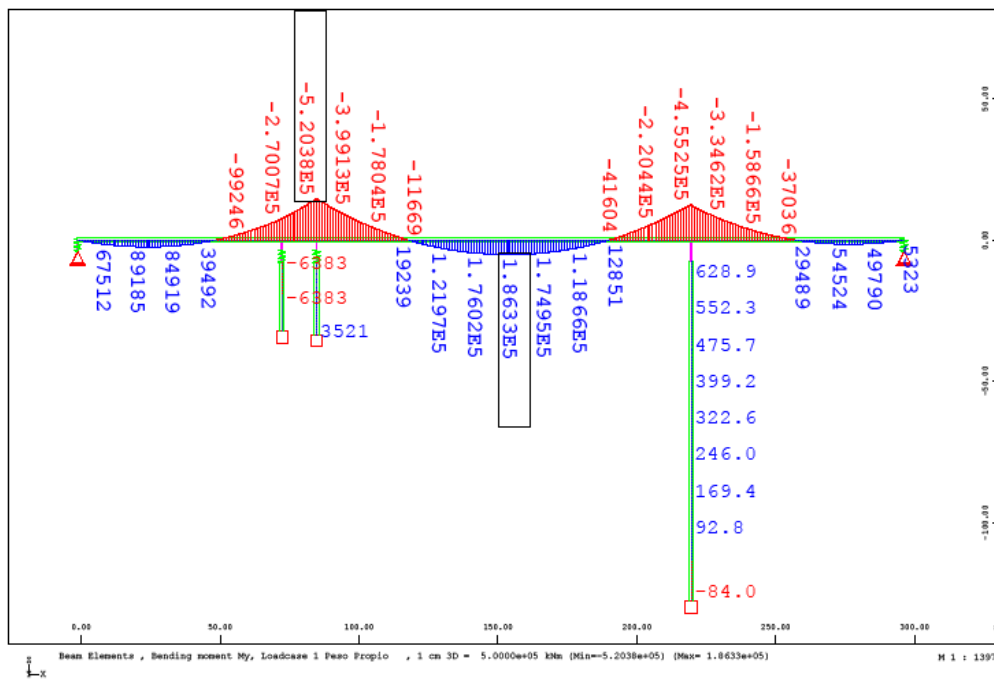


Figura 89. Momentos flectores teóricos según eje Y por peso propio y cargas muertas.

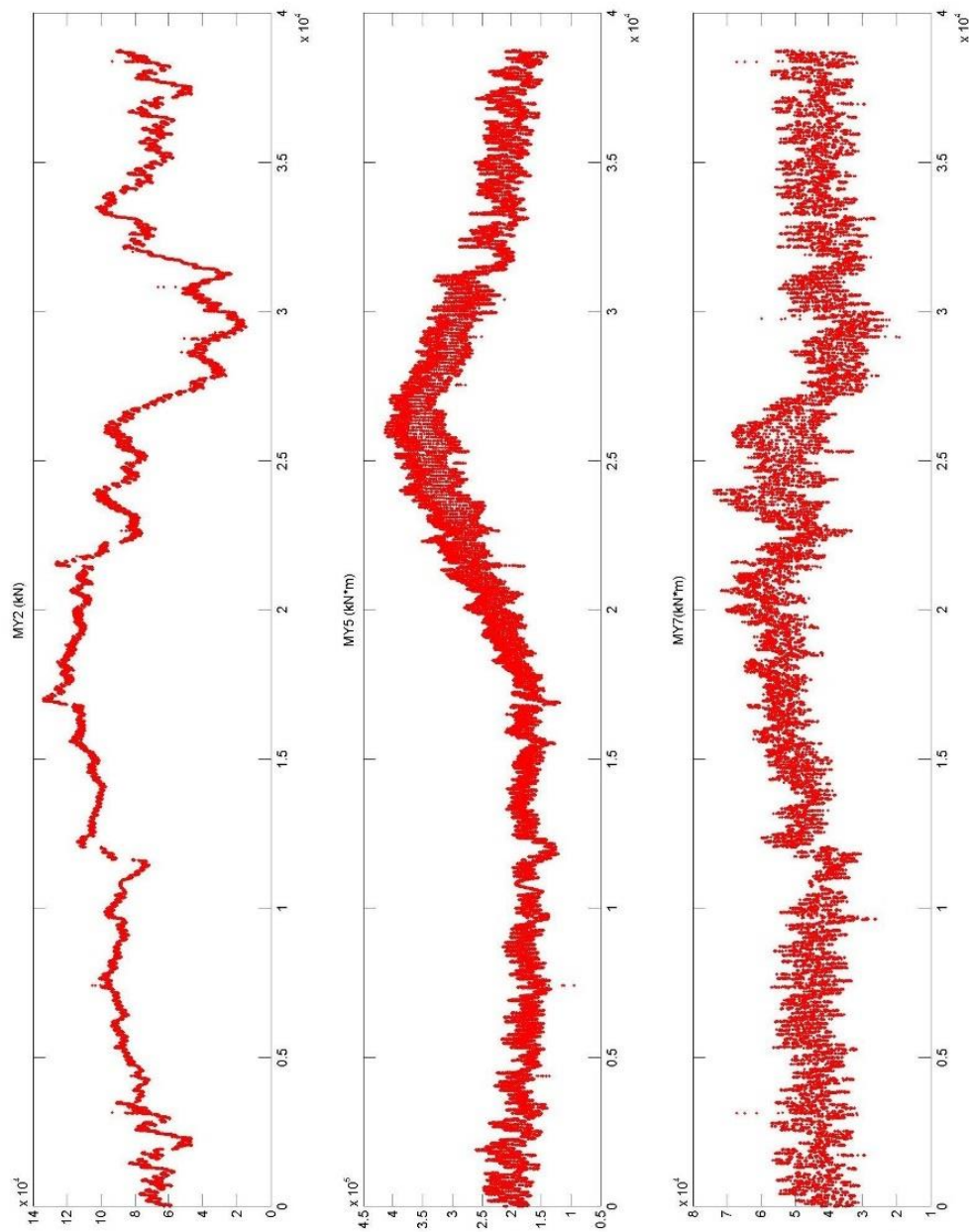


Figura 90. Evolución de los momentos flectores longitudinales en las secciones 2, 5 y 7 desde agosto de 2012 a agosto de 2013 para la calibración del modelo.

4.2.7. Toma de datos

La toma de datos de la Instrumentación puesta en funcionamiento fue prácticamente continua (alta frecuencia), sin embargo, se convirtió en un sistema continuo-discreto. Las principales características de este sistema de toma de datos fueron:

- Medida continua en alta frecuencia.

- Cada 10 minutos se calcularon los valores estadísticos más importantes (Máximo, Mínimo, Media, etc). Estos nuevos valores sustituyeron a los registrados de forma continua y fueron los únicos almacenados.
- Flexibilidad: posibilidad de registrar nuevos valores ante la demanda de otros estadísticos significativos como cuantiles, desviaciones típicas, etc.

4.2.8. Transmisión de datos

La transmisión de datos se intentó realizar en tiempo real lo cual hubiera permitido el control de los registros mediante un sistema de alarmas y el seguimiento de la evolución en tiempo real una vez superados los valores de alarma. No obstante los datos registrados fueron facilitados periódicamente a mes vencido.

Se facilitaron los siguientes archivos para análisis meramente estático:

- 2012_08_info_apia.xlsx
- 2012_09_info_apia.xlsx
- 2012_10_info_apia.xlsx
- 2012_11_info_apia.xlsx
- 2012_12_info_apia.xlsx
- 2013_01_info_apia.xlsx
- 2013_02_info_apia.xlsx
- 2013_03_info_apia.xlsx
- 2013_04_info_apia.xlsx
- 2013_05_info_apia.xlsx
- 2013_06_info_apia.xlsx
- 2013_07_info_apia.xlsx
- 2013_08_info_apia.xlsx

Y los siguientes archivos para análisis dinámico:

- Acel.20121110235920.txt
- Acel.20130103113000.txt
- Acel.20130203213005.txt
- Acel.20130305213006.txt

- Acel.20130405200012.txt
- Acel.20130501200018.txt
- Acel.20130601200105.txt
- Acel.20130716080001.txt
- Acel.20130802150021.txt

4.2.9. Tratamiento de datos

Esta fase exigió la utilización de un software de tratamiento de grandes volúmenes de datos. Este punto se abordó desde tres vertientes:

- Estadística descriptiva: Obtención de parámetros estadísticos significativos (Máximo, Mínimo, Media, Cuantil, etc.).
- Estadística de control de calidad.
- Inferencia estadística: Obtención de modelos estadísticos de regresión para definición de correlaciones entre los parámetros registrados y de Bandas de Predicción.

Se usó MATLAB y EXCEL.

Una vez facilitados los datos mensuales se procesaron para tomar sensibilidad con la evolución mensual de los datos y, posteriormente, se analizaron día por día para valorar su calidad.

Esa valoración de la calidad se realizó analizando la Función de Autocorrelación.

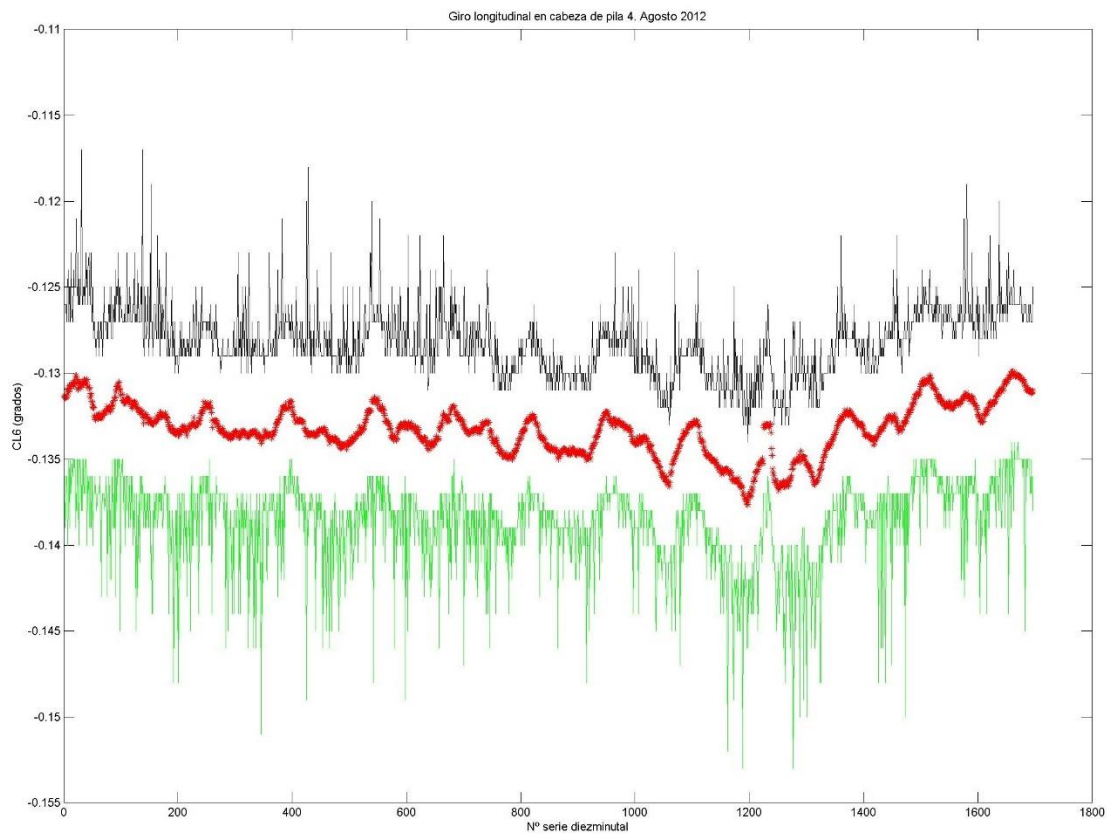


Figura 91. Registro mensual de valores diezminutales del giro en cabeza de pila 4 durante el mes de agosto de 2012. Valores máximos (negro), medios (rojo) y mínimos (verde).

En la figura anterior se representa el giro longitudinal en cabeza de pila 4 durante el mes de junio. Como se puede apreciar los valores máximos aparecen en color negro, los mínimos en verde y los valores medios en rojo. Se puede percibir como a la tendencia general mensual se superpone una oscilación claramente diaria.

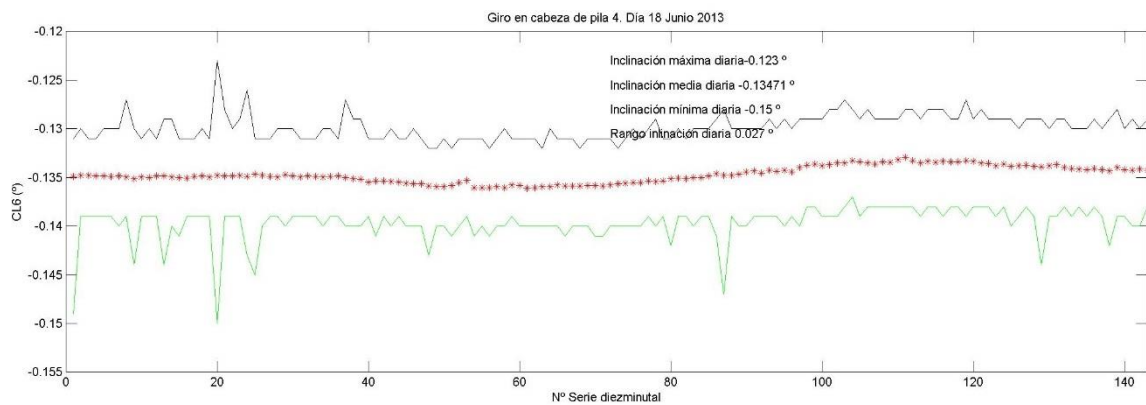


Figura 92. Análisis diario (18 de junio 2013) de valores diezminutales del giro en cabeza de pila 4. Valores máximos (negro), medios (rojo) y mínimos (verde).

En la figura anterior se representa el giro longitudinal en cabeza de pila 4 durante el día 17 de junio. Como se puede apreciar los valores máximos aparecen en color negro, los mínimos en verde y los valores medios en rojo. Se incluye un resumen de los valores medios (máximo, medio y mínimo) y el rango diario. En este caso la evolución es claramente cíclica.

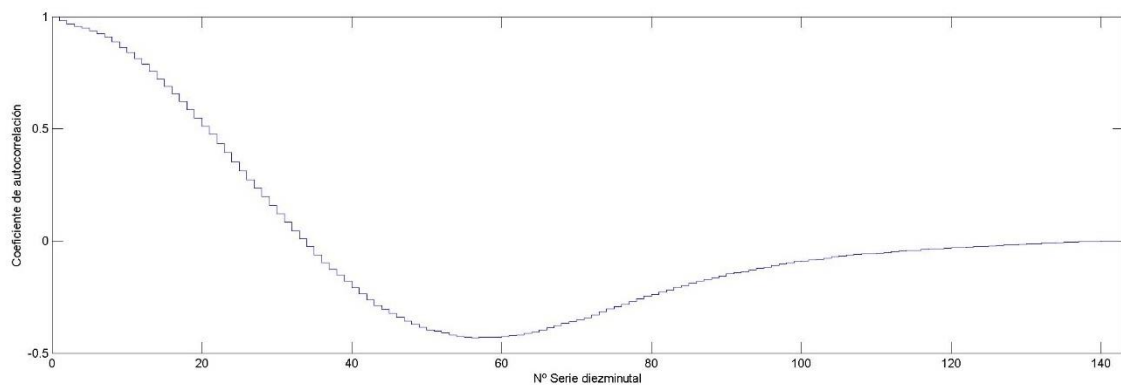


Figura 93. Análisis diario (18 de junio 2013) de valores diezminutales del giro en cabeza de pila 4. Función de Autocorrelación.

En la última de las figuras incluidas en este punto se recoge el análisis de la evolución de la Función de Autocorrelación a lo largo de un día para el giro longitudinal en cabeza de pila 4 durante el día 17 de junio. La Función de Autocorrelación es una herramienta matemática utilizada frecuentemente en el procesado de señales. La Función de Autocorrelación se define como la correlación cruzada de la señal consigo misma. La

Función de Autocorrelación resulta de gran utilidad para encontrar patrones repetitivos dentro de una señal, como por ejemplo, la periodicidad de una señal enmascarada bajo el ruido o para identificar la frecuencia fundamental de una señal que no contiene dicha componente, pero aparecen numerosas frecuencias armónicas de esta. Cuando la señal no enmascara ningún patrón la caída de la función es rápida y, posteriormente se aproxima a cero. Tal y como ocurre en el ejemplo anterior.

4.2.10. Estudios de la evaluación de la posición del punto fijo virtual del tablero

En este punto se trata de localizar la posición del punto fijo virtual del tablero y el rango de variación de esa posición a lo largo del tiempo.

Para dicho análisis se analizaron los transductores de desplazamiento colocados en los aparatos de apoyo de los estribos y en las pilas con el fin de comparar los resultados arrojados por cada uno de los análisis.

Teniendo en cuenta los movimientos tablero-estribo 1 y tablero-estribo 2 se pudo definir la posición del punto del tablero con movimiento nulo. Se considera que ese punto es el punto fijo de la estructura en ese instante.

$$X_{\text{punto fijo}} = X(t)$$

Si las pilas fueran infinitamente rígidas la posición del punto fijo se confirmaría tomando los movimientos relativos tablero-pila dos a dos.

Según el proyecto, el punto con movimiento nulo debería quedar localizado sobre la pila 4, es decir a 220 m con respecto al estribo 1 sin apenas variación. No obstante se obtiene cierto rango de movimientos debido a hipótesis muy conservadoras en cuanto a las fuerzas de rozamiento ejercidas por los aparatos de apoyo. No obstante los valores son cíclicos y no presentan ningún tipo de deriva en su evolución.

A continuación se presenta la evolución de la posición del punto fijo entre agosto de 2012 y agosto de 2013.

4.2.10.1.1. THL1-THL8

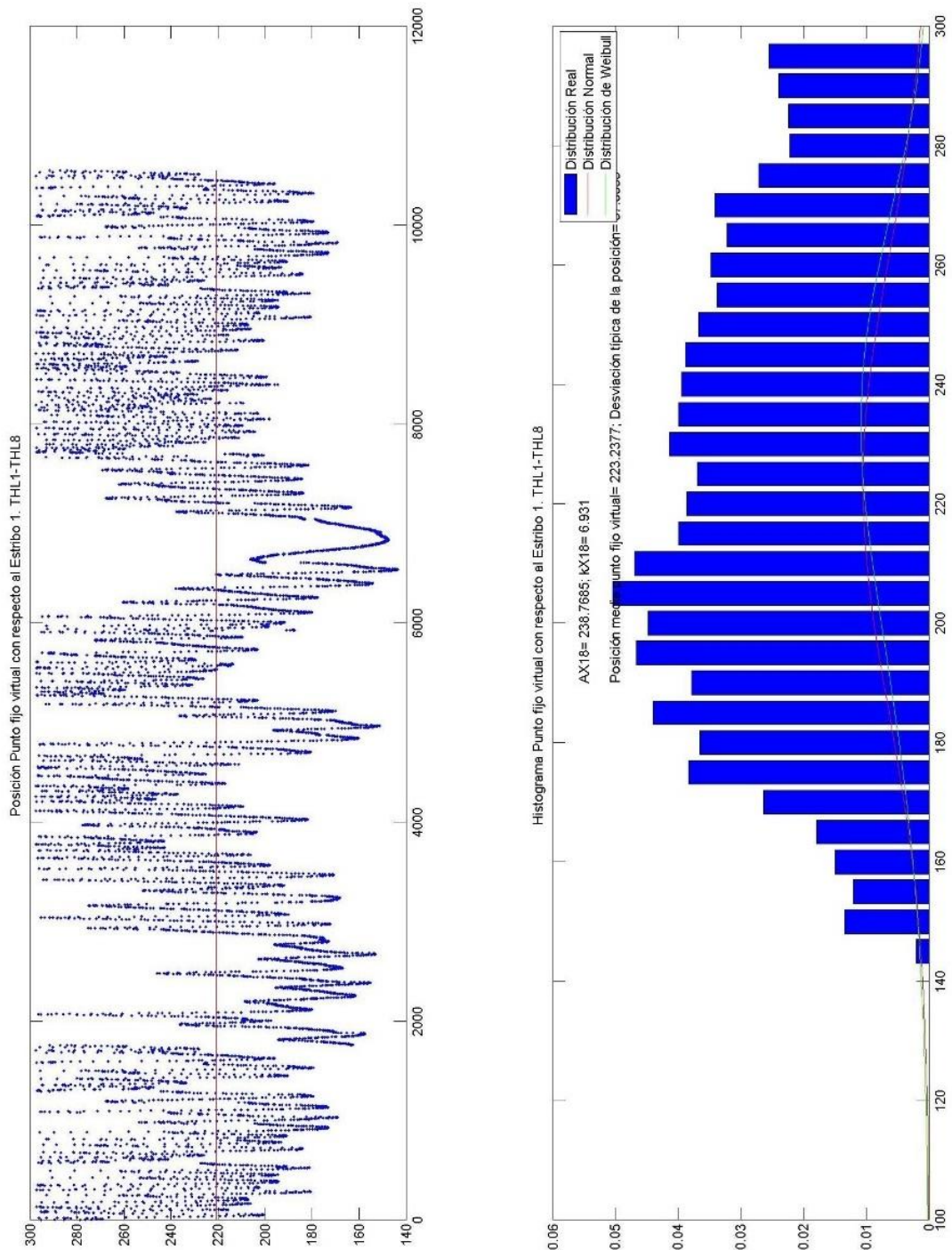


Figura 94. Estimación de la evolución del punto fijo real. THL1 y THL8 desde agosto de 2012 a agosto de 2013.

4.2.10.1.2. THL3-THL8

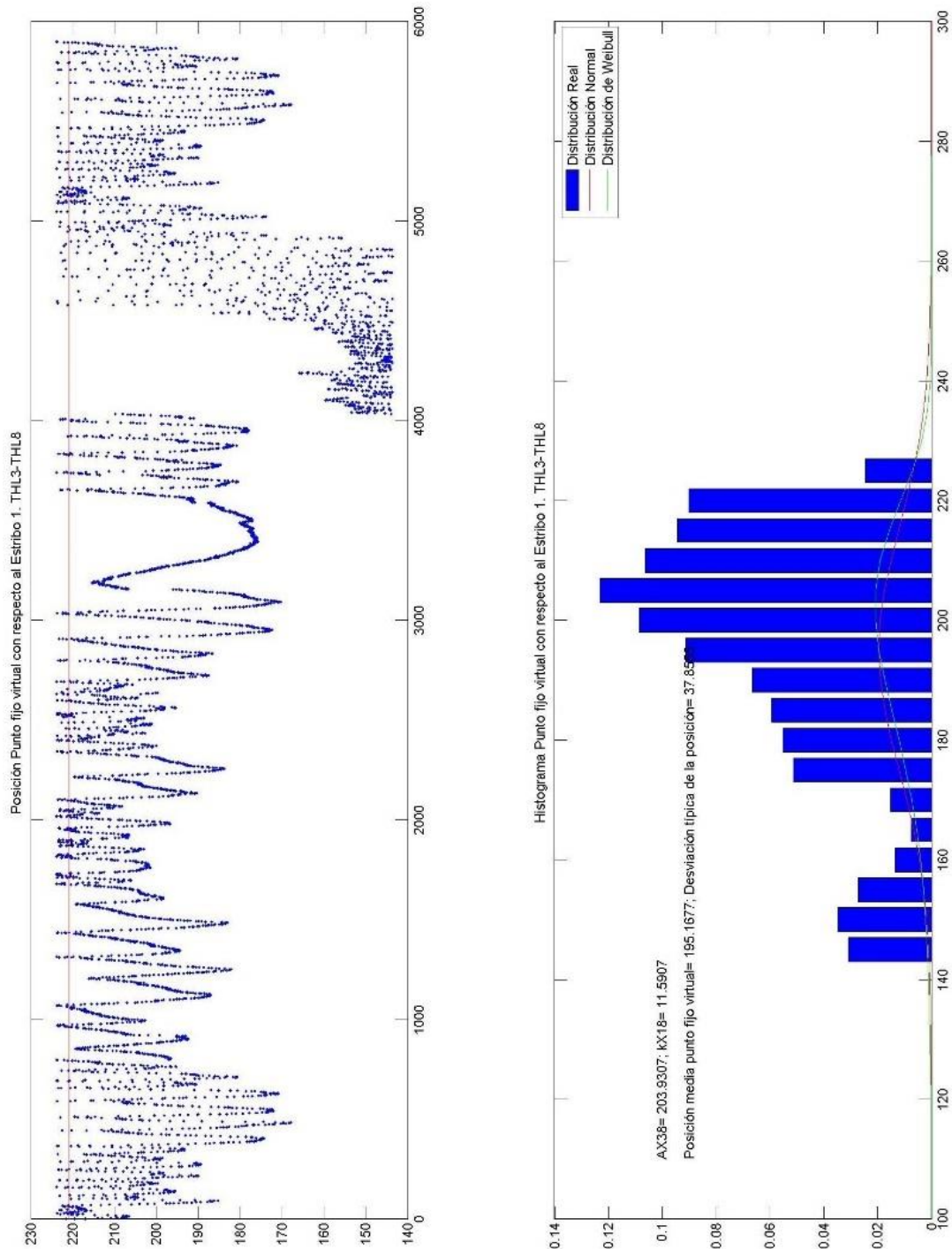


Figura 95. Estimación de la evolución del punto fijo real. THL3 y THL8 desde agosto de 2012 a agosto de 2013.

4.2.10.1.3. THL4-THL8

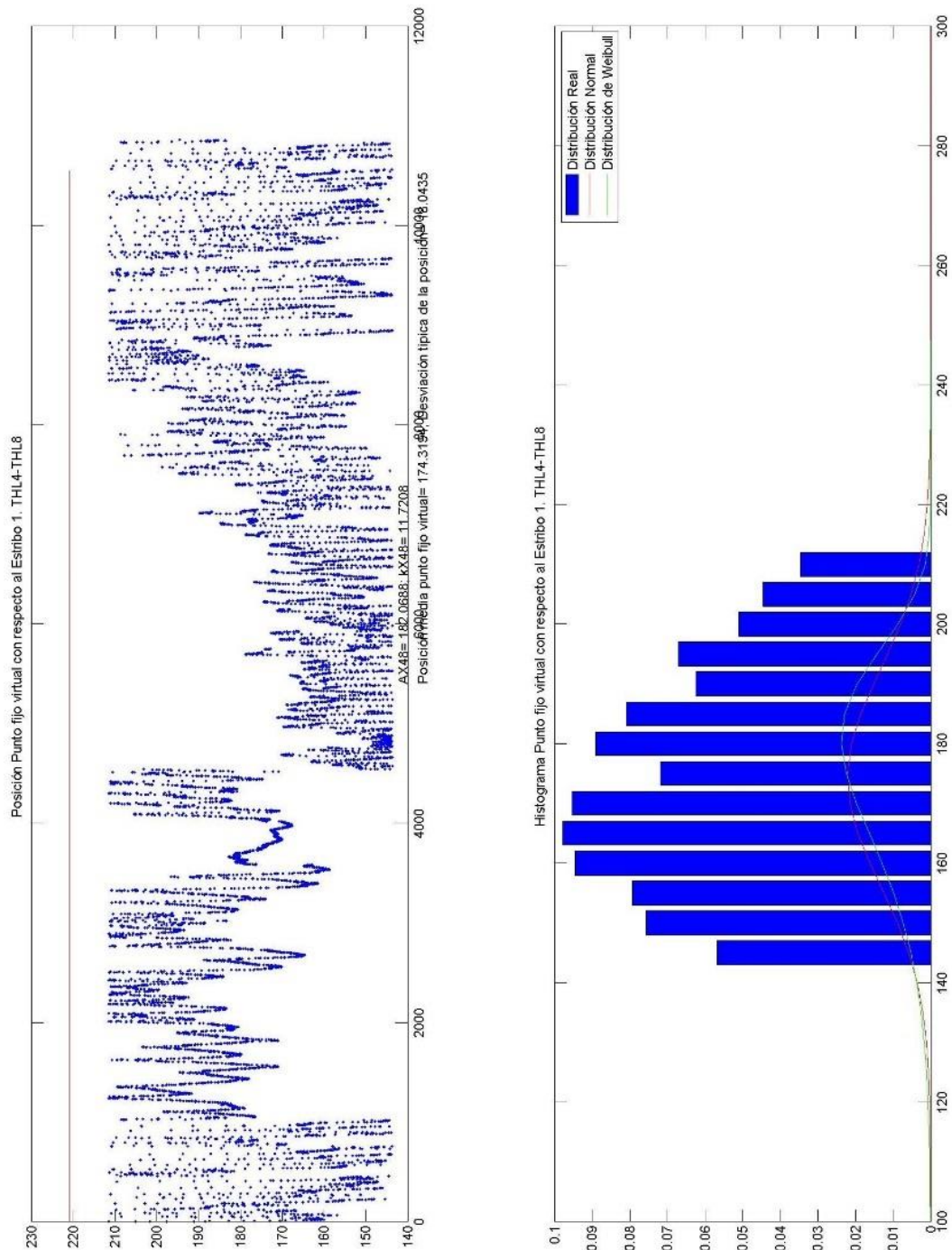


Figura 96. Estimación de la evolución del punto fijo real del puente en función de THL4 y THL8 desde agosto de 2012 a agosto de 2013.

4.2.11. Coeficientes de rozamiento de los aparatos de apoyo POT

El conocimiento del funcionamiento de los aparatos de apoyo es fundamental para estudios posteriores sobre el comportamiento a largo plazo de las pilas.

Evaluar los esfuerzos reales a los que están sometidas las pilas y evaluar los Niveles de fisuración supone poner en relación los desplazamientos medidos en cabeza con el coeficiente de rozamiento desarrollado por los aparatos de apoyo.

Teniendo en cuenta los movimientos tablero-estribo 1 y tablero-estribo 2 se puede definir la posición del punto del tablero con movimiento nulo. Se considera que ese punto es el punto fijo virtual de la estructura en ese instante.

Los resultados así obtenidos son coherentes con lo recogido en proyecto y por lo tanto se dan como válidos.

Una vez definido este punto se puede calcular el movimiento relativo tablero-pila esperado suponiendo un deslizamiento perfecto en función de las variaciones de temperatura en el tablero.

Se considera que inicialmente la diferencia entre el movimiento esperado y el movimiento registrado por los transductores en cabeza de pila 2 y 3, se debe al arrastre ejercido por el tablero sobre la pila.

Así podemos calcular el movimiento de arrastre como diferencia del movimiento estimado con respecto a la lectura del transductor.

Del modelo de cálculo se obtiene la rigidez a flexión longitudinal y la fuerza en cabeza de pila debida a ese movimiento de arrastre.

Cuando se produce el arrastre es porque no hay deslizamiento tablero-pila y, por lo tanto, se puede obtener un valor del coeficiente de rozamiento en función de la fuerza de arrastre en cabeza y la fuerza vertical debida al peso propio del tablero y la sobrecarga permanente.

Por otra parte, se ha observado que los transductores de desplazamiento relativo tablero-pila registran variaciones nulas bajo dos condiciones:

- Cuando no hay incremento térmico: si el efecto térmico es nulo la deformación inducida en el tablero es nula también.
- Cuando el incremento térmico es brusco: cuando la temperatura varía fuertemente en un periodo corto de tiempo el tablero reacciona más rápidamente que la pila y la arrastra. La lectura del transductor en ese

intervalo resulta ser cero. El coeficiente de rozamiento se dispara porque la diferencia entre el movimiento tablero-pila esperado y medido es muy grande.

Para esas variaciones de temperatura el aparato de apoyo no desliza porque está intentando invertir el sentido del deslizamiento y la expresión del coeficiente de deslizamiento en función del tiempo deja de tener validez.

Es precisamente cuando el aparato de apoyo intenta cambiar el sentido del deslizamiento cuando se produce el arrastre, y el tablero trabaja por superar la fuerza de rozamiento ejercida en el POT.

La formulación de una expresión continua en el tiempo serviría únicamente para valorar la desviación del movimiento estimado con respecto al real, pues esta formulación no viene a representar el funcionamiento del aparato de apoyo.

Para entender definitivamente la mecánica de funcionamiento se presenta la siguiente gráfica que ilustra el proceso de arrastre/deslizamiento en el aparato de apoyo.

Los incrementos térmicos de ciclo diario tienden a producir la dilatación/contracción del tablero. Las pilas ejercen, ante el intento del tablero de deformarse, una fuerza de rozamiento que es función de las características deslizantes de los aparatos de apoyo.

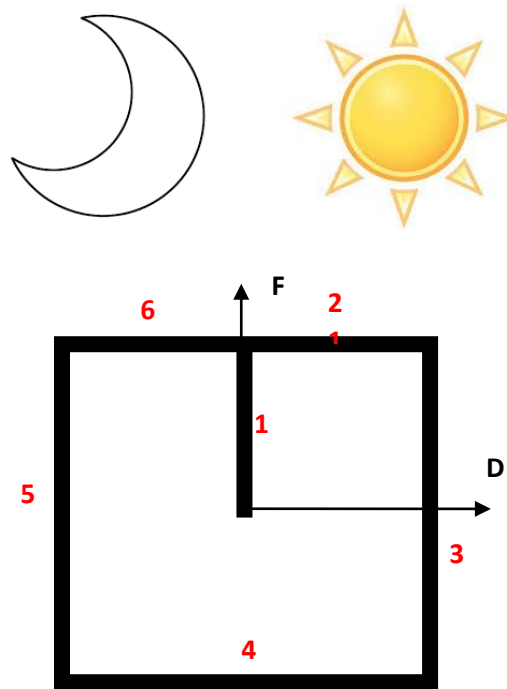


Figura 97. Diagrama de funcionamiento de un aparato de apoyo deslizante sometido a un ciclo térmico de tipo diario. (Fuerza-Deslizamiento).

Al comenzar el día la temperatura aumenta y el tablero tiende a dilatarse ejerciendo una fuerza sobre la pila. Si la fuerza horizontal sobre la cabeza de pila es inferior a la de rozamiento ejercida por el aparato de apoyo (1) el tablero no desliza sobre la pila. La fuerza horizontal tiene que alcanzar un valor tal que supere la fuerza de rozamiento impuesta. Una vez alcanzada, el tablero se deforma libremente (2).

Cuando la temperatura comienza a descender (completándose el ciclo diario de la temperatura) la fuerza de rozamiento invierte su sentido. La fuerza ejercida por la contracción del tablero no será suficiente para deformarse libremente mientras no alcance una fuerza igual al doble de la del rozamiento ejercida por el aparato de apoyo (3). Una vez alcanzada, el tablero se deforma libremente (4) pero en sentido contrario al inicial.

Si la temperatura comienza a aumentar (nuevo ciclo diario de la temperatura) la fuerza de rozamiento invierte su sentido nuevamente. La fuerza ejercida por el movimiento de dilatación del tablero no será suficiente para deformarse libremente mientras no alcance una fuerza igual al doble de la del rozamiento ejercida por el aparato

de apoyo (5). Una vez alcanzada, el tablero se deforma libremente (6) pero en el mismo sentido que lo hacía al principio.

Este estudio se puede afrontar desde dos vertientes:

- Estudio del incremento del ángulo en cabeza de pila: el incremento del giro cuando la pila es arrastrada por el tablero está condicionado por el propio funcionamiento del aparato de apoyo (en el resto de los casos, se ha comprobado que la correlación entre el giro y las variables temperatura y viento es muy alta). Una vez conocido ese incremento de giro se puede calcular la fuerza en cabeza mediante el modelo de cálculo y, en definitiva, el coeficiente de deslizamiento ejercido por el aparato de apoyo.
- Estudio del movimiento esperado del tablero: la diferencia entre el movimiento esperado y leído en el transductor es directamente el movimiento de arrastre que el tablero ejerce sobre la pila. Conocido el movimiento de arrastre se puede calcular la fuerza en cabeza mediante el modelo de cálculo y, en definitiva, el coeficiente de deslizamiento ejercido por el aparato de apoyo.

Es importante remarcar que una vez conocido el incremento del giro o el movimiento de arrastre sería necesario descontar la parte debida al gradiente térmico. Finalmente, se pueden plantear la siguiente igualdad bajo la hipótesis de comportamiento elástico lineal:

$$P = k \cdot x \equiv R_z \cdot \mu$$

$$\mu (\%) \approx \frac{k \cdot x}{2 \cdot R_z}$$

Donde,

P es la fuerza en cabeza de pila debida al arrastre del tablero

k es la rigidez longitudinal de la pila

x es el movimiento de arrastre

R_z es la reacción vertical en cabeza de pila debida a peso propio y carga permanente

μ coeficiente de rozamiento calculado

Mediante este método se han obtenido los resultados que se presentan en el siguiente punto pudiéndose observar que en ningún caso los valores obtenidos superan los valores de máximo rozamiento que se les supone a este tipo de aparato de apoyo (5%). Cabe decir que, puesto que al movimiento de arrastre x no se le ha descontado la parte correspondiente al gradiente térmico el valor es mayor al real por lo que los valores de μ calculados son superiores a los reales quedando el cálculo del lado de la seguridad.

Este procedimiento no es solamente aplicable a los aparatos de apoyo tipo POT sino que también es aplicable a aparatos de apoyo tipo esféricos. Un estudio de similares características al presentado aquí fue realizado durante el seguimiento de la Instrumentación procedente de Viaducto Arroyo las Piedras (LAV Córdoba-Málaga) para ADIF ante la incertidumbre de una nueva tecnología de aparato de apoyo nunca antes usado en España.

4.2.11.1. Pila 2

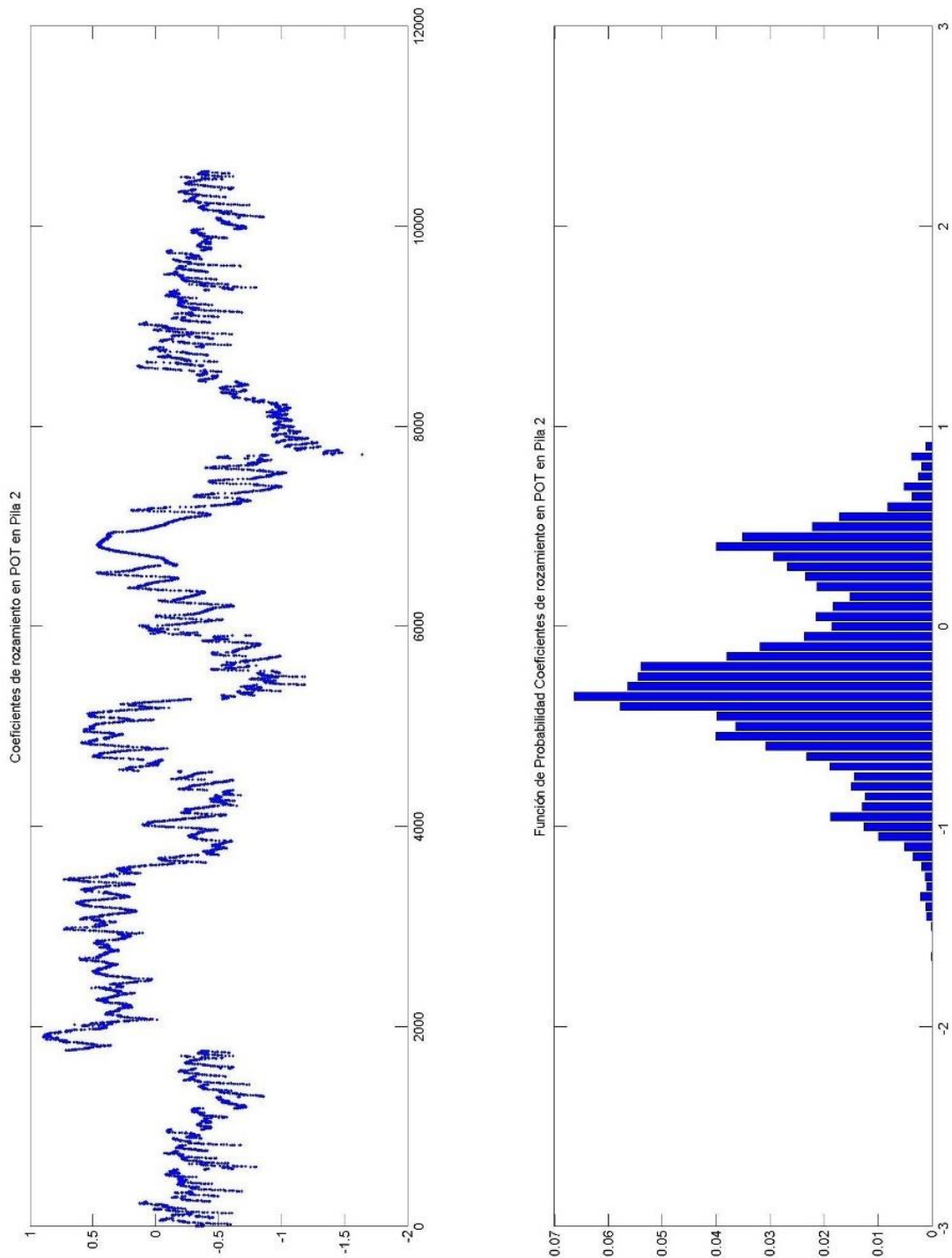


Figura 98. Estimación del coeficiente de deslizamiento (<math><5\%</math>). Aparato de apoyo sobre pila 2 desde agosto de 2012 a agosto de 2013.

4.2.11.2. Pila 3

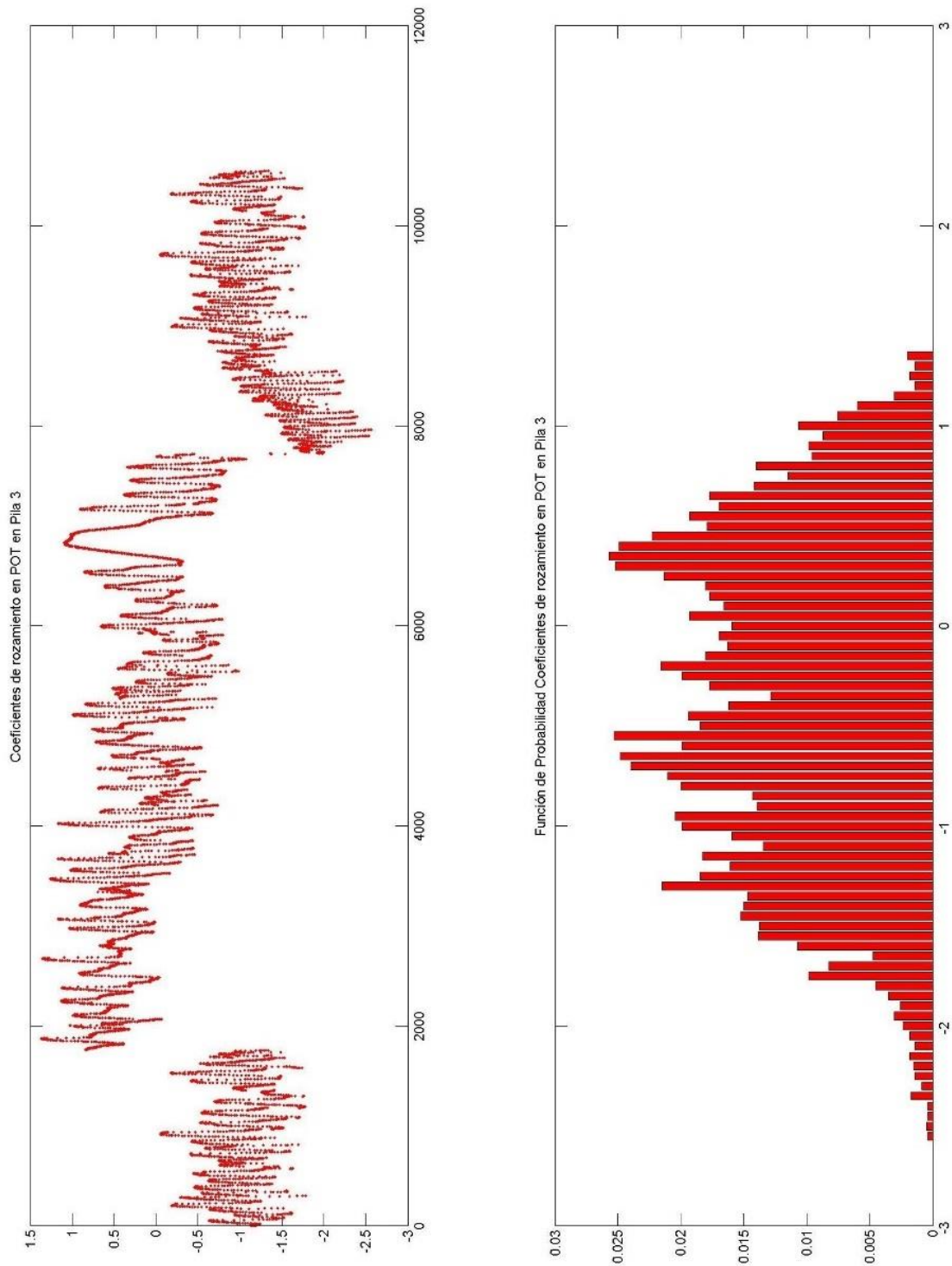


Figura 99. Estimación del coeficiente de deslizamiento (<5%). Aparato de apoyo sobre pila 3 desde agosto de 2012 a agosto de 2013.

4.2.12. Control Estadístico de calidad aplicado a los movimientos relativos tablero-pila

4.2.12.1. Ideas básicas

A continuación se incluyen los estudios de control de la variación, o rango R , y valor medio X a nivel diario de los movimientos relativos tablero-pila y tablero-estribo medidos por los transductores de desplazamiento.

Las series de datos en bruto registrados cada 10 minutos, presentan una clara estacionalidad por lo que se les aplica un control reactivo (filtrado) antes de concluir que la variable medida está bajo control o no, porque lo que se trata de controlar es, precisamente, la parte no explicable. Es decir, la serie registrada es, en sí misma, una superposición de efectos combinados y el objetivo último de este análisis es descomponer en los distintos efectos existentes hasta obtener una serie bajo control.

Si en vez de tratarse de series de datos de tipo lento o cuasi-estático se tratara de datos procedentes de acelerómetros se podría confirmar la existencia de un modo principal de periodo anual que domina el fenómeno físico estudiado. Una vez descontada la influencia de esa señal se obtiene una serie de valores variables con respecto a un valor medio constante en el tiempo. Parte de esa variación se deberá a causas inherentes al proceso y muy difícil de especificar (causas comunes o probables). Cuando éstas son las únicas causas de la variación, se dice que el proceso está en un estado de control estadístico o en control.

En los siguientes puntos se incluyen los valores en bruto de cada serie temporal, y se observa, claramente, la tendencia cíclica debida a la evolución térmica anual. Sobre estos valores se ajusta una función sinusoidal de periodo anual que se descuenta de la serie de datos originales obteniendo una nueva serie de datos modificada cuyos valores ya están centrados y que varían en un rango mucho inferior. Es sobre estos datos sobre los que se aplica la teoría del Control Estadístico para saber si la parte no explicada está bajo control o no.

Cuando no se filtran los datos se obtienen Diagramas de Control como el presentado en la Figura 101.

En este caso se representan los valores medios mensuales de \bar{X} observándose una clara tendencia sinusoidal debida a la tendencia media mensual de la temperatura a lo largo del año de registro.

| | | Media | Rango | SD | RANGO CENTRAL "R" | LIM SUP "R" | LIM INF "R" | RANGO CENTRAL "X" | LIM SUP "X" | LIM INF "X" |
|--------|----|-------|-------|------|-------------------|-------------|-------------|-------------------|-------------|-------------|
| ago-12 | 1 | -7.46 | 2.06 | 0.54 | 3.54 | 5.99 | 1.09 | -5.41 | -4.53 | -6.29 |
| sep-12 | 2 | -7.93 | 2.30 | 0.51 | 3.54 | 5.99 | 1.09 | -5.41 | -4.53 | -6.29 |
| oct-12 | 3 | -7.72 | 3.11 | 0.59 | 3.54 | 5.99 | 1.09 | -5.41 | -4.53 | -6.29 |
| nov-12 | 4 | -7.10 | 5.47 | 1.38 | 3.54 | 5.99 | 1.09 | -5.41 | -4.53 | -6.29 |
| dic-12 | 5 | -4.99 | 2.33 | 0.56 | 3.54 | 5.99 | 1.09 | -5.41 | -4.53 | -6.29 |
| ene-13 | 6 | -4.26 | 2.45 | 0.48 | 3.54 | 5.99 | 1.09 | -5.41 | -4.53 | -6.29 |
| feb-13 | 7 | -4.06 | 2.88 | 0.56 | 3.54 | 5.99 | 1.09 | -5.41 | -4.53 | -6.29 |
| mar-13 | 8 | -3.24 | 4.87 | 1.24 | 3.54 | 5.99 | 1.09 | -5.41 | -4.53 | -6.29 |
| abr-13 | 9 | -2.54 | 5.08 | 1.15 | 3.54 | 5.99 | 1.09 | -5.41 | -4.53 | -6.29 |
| may-13 | 10 | -2.44 | 4.85 | 1.06 | 3.54 | 5.99 | 1.09 | -5.41 | -4.53 | -6.29 |
| jun-13 | 11 | -5.26 | 4.93 | 0.83 | 3.54 | 5.99 | 1.09 | -5.41 | -4.53 | -6.29 |
| jul-13 | 12 | -5.67 | 3.29 | 0.81 | 3.54 | 5.99 | 1.09 | -5.41 | -4.53 | -6.29 |
| ago-13 | 13 | -7.71 | 2.38 | 0.55 | 3.54 | 5.99 | 1.09 | -5.41 | -4.53 | -6.29 |
| | | -5.41 | 3.54 | 0.79 | | | | | | |

Figura 100. Cálculo del Diagrama de Control estadístico “R” y “ \bar{X} ” de los movimientos relativos longitudinales tablero-estribo1. Análisis Mensual.

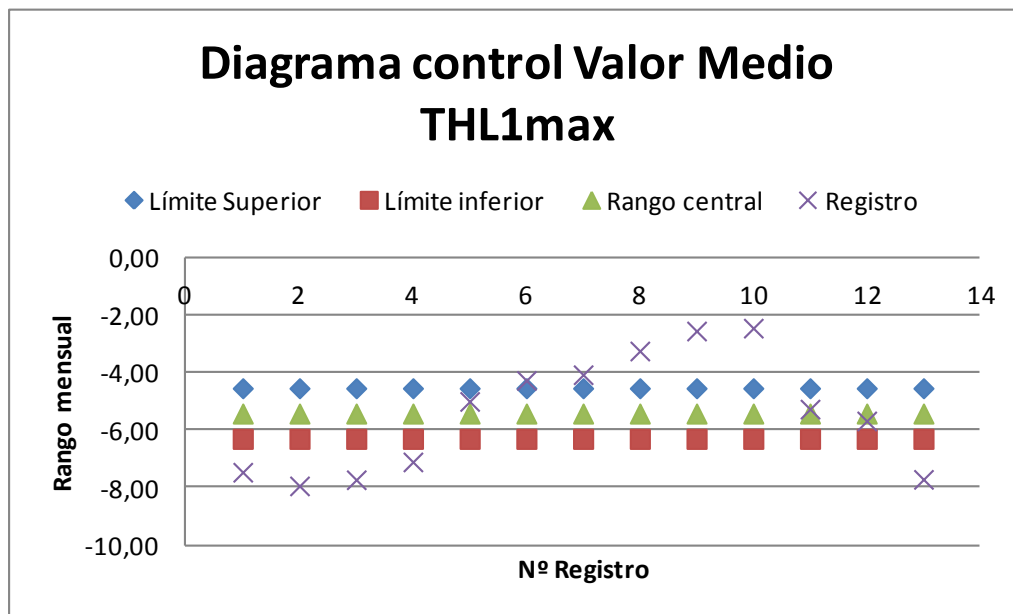


Figura 101. Diagrama de Control estadístico “X” de los movimientos relativos longitudinales máximos tablero-estribo1. Análisis Mensual.

El fallo en este tipo de análisis reside precisamente en intentar aplicar el control estadístico sobre una serie condicionada por una causa especial como puede ser la temperatura media anual.

4.2.12.2. Obtención de Diagramas de Control para los movimientos relativos tablero-pila y tablero-estribo

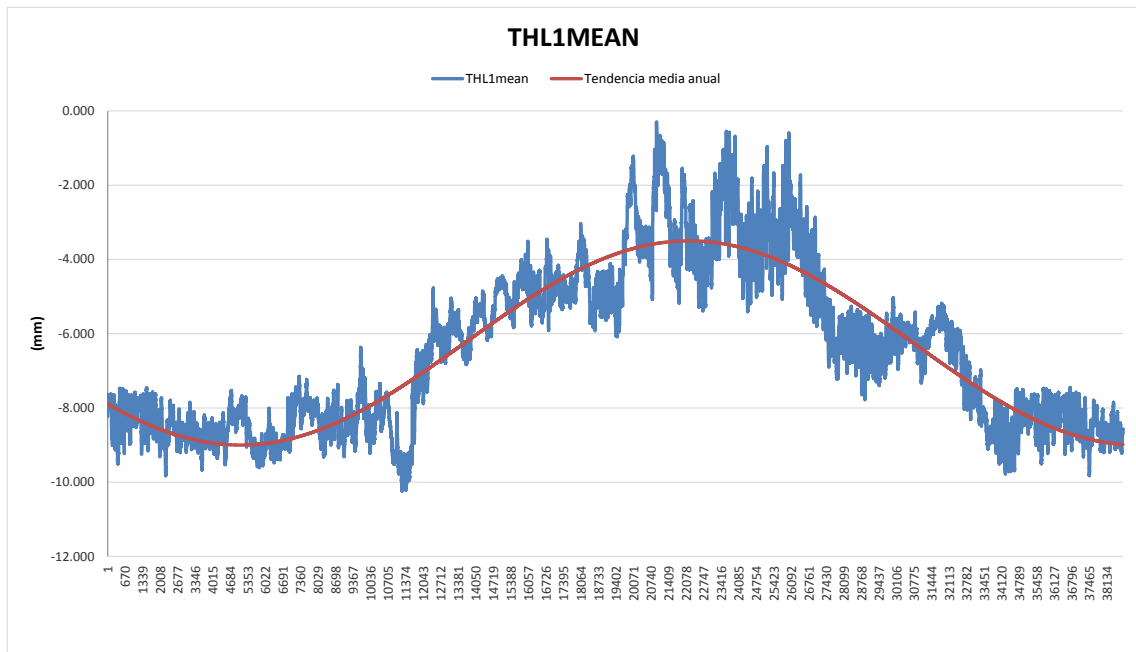


Figura 102. Valores del movimiento relativo tablero-estribo 1 y superposición de la tendencia de periodo anual debida a temperatura.

En la Figura 102 se representan los valores registrados cada diez minutos del movimiento relativo tablero-estribo 1 en color azul. Superpuesto (rojo) a este registro se presenta la línea de tendencia sinusoidal de periodo anual que mejor se ajusta a esos datos y que se descontará de los mismos.

En la Figura 103 se representan los valores del movimiento relativo tablero-estribo 1 filtrados descontando el efecto de la oscilación de la temperatura de periodo anual. Se puede apreciar cómo se reduce la variabilidad de la serie en un 40% aproximadamente y como se pasa a obtener una serie de datos centrada en un valor constante en el tiempo. Es sobre esta serie sobre la que se plantean los Diagramas de Control que se recogen en las Figuras 104 y 105.

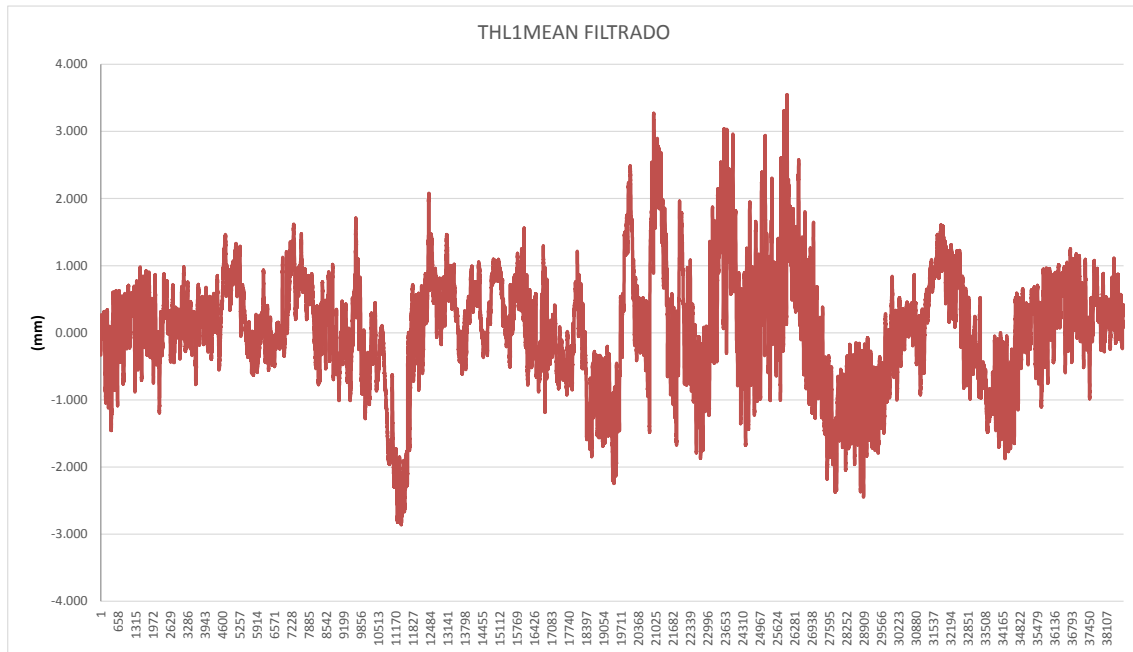


Figura 103. Valores del movimiento relativo tablero-estribo 1 filtrados descontando el efecto de la oscilación de la temperatura de periodo anual.

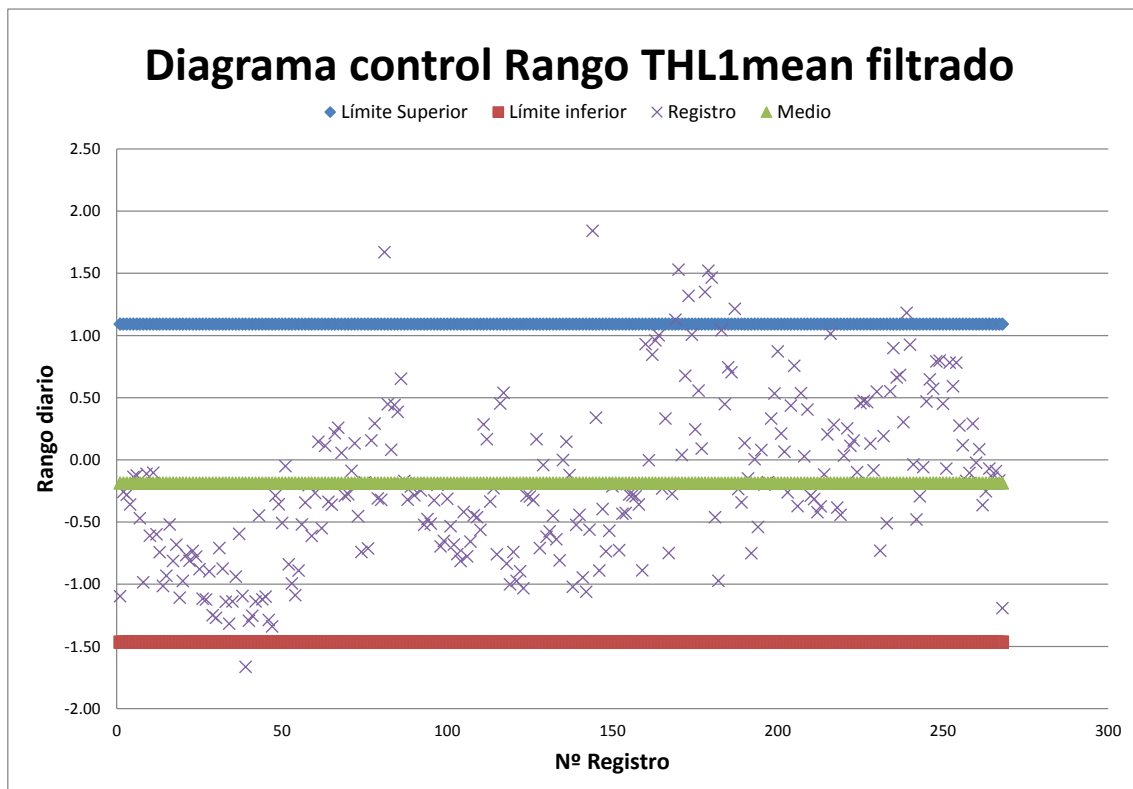


Figura 104. Diagramas de Control estadístico de calidad del Rango de los movimientos relativos longitudinales tablero-estribo1. $C=1$.

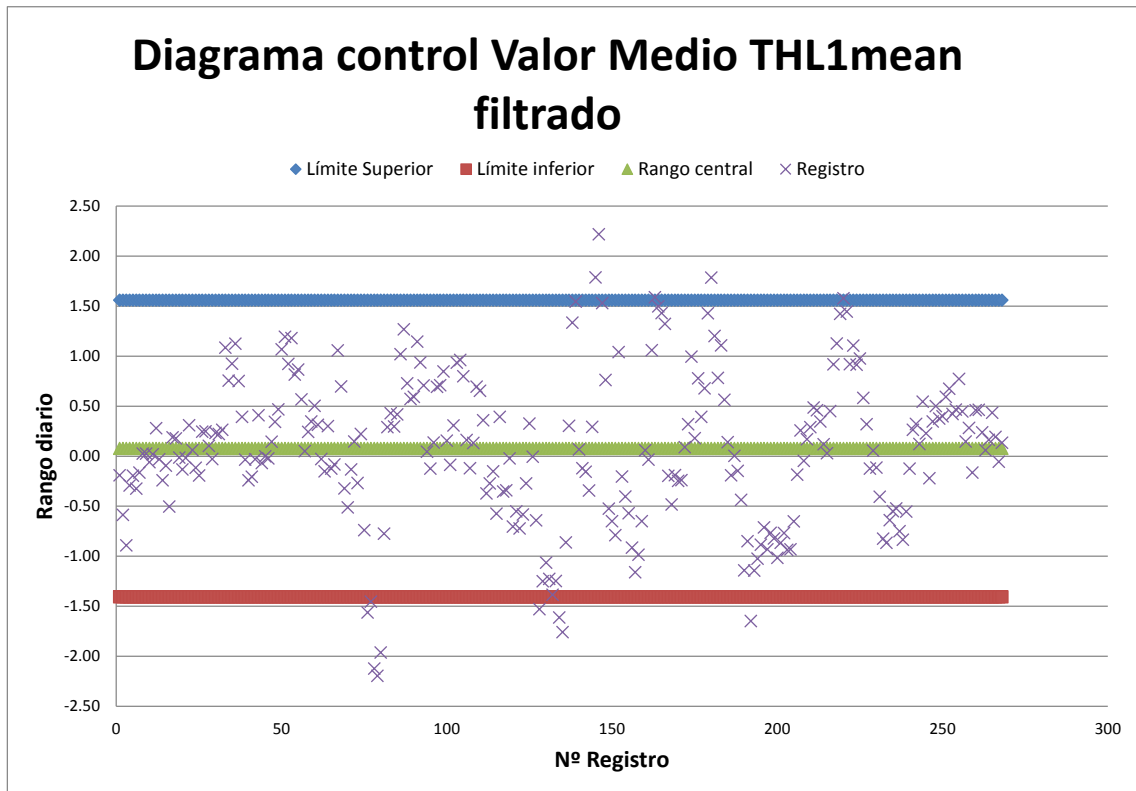


Figura 105. Diagramas de Control estadístico de calidad del Valor Medio de los movimientos relativos longitudinales tablero-estribo1. $C=1$.

Atendiendo a los Diagramas de Control recogidos en las Figuras 104 y 105 se puede concluir que está bajo control en R y en \bar{X} y, por lo tanto, la calidad de los datos es suficientemente fiable como para que los posteriores estudios de predicción desarrollados sean mínimamente robustos.

A pesar de que hay algunos puntos que quedan fuera de los límites superior e inferior debe tenerse en cuenta que se está estudiando con medidas de orden milimétrico y, por lo tanto, esos puntos fuera de control no son significativos para el fenómeno físico estudiado.

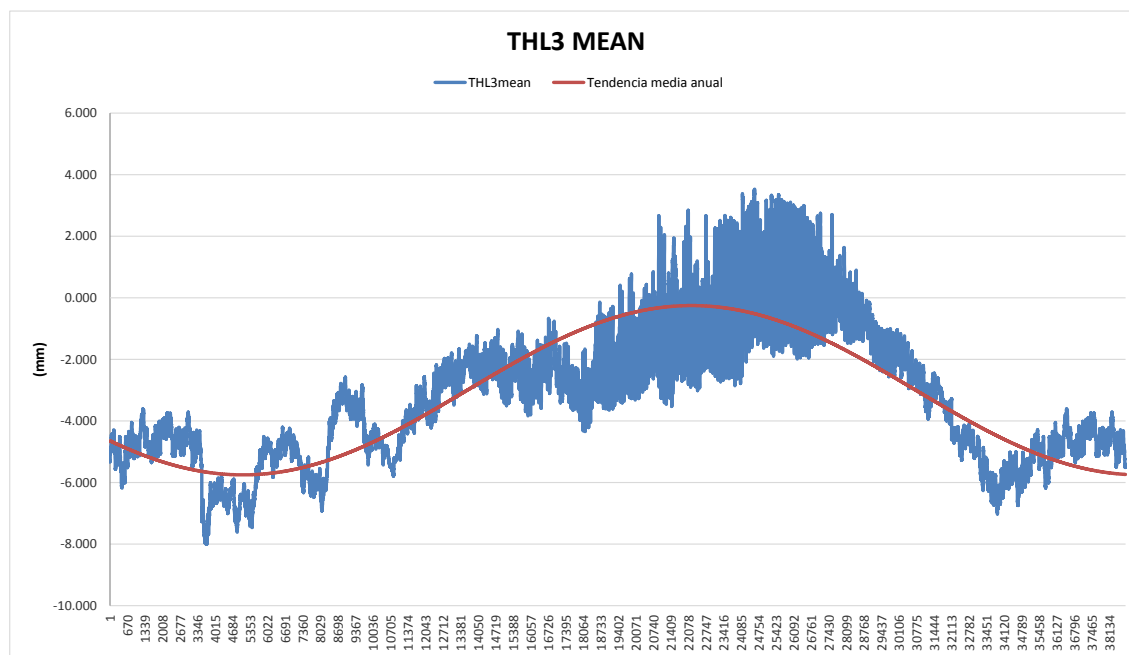


Figura 106. Valores del movimiento relativo tablero-pila 2 y superposición de la tendencia de periodo anual debida a temperatura.

En la Figura 106 se representan los valores registrados cada diez minutos del movimiento relativo tablero-pila 2 en color azul. Superpuesto (rojo) a este registro se presenta la línea de tendencia sinusoidal de periodo anual que mejor se ajusta a esos datos y que se descontará de los mismos.

En la Figura 107 se representan los valores del movimiento relativo tablero-pila 2 filtrados descontando el efecto de la oscilación de la temperatura de periodo anual. Se puede apreciar cómo se reduce la variabilidad de la serie en un 40% aproximadamente y como se pasa a obtener una serie de datos centrada en un valor constante en el tiempo. Es sobre esta serie sobre la que se plantean los Diagramas de Control que se recogen en las Figuras 108 y 109.

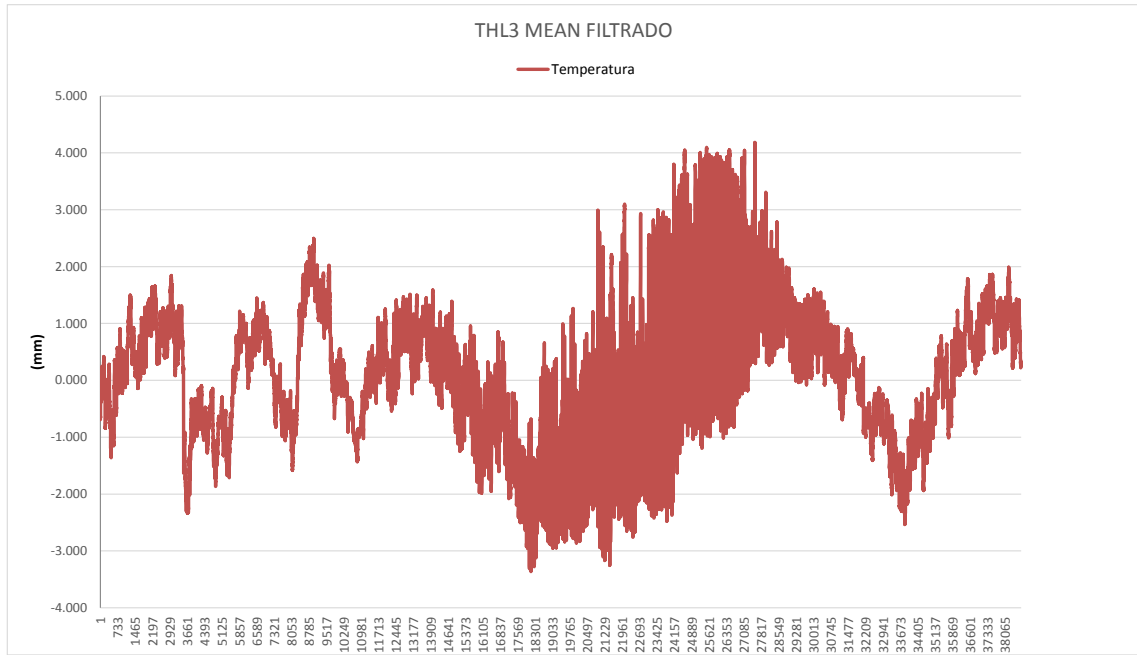


Figura 107. Valores del movimiento relativo tablero-pila 2 filtrados descontando el efecto de la oscilación de la temperatura de periodo anual.

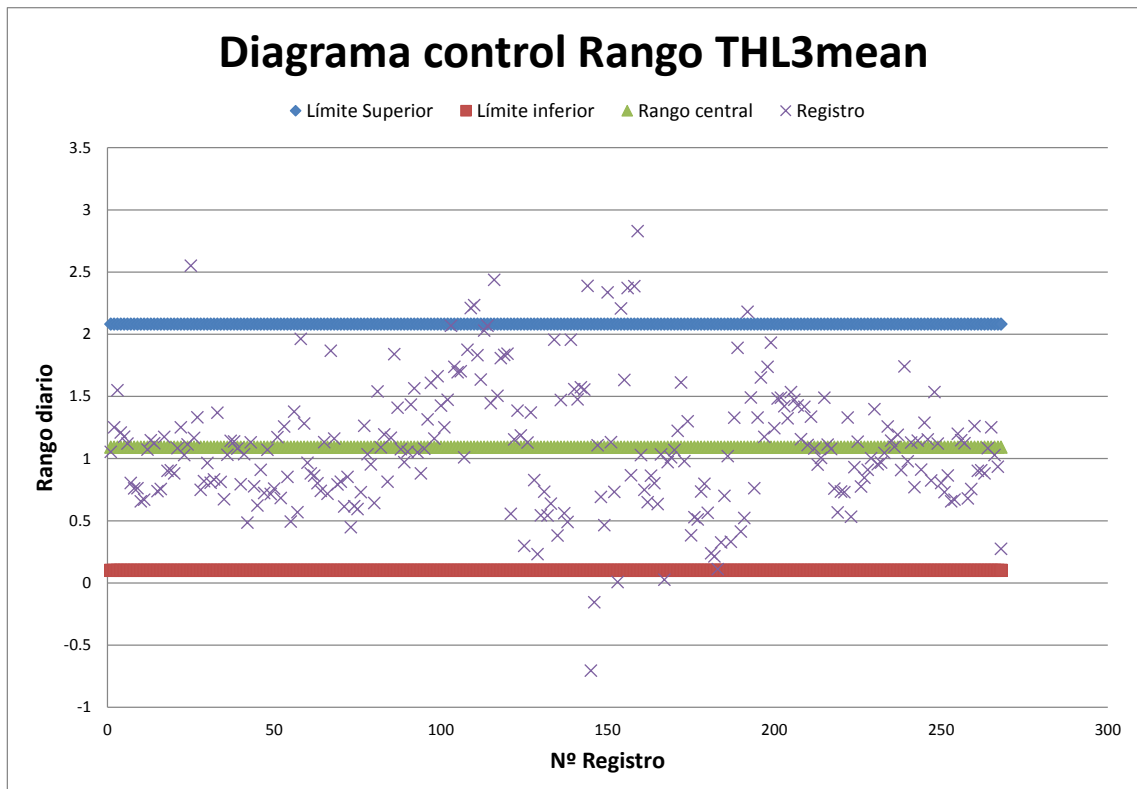


Figura 108. Diagramas de Control estadístico de calidad del Rango de los movimientos relativos longitudinales tablero-pila 2. $C=1$.

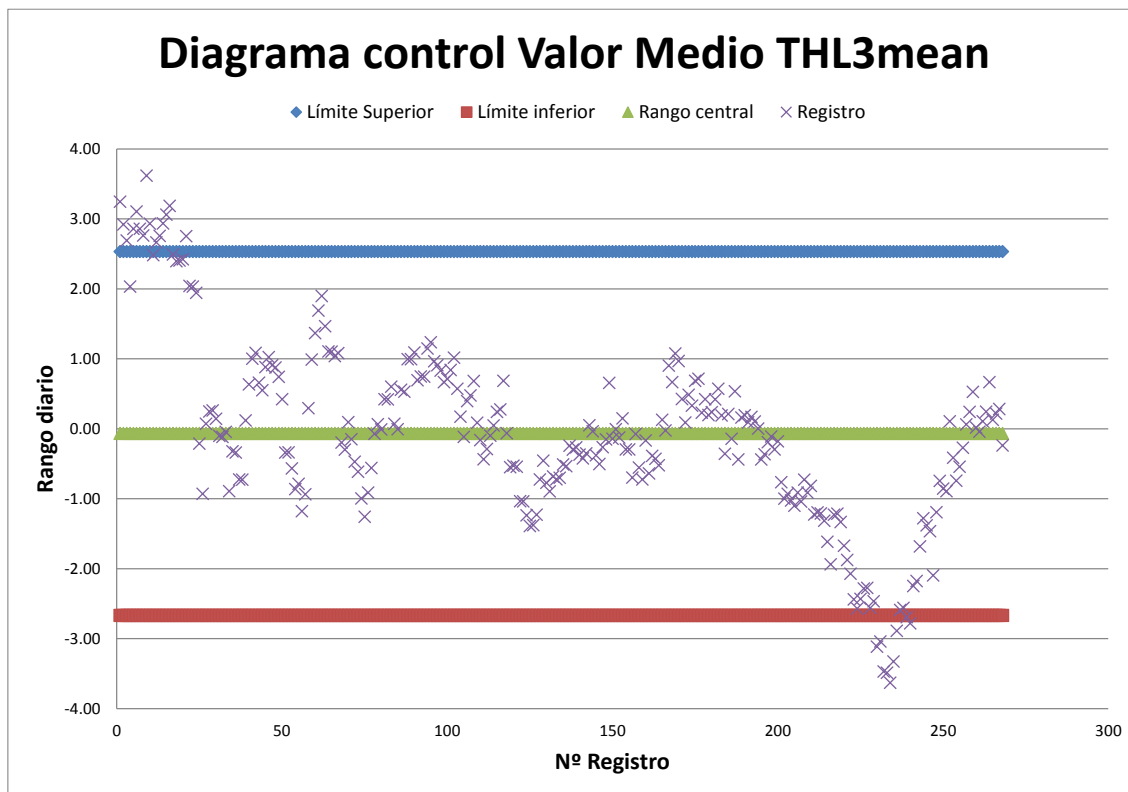


Figura 109. Diagramas de Control estadístico de calidad del Valor Medio de los movimientos relativos longitudinales (mm) tablero-pila 2. $C=1$.

Atendiendo a los Diagramas de Control recogidos en las Figuras 108 y 109 se puede concluir que la está bajo control en R y en \bar{X} y, por lo tanto, la calidad de los datos es suficientemente fiable como para que los posteriores estudios de predicción desarrollados sean mínimamente robustos.

A pesar de que hay algunos puntos que quedan fuera de los límites superior e inferior debe tenerse en cuenta que se está estudiando con medidas de orden milimétrico y, por lo tanto, esos puntos fuera de control no son significativos para el fenómeno físico estudiado.

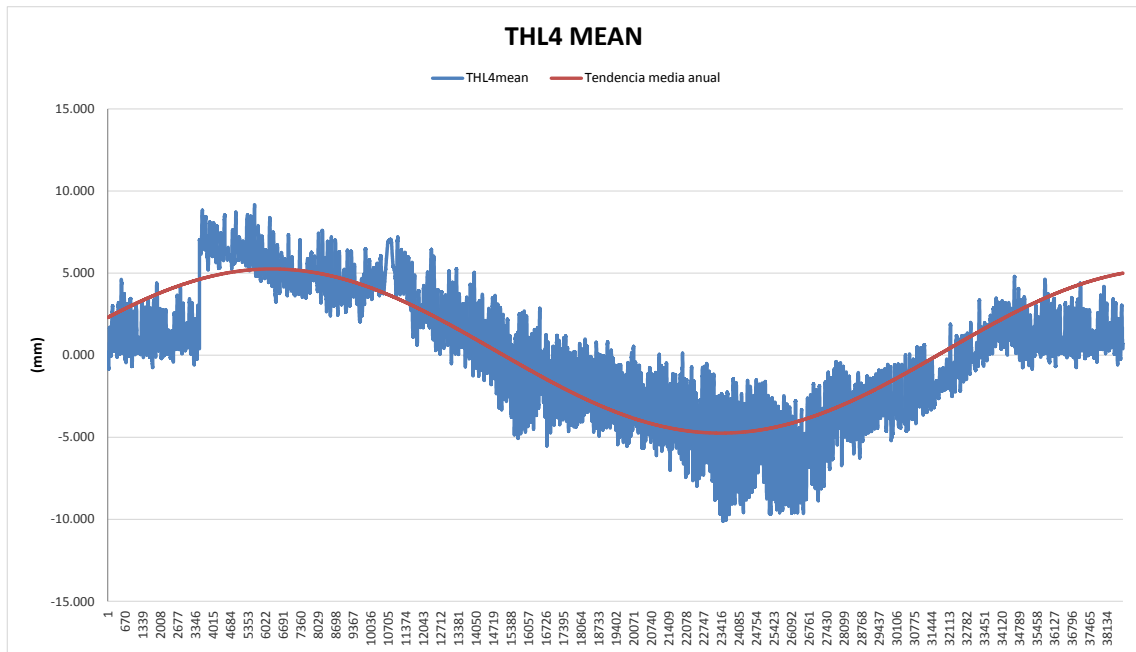


Figura 110. Valores del movimiento relativo tablero-pila 3 y superposición de la tendencia de periodo anual debida a temperatura.

En la Figura 110 se representan los valores registrados cada diez minutos del movimiento relativo tablero-pila 3 en color azul. Superpuesto (rojo) a este registro se presenta la línea de tendencia sinusoidal de periodo anual que mejor se ajusta a esos datos y que se descontará de los mismos.

En la Figura 111 se representan los valores del movimiento relativo tablero-pila 3 filtrados descontando el efecto de la oscilación de la temperatura de periodo anual. Se puede apreciar cómo se reduce la variabilidad de la serie en un 40% aproximadamente y como se pasa a obtener una serie de datos centrada en un valor constante en el tiempo. Es sobre esta serie sobre la que se plantean los Diagramas de Control que se recogen en las Figuras 112 y 113.

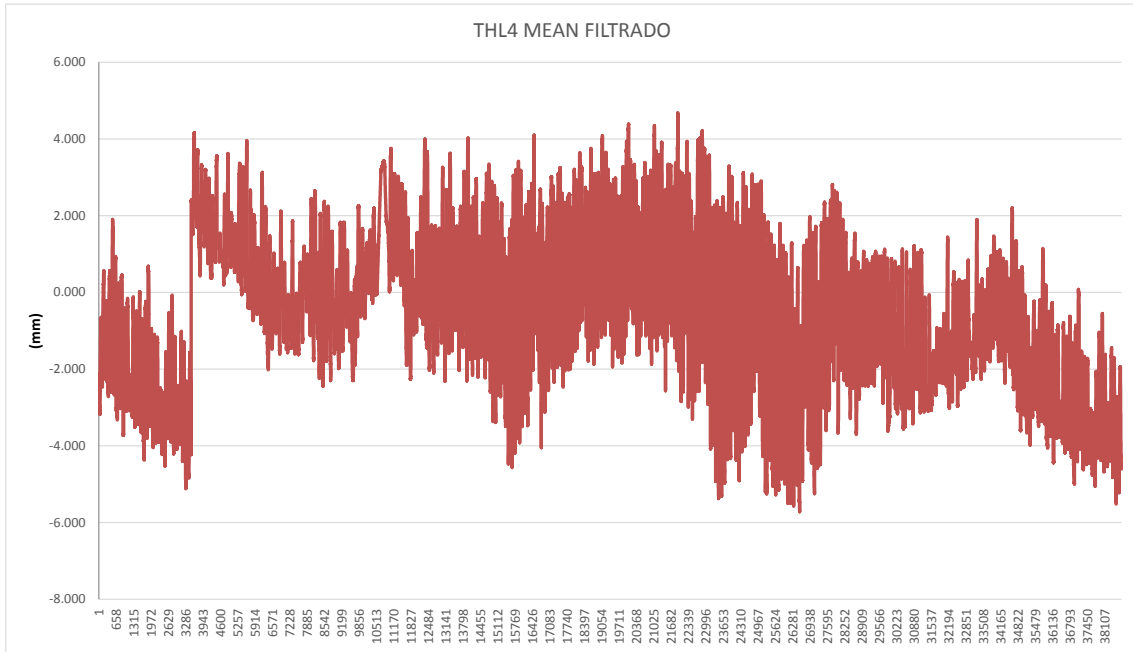


Figura 111. Valores del movimiento relativo tablero-pila 3 filtrados descontando el efecto de la oscilación de la temperatura de periodo anual.

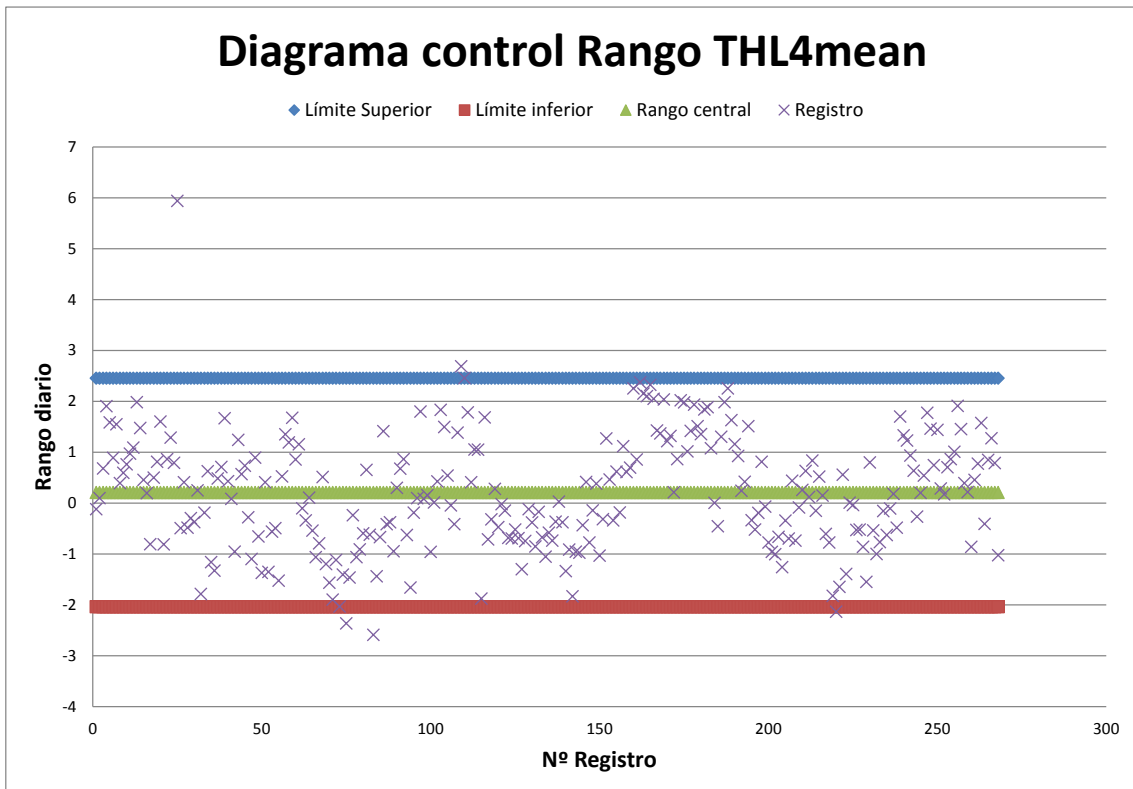


Figura 112. Diagramas de Control estadístico de calidad del Rango de los movimientos relativos longitudinales tablero-pila 3. $C=1$.

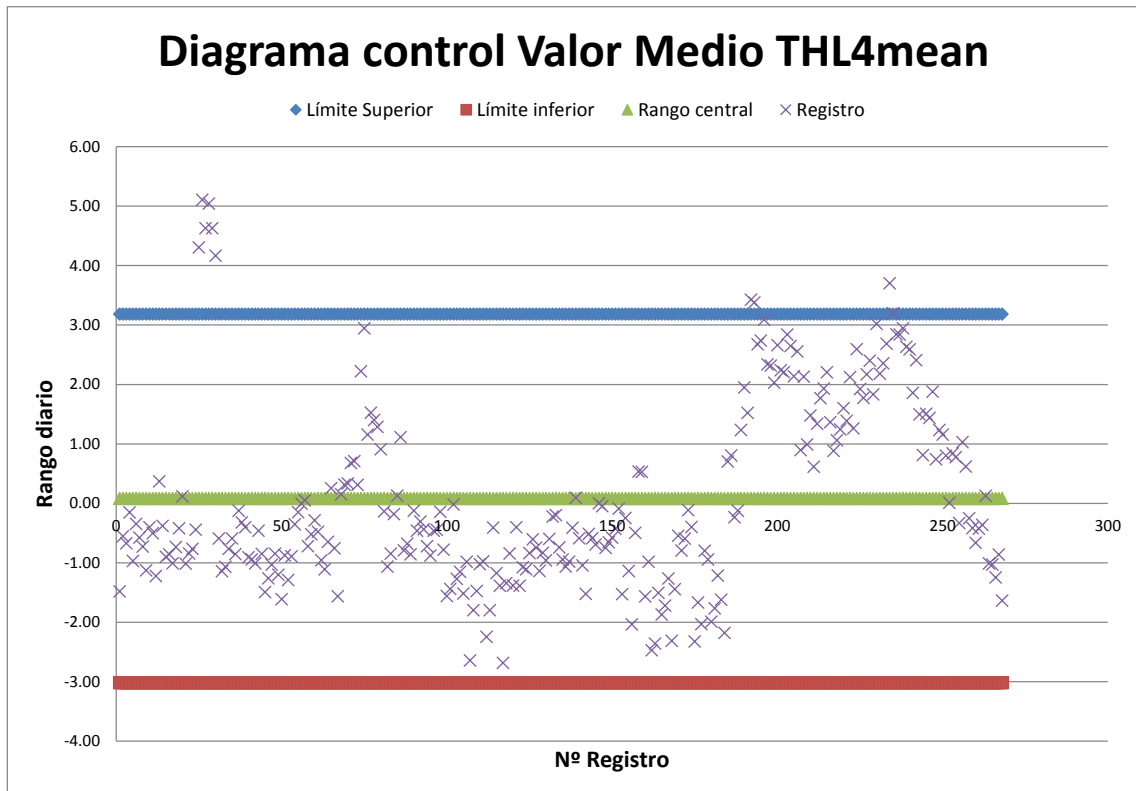


Figura 113. Diagramas de Control estadístico de calidad del Valor Medio de los movimientos relativos longitudinales (mm) tablero-pila 3. $C=1$.

Atendiendo a los Diagramas de Control recogidos en las Figuras 112 y 113 se puede concluir que la está bajo control en R y en \bar{X} y, por lo tanto, la calidad de los datos es suficientemente fiable como para que los posteriores estudios de predicción desarrollados sean mínimamente robustos.

A pesar de que hay algunos puntos que quedan fuera de los límites superior e inferior debe tenerse en cuenta que se está estudiando con medidas de orden milimétrico y, por lo tanto, esos puntos fuera de control no son significativos para el fenómeno físico estudiado.

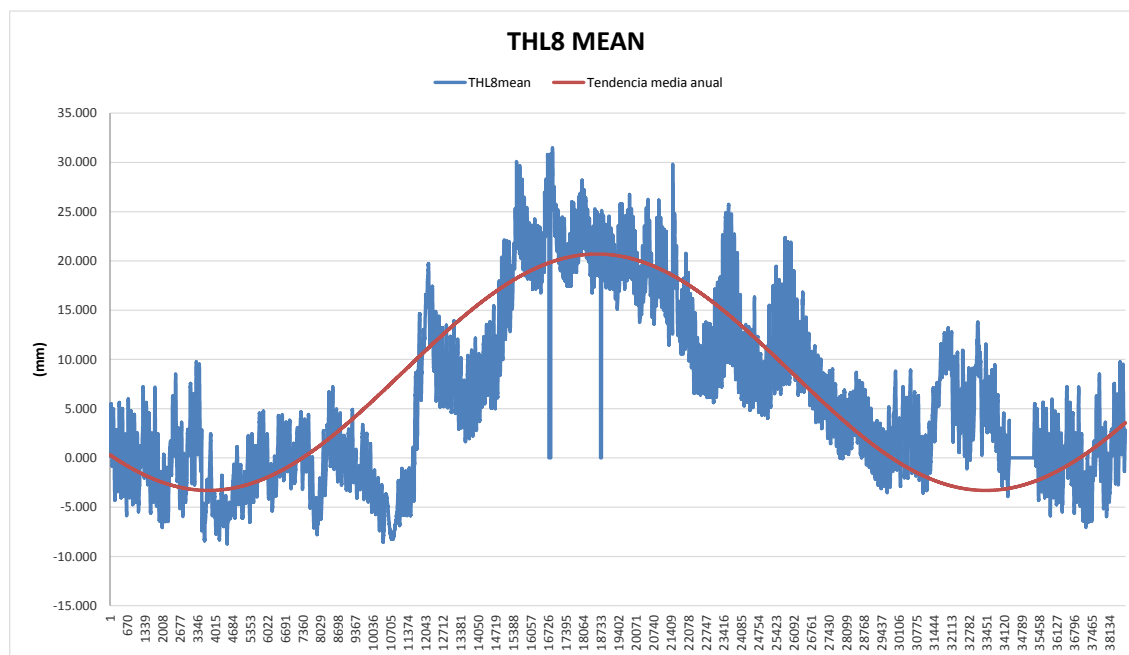


Figura 114. Valores del movimiento relativo tablero-estribo 2 y superposición de la tendencia de periodo anual debida a temperatura.

En la Figura 114 se representan los valores registrados cada diez minutos del movimiento relativo tablero-estribo 2 en color azul. Superpuesto (rojo) a este registro se presenta la línea de tendencia sinusoidal de periodo anual que mejor se ajusta a esos datos y que se descontará de los mismos.

En la Figura 115 se representan los valores del movimiento relativo tablero-estribo 2 filtrados descontando el efecto de la oscilación de la temperatura de periodo anual. Se puede apreciar cómo se reduce la variabilidad de la serie en un 20% aproximadamente y como se pasa a obtener una serie de datos centrada en un valor constante en el tiempo. Es sobre esta serie sobre la que se plantean los Diagramas de Control que se recogen en las Figuras 116 y 117.

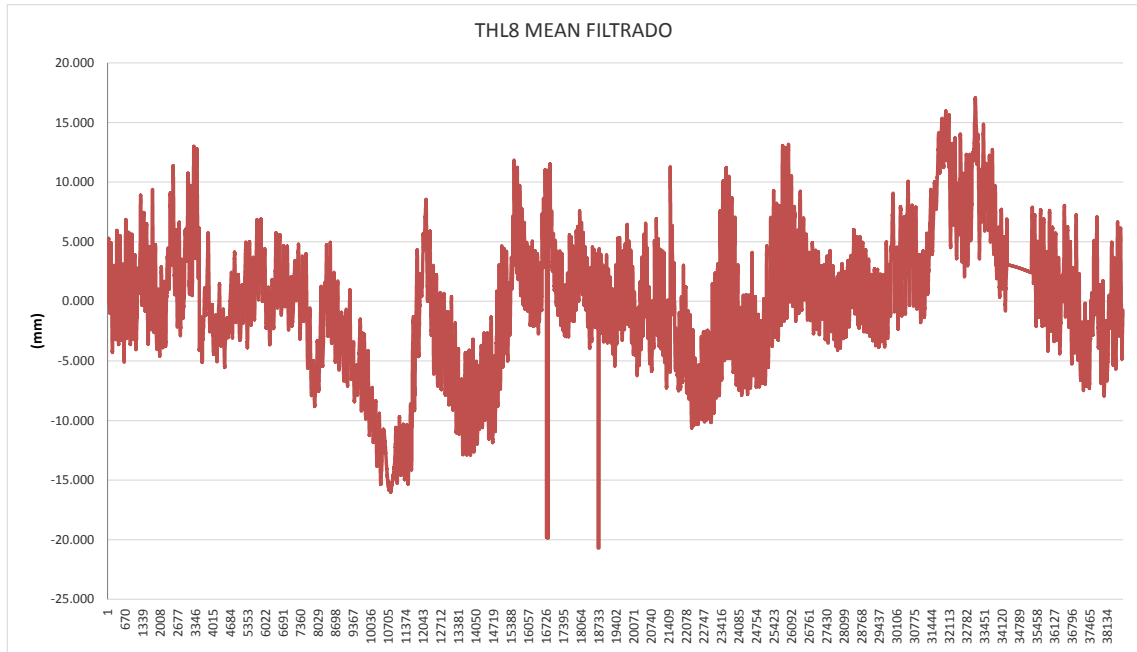


Figura 115. Valores del movimiento relativo tablero-estribo 2 filtrados descontando el efecto de la oscilación de la temperatura de periodo anual.

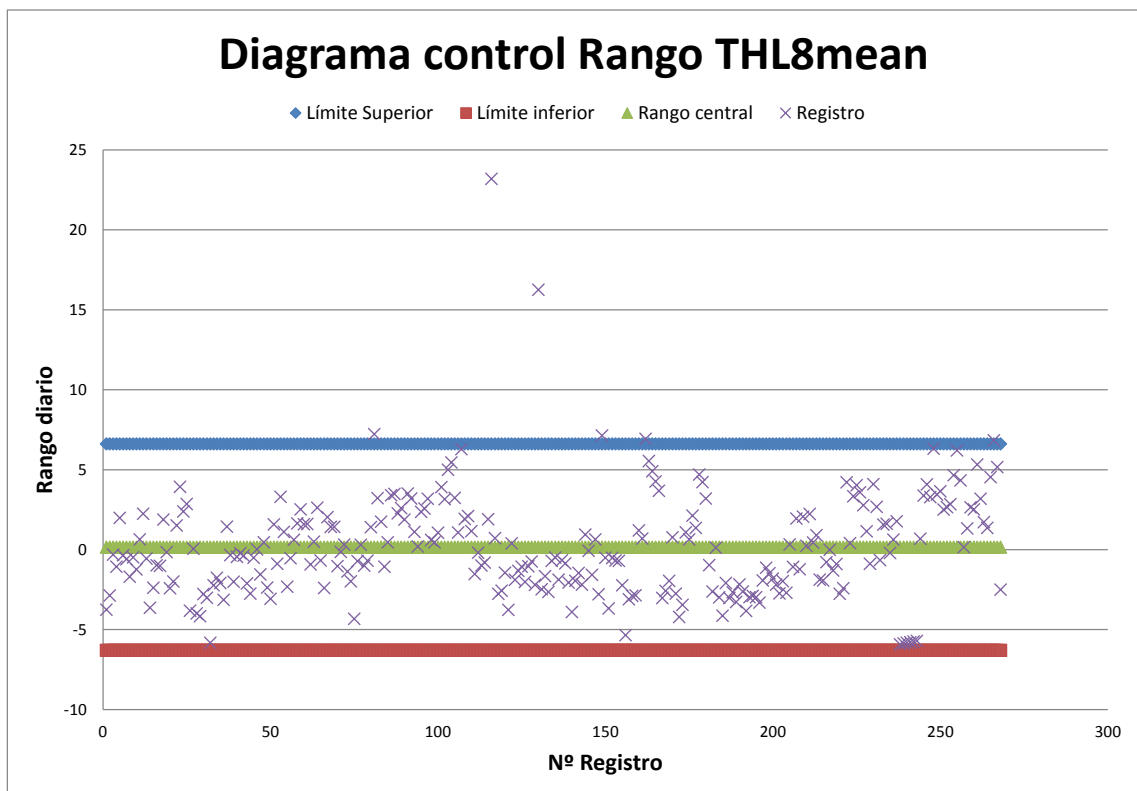


Figura 116. Diagramas de Control estadístico de calidad del Rango de los movimientos relativos longitudinales (mm) tablero-estribo 2. $C=1$.

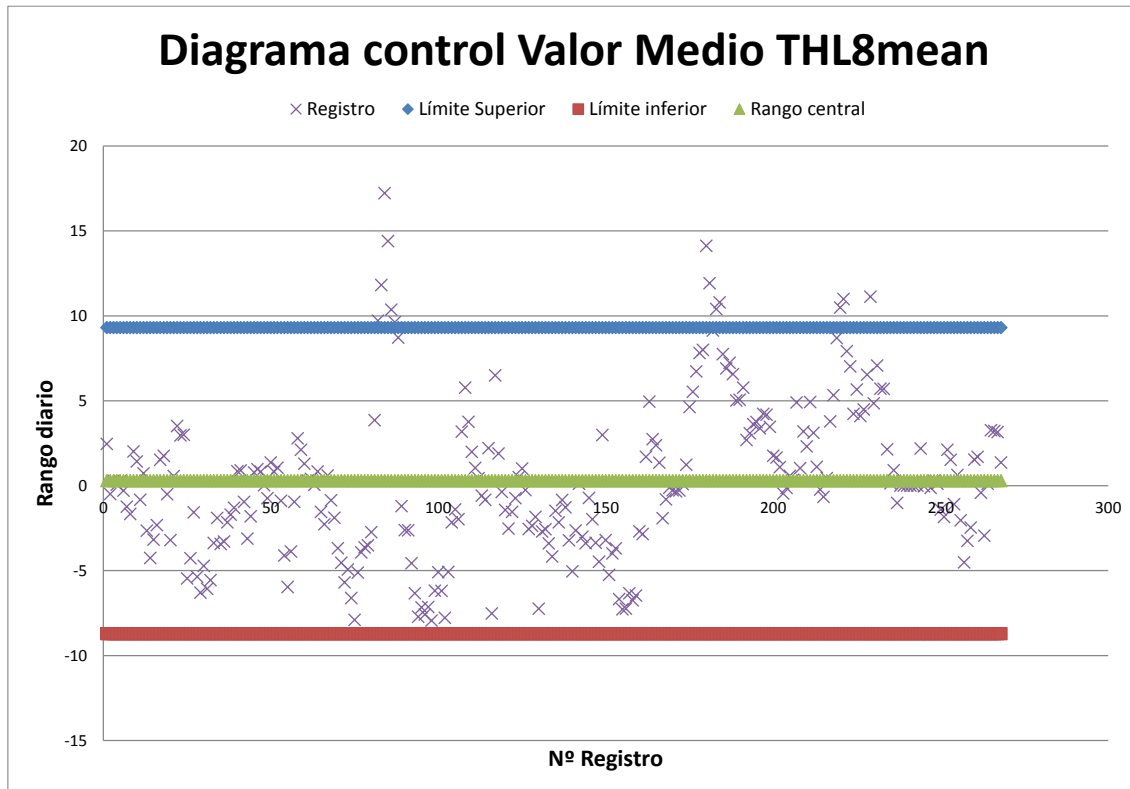


Figura 117. Diagramas de Control estadístico de calidad del Valor Medio de los movimientos relativos longitudinales (mm) tablero-estribo 2. C=1.

Atendiendo a los Diagramas de Control recogidos en las Figuras 116 y 117 se puede concluir que la está bajo control en R y en \bar{X} y, por lo tanto, la calidad de los datos es suficientemente fiable como para que los posteriores estudios de predicción desarrollados sean mínimamente robustos.

A pesar de que hay algunos puntos que quedan fuera de los límites superior e inferior debe tenerse en cuenta que se está estudiando con medidas de orden milimétrico y, por lo tanto, esos puntos fuera de control no son significativos para el fenómeno físico estudiado.

4.2.13. Inferencia estadística. Bandas de Predicción para futuras observaciones de los movimientos relativo tablero-pila y tablero-estribo

La utilidad de estas gráficas radica en la capacidad de predecir, conociendo el comportamiento en un aparato de apoyo, el comportamiento en otro cualquiera que haya sido monitorizado.

Las Bandas de Predicción diaria requieren la toma de datos durante un día por lo que serían de utilidad en una inspección rutinaria. De esta manera, al conocer el valor medio del desplazamiento relativo tablero-pila o tablero-estribo se podría estimar la de otro punto y valorar, cuantitativamente, la posible existencia del funcionamiento anómalo en los apoyos con el consecuente riesgo de fisuración en base de pila.

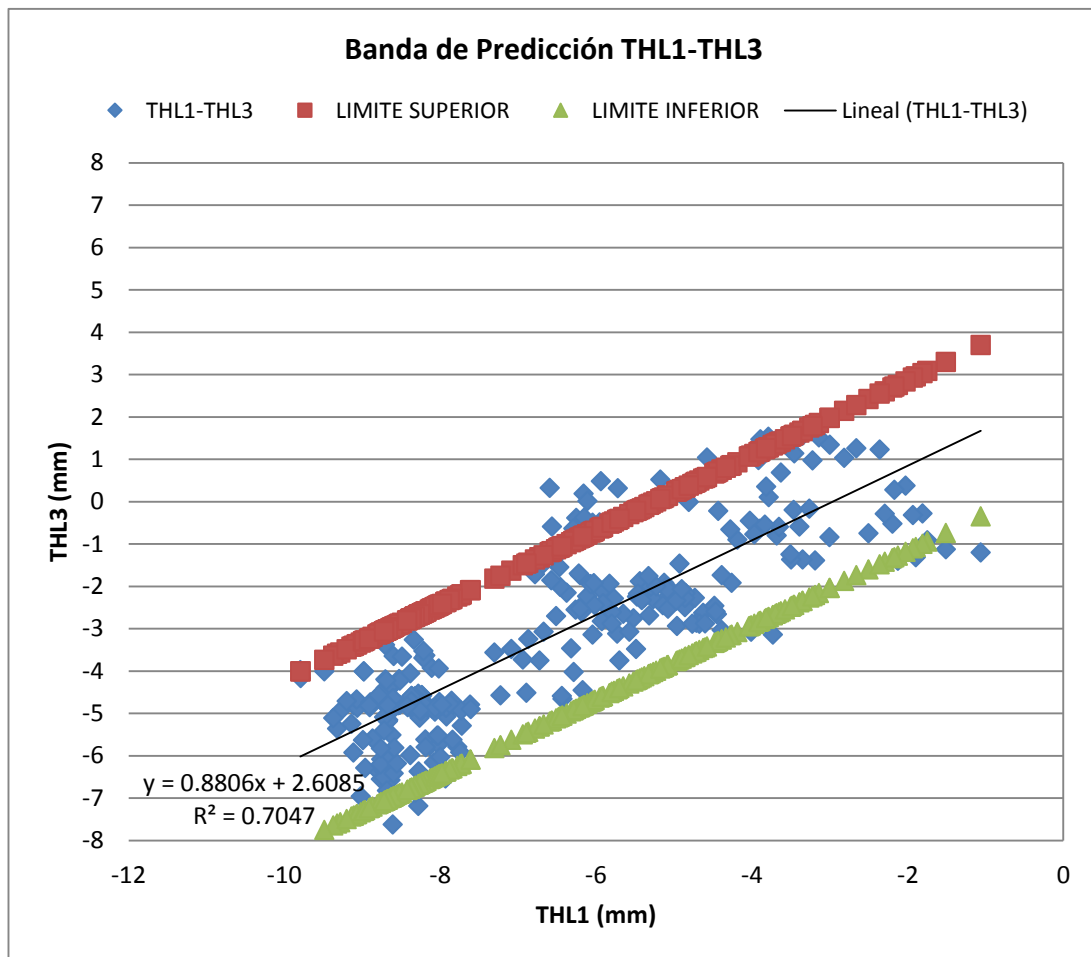


Figura 118. Aspecto de la banda de predicción calculada para el caso de THL1 mean en función de THL3mean. $\alpha = 10\%$ $R > 85\%$

Con la figura superior se confirma que puesto que se ponen en relación el movimiento relativo en el estribo 1 y el movimiento relativo sobre pila 2 la correlación tiene que ser forzosamente alta por venir ambas condicionadas por la temperatura (que va a ser la misma) y la rigidez de una única pila.

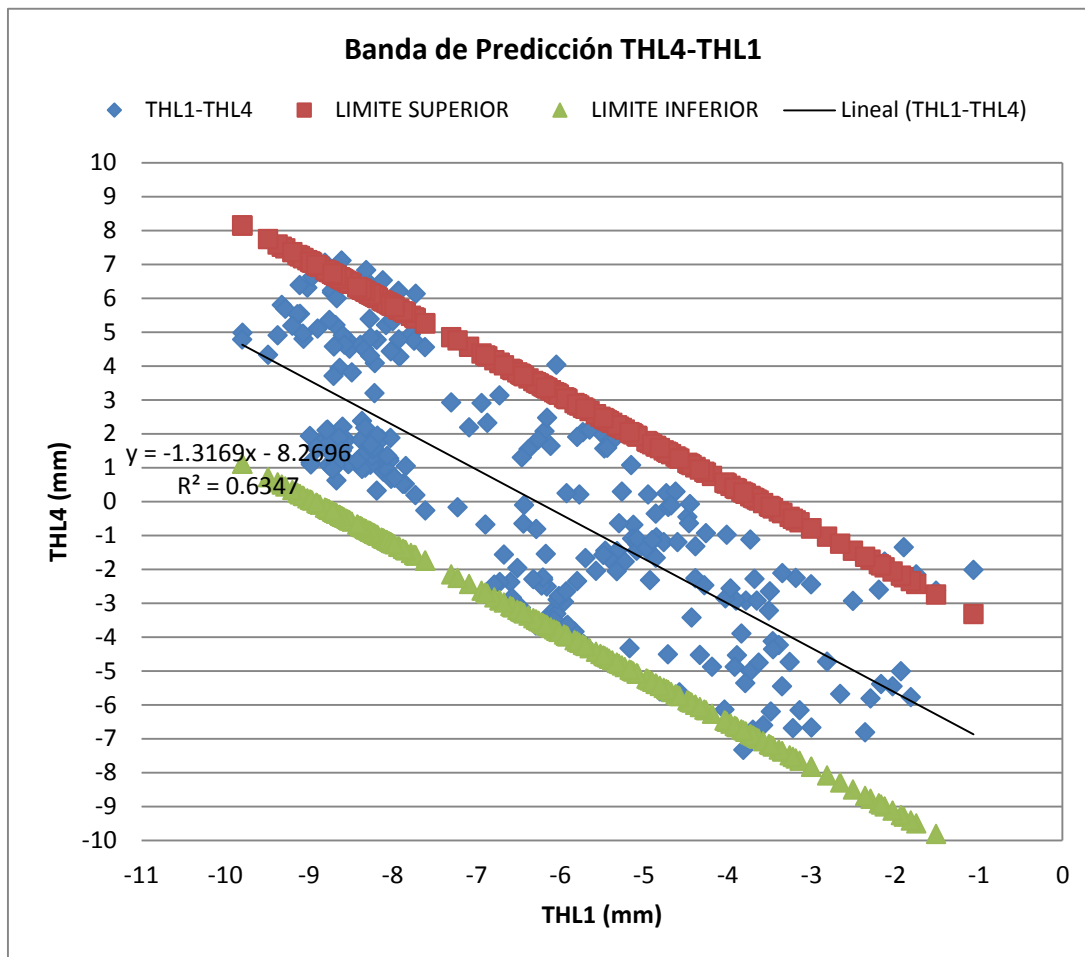


Figura 119. Aspecto de la banda de predicción calculada para el caso de THL1 mean en función de THL4mean. $\alpha = 10\%$ $R \approx 80\%$

Lo mismo ocurre cuando se pone en relación el movimiento relativo en el estribo 1 y el movimiento relativo sobre pila 3, tal y como se representa en le Figura 119.

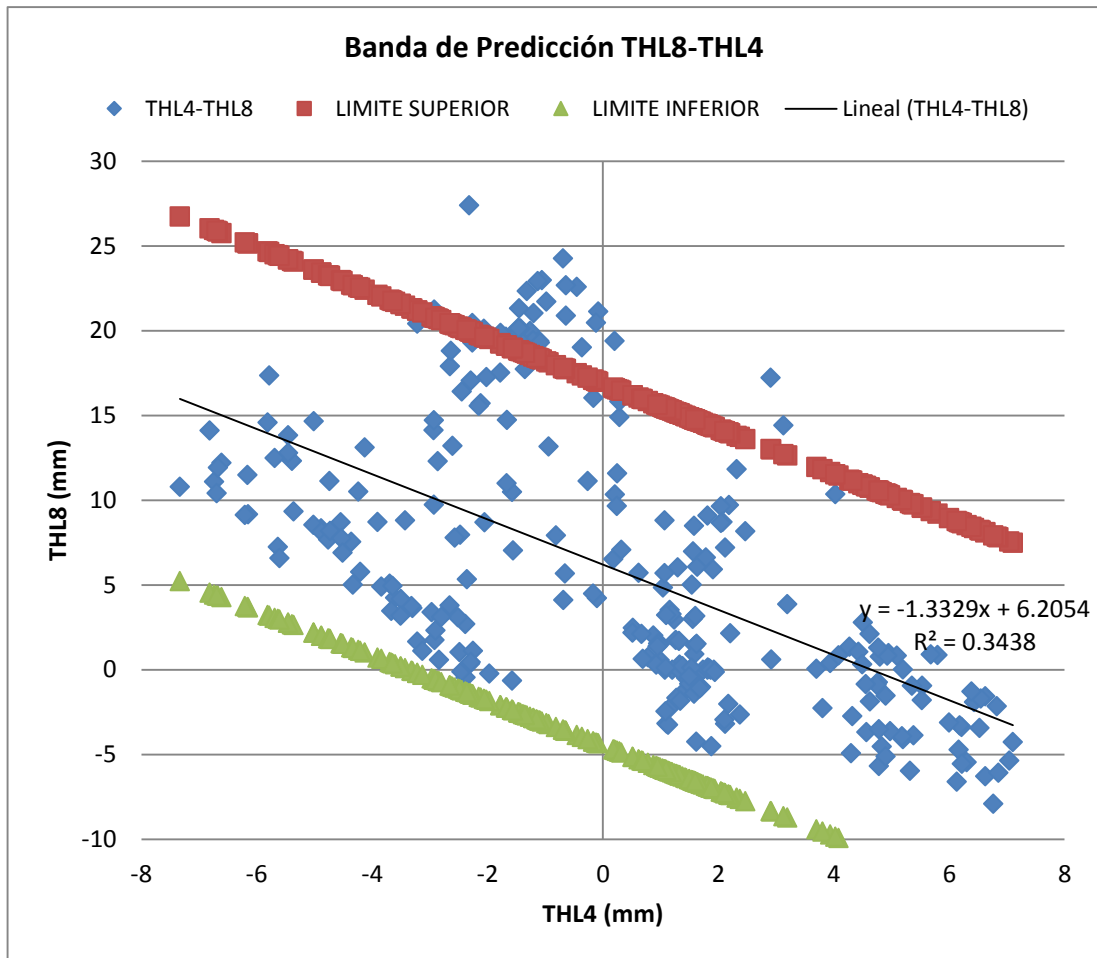


Figura 120. Aspecto de la banda de predicción calculada para el caso de THL8 mean en función de THL4mean. $\alpha = 10\%$ $R < 80\%$

En la Figura 120 se ponen en relación los movimientos relativos en la pila 3 y el estribo 2. En este caso los movimientos dependen de longitudes de libre dilatación diferente y fuertemente condicionada por la rigidez de la pila 3.

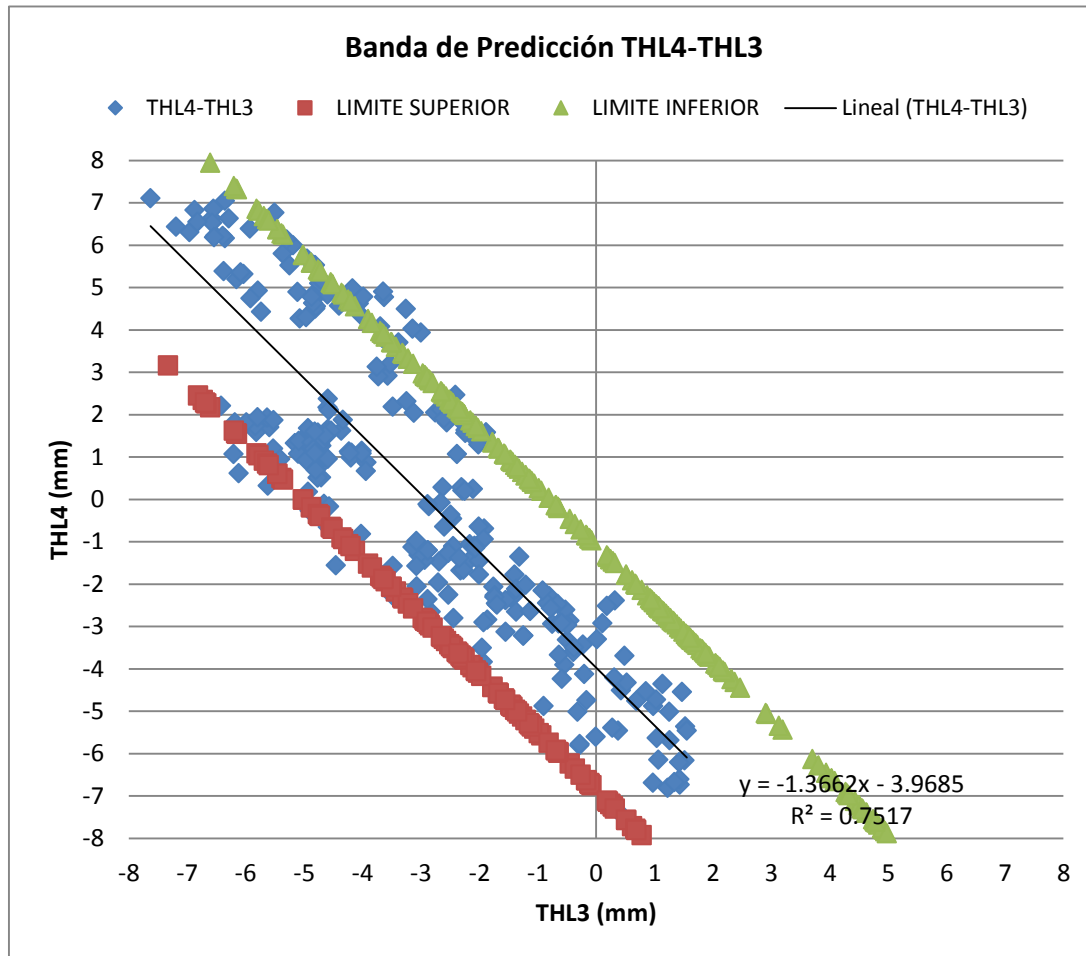


Figura 121. Aspecto de la banda de predicción calculada para el caso de THL3 mean en función de THL4mean. $\alpha = 10\%$ $R > 85\%$.

En la Figura 121 se ponen en relación los movimientos relativos en la pila 2 y 3. En este caso los movimientos dependen de la temperatura y de la rigidez de las pilas que es la misma. Por lo tanto, la correlación debe ser forzosamente alta.

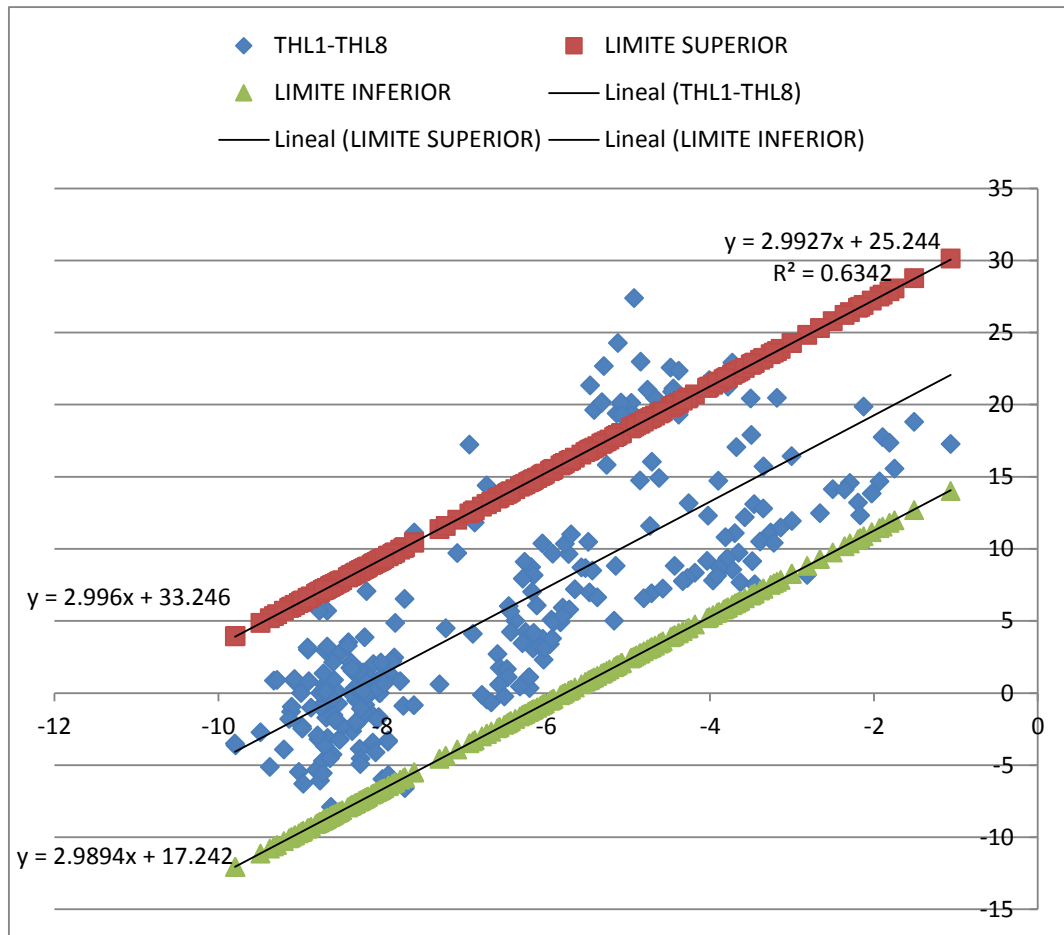


Figura 122. Aspecto de la banda de predicción calculada para el caso de $THL1_{mean}$ en función de $THL8_{mean}$. $\alpha = 90\%$ $R \approx 80\%$.

En la Figura 122 se ponen en relación los movimientos relativos en los estribos 1 y 2. En este caso los movimientos dependen de la temperatura y de la rigidez las pilas intermedias.

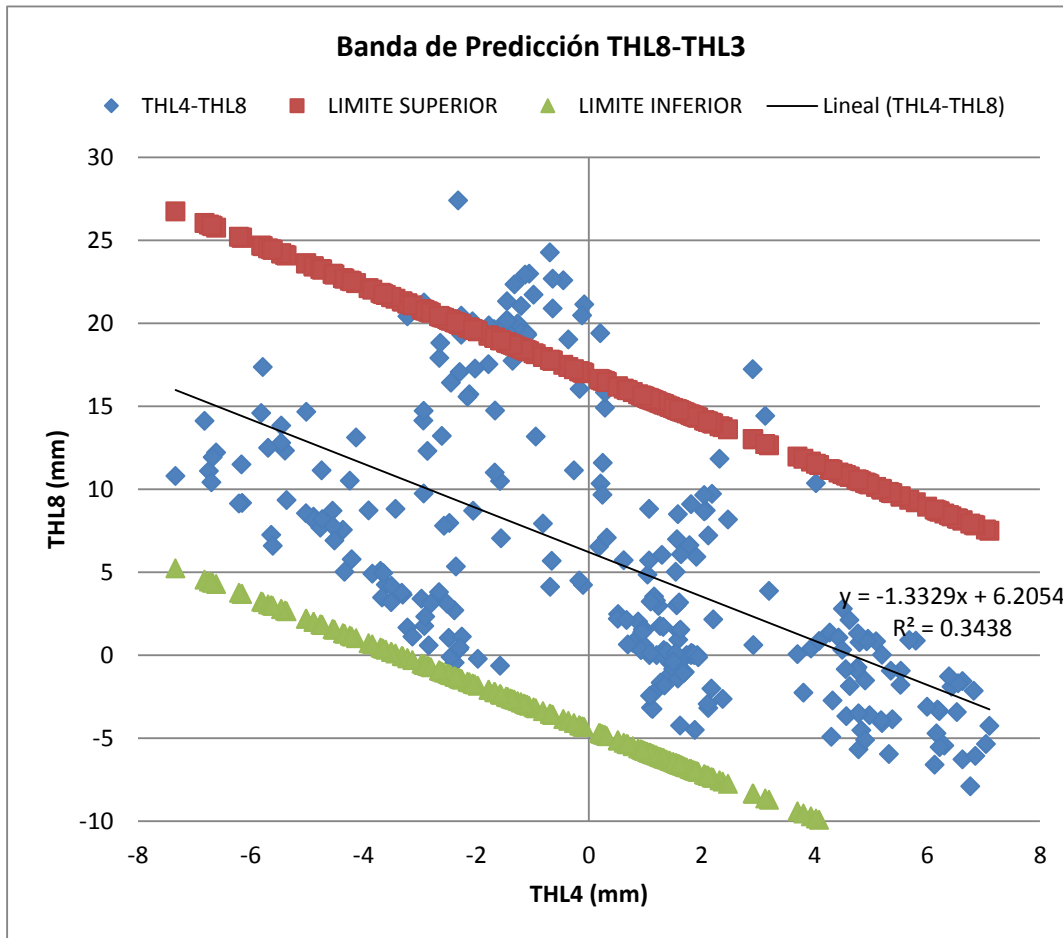


Figura 123. Aspecto de la banda de predicción calculada para el caso de THL8mean en función de THL3 mean. $\alpha = 95\%$ $R < 80\%$.

En la Figura 123 se ponen en relación los movimientos relativos en la pila 2 y el estribo 2. En este caso los movimientos dependen de longitudes de libre dilatación diferente y fuertemente condicionada por la rigidez de las pilas 2, 3 y 4.

Si se recogen los coeficientes de correlación obtenidos al correlacionar cada par de series de medidas en una matriz se observa que no todos son igual de altos.

| | 1 | 3 | 4 | 8 |
|---|------|------|------|------|
| 1 | - | >80% | >80% | >80% |
| 3 | >80% | - | >80% | <60% |
| 4 | >80% | >80% | - | <60% |
| 8 | >80% | <60% | <60% | - |

Figura 124. Matriz de Coeficientes de Correlación en los transductores de desplazamiento.

Es habitual considerar como correlación mínima aceptable un valor del 60%, por lo tanto, los valores inferiores se considera que arrojan modelos que no explican suficientemente bien una variable en función de otra.

En este caso es lógico que las correlaciones entre los desplazamientos 3 y 4 con respecto al desplazamiento 8 sean bajas porque el desplazamiento medido por ellas depende tanto de la rigidez de la pila central como de las suyas propias mientras que el desplazamiento 8 solo depende de la pila central.

De esta manera, se obtiene un análisis completo del comportamiento global de los aparatos de apoyo del puente y se proporciona una herramienta analítica para estimar los desplazamientos esperables en mediciones futuras.

Además, la Matriz de Coeficientes de Correlación obtenida mediante la Instrumentación podría considerarse como una matriz inicial u origen en estudios posteriores.

4.3. Reactivación de un Sistema de Instrumentación. Control de parámetros predominantemente estáticos

La idea es dar utilidad a los Diagramas de Control y las Bandas de Predicción comentadas en los puntos anteriores, y poder predecir futuras observaciones. Para poder hacerlo es necesario tener capacidad de medir la magnitud a controlar.

Lo ideal sería, por un lado, reactivar el Sistema de Instrumentación cada 15 meses (como en Millau [DKY]) y medir de la misma forma que se ha hecho hasta ahora, durante un mes completo. Esta reactivación supondría las siguientes fases:

- Inventario de la Instrumentación existente.
- Comprobación de su funcionamiento.
- Sustitución y reparación de sensores dañados.
- Calibración de sensores.
- Calibración del sistema.
- Arranque del sistema.

De esta forma bastaría comprobar que los valores obtenidos están dentro de los límites superiores e inferiores. En caso de que estuvieran dentro de los límites seguiríamos

teniendo el sistema bajo control. De no ser así habría que profundizar en el análisis para valorar la validez o no de los resultados.

El uso de los Diagramas de Control permitiría comprobar que los rangos y valores medios están controlados y no hay anomalía en el comportamiento de la estructura.

Por otro lado, usando las Bandas de Predicción definidas en el capítulo anterior se podría comprobar que se siguen manteniendo las correlaciones existentes entre los transductores de desplazamiento.

No obstante, en caso de no querer llevar a cabo este proceso se propone otra opción basada en la instalación de monitores y referencias para, de forma manual, poder controlar el comportamiento de algunos de los principales parámetros del puente como son los movimientos relativos tablero-pila/estribo. La idea sería tomar medidas manualmente durante un día completo y con frecuencia horaria y comprobar que los valores registrados quedan dentro de los límites superior e inferior de los Diagramas de Control y dentro de las respectivas Bandas de Predicción.

Para poder desarrollar esta segunda opción se presenta a continuación una propuesta de Instrumentación básica.

4.3.1. Control del movimiento relativo tablero-estribo

La medida de la abertura (o cierre) de la junta de dilatación representa la separación real entre tablero y estribo en un momento dado. Para poder realizar esta medida y un seguimiento de ella es necesario disponer sendos testigos en tablero y estribo.

Para poder controlar los movimientos longitudinales del tablero debidos a retracción, fluencia y temperatura es necesario conocer una fecha representativa de la finalización de la construcción del tablero, la separación entre testigos y la temperatura medida en sombra en ese preciso instante.

Sería necesaria la colocación de señales de puntería de 40 mm de diámetro de plástico duro.

Se colocaría una señal en el lateral exterior del tablero y otra en el lateral exterior del estribo. La señal de la parte del estribo estaría situada a 500 mm del borde y la de la parte del tablero estaría situada a 1000 mm. La separación de la señal de la parte del tablero podrá modificarse en el caso de que haya riesgo de ser cubierta.

Se debería garantizar la horizontalidad de la alineación de las señales a una altura media.

La medida de la abertura de la junta sería la diferencia entre la separación real entre señales y las distancias iniciales de las mismas. Se mediría con cinta métrica de precisión milimétrica.

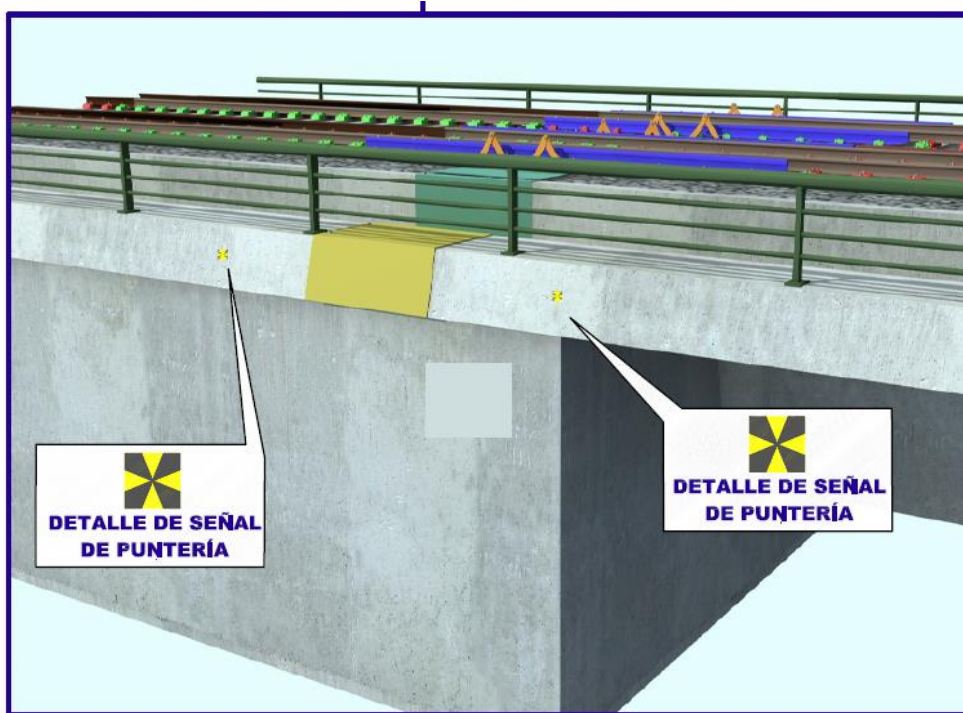


Figura 125. Dianas para el control del movimiento relativo tablero-estribo.



Figura 126. Dianas para el control del movimiento relativo tablero-estribo. Viaducto Río Aguas. APIA XXI, S.A.

4.3.2. Control del movimiento de los aparatos de apoyo

Para poder realizar esta medida y hacer un seguimiento de ella, es necesario disponer de un monitor que indique el movimiento relativo tablero-pila. Así, cuando la junta de dilatación del tablero experimente un movimiento, el monitor colocado en el aparato de apoyo registrará otro sensiblemente proporcional a su distancia con respecto al punto fijo lo cual demostrará el buen comportamiento del aparato de apoyo.

El monitor constaría de una regleta y una flecha. El monitor será una regleta de precisión centimétrica y escalada de +700 a -500 mm. Esta regleta será de acero inoxidable de dimensiones: longitud=1200 mm, ancho=25 mm y espesor= 1 mm. Sobre ella irá adherida la escala que será de pvc amarillo con la numeración en color negro. También se colocará una flecha que inicialmente coincidirá con el “cero” de la regleta y gracias al cual se podrá leer el movimiento. Esta flecha podrá ser de acero inoxidable o de pvc y su forma deberá garantizar la lectura con la precisión esperada.

Tanto la regleta como la flecha se fijarán con masilla elástica de poliuretano. La regleta se colocará en la tapa de acero sujeta al dintel del tablero mientras que la flecha se colocará en la meseta de apoyo del aparato y, por lo tanto, irá fija a la pila.

Cuando el tablero sea tipo losa o viga el monitor se colocará en la cara exterior del aparato de apoyo. Cuando el tablero sea tipo cajón y los aparatos de apoyo sean inspeccionables desde cabeza de pila se colocarán tanto en la cara exterior como en la interior.

En cualquier caso, se intentaría que los aparatos de apoyo vinieran equipados de fábrica con un sistema de medición que permita la lectura del movimiento del tablero sobre la pila.

Se colocarían en todas las pilas en el momento de colocar y reglar el aparato de apoyo.

Se colocaría el monitor teniendo en cuenta el propio reglaje del aparato de apoyo. La flecha debería quedar alineada con las señales de puntería para el control de la verticalidad de la pila que se habrán colocado al final de su construcción.

Finalmente, se situaría la regleta haciendo coincidir el cero con la flecha.

La medida del movimiento relativo tablero-pila se realizaría mediante lectura del monitor colocado en cabeza de pila. Esta medida debería ir asociada, además, a la temperatura en sombra en ese mismo momento. La temperatura se tomaría con sonda de temperatura debidamente calibrada.

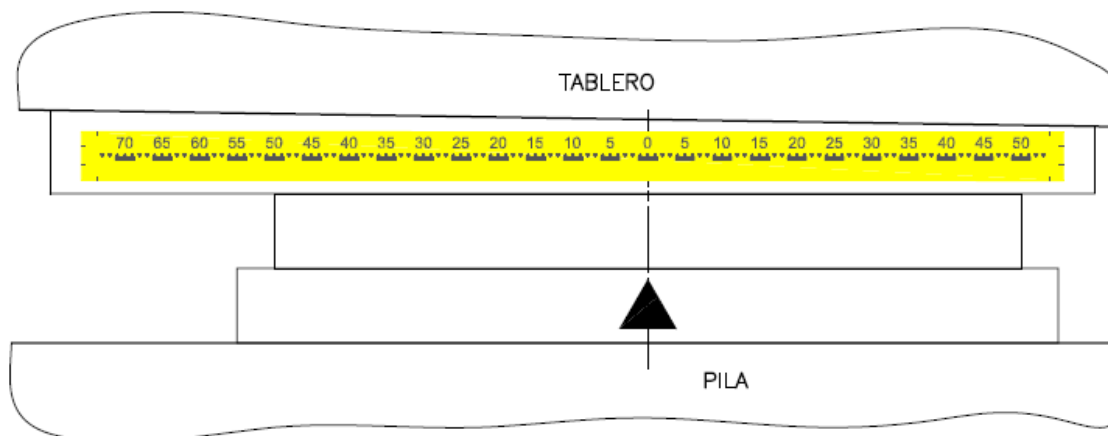


Figura 127. Regleta para el control del desplazamiento relativo tablero-pila.



Figura 128. Regleta para el control del desplazamiento relativo tablero-pila. Viaducto sobre río Huerva. APIA XXI, S.A.

4.4. Conclusiones

El Puente Beltrán es un puente de grandes dimensiones y con un esquema de funcionamiento frente a la resistencia de las fuerzas horizontales (longitudinales y transversales) singular. Dada su localización y dimensiones toda reparación es complicada y requiere de costosas intervenciones proporcionales a su complejidad. Por lo tanto, toda intervención en un puente de estas características debe estar claramente justificada en pro de una distribución presupuestaria eficiente.

El resultado del análisis de los más de 3.000.000 de datos procedentes de la Instrumentación del Puente Beltrán es, además de la comprobación de que el puente funciona adecuadamente desde el punto de vista estructural, una serie de herramientas de aplicación a la inspección y mantenimiento del puente.

Análisis de parámetros predominantemente estáticos:

- Mediante el cálculo de la Función de Autocorrelación se comprobó que las series enmascaraban señales puramente térmicas cuyo filtrado fue necesario para valorar realmente si las variables estaban o no bajo control.

- Mediante Estadística Descriptiva se comprobó tanto el buen funcionamiento de los aparatos de apoyo tipo POT como la localización del punto fijo (o de movimiento mínimo) del tablero.
- Las funciones de distribución de probabilidad en todos los casos han sido distribuciones normales (no bi-normales, por ejemplo) que indican que las variables vienen condicionadas por una única variable principal, o que al menos existe una variable cuya influencia es mucho mayor que cualquier otra (temperatura).
- Con la Inferencia Estadística se obtuvieron unas Bandas de Predicción para comprobar durante futuras campañas de inspección o medición que las relaciones entre los desplazamientos relativos tablero-pila/estribo se conservan. De esta manera se puede demostrar el buen funcionamiento de los aparatos de apoyo tipo POT así como su necesidad o no de sustitución por encastramiento, pérdida de capacidad deslizante...
- La estimación de todos los modelos predictivos da lugar a una Matriz de Coeficientes de Correlación que puede ser considerada como la Matriz de Estado 0 u origen con la cual se pueden desarrollar posteriores estudios de deterioro y evolución en el tiempo.

4.5. Resumen

- En los ejemplos objeto de presentación se ha experimentado con dos sistemas de transmisión de datos. En el caso del Puente “Infiernillo 0” se realizó vía web en tiempo real, y periódicamente a mes vencido en el caso del Puente “El Beltrán”.
- Se ha observado también que la frecuencia de muestreo de los sensores depende del sistema de adquisición que los alimenta. En los casos presentados en este capítulo, los equipos de adquisición empleados permitían tener una frecuencia de muestreo elevada en todos los sensores, alrededor de 200 Hz y, posteriormente, almacenar los datos con una frecuencia menor, según las necesidades. Esto es útil, para el caso de los desplazamientos del tablero y de los clinómetros donde, al tratarse de fenómenos de carácter estático o lento, no es necesario el registro con

frecuencias de adquisición tan elevadas. Esto es lo que se viene en llamar una toma de datos según un sistema continuo-discreto.

- Otra de las cosas que se ha comprobado que la función de auto-correlación resulta de gran utilidad para encontrar patrones repetitivos dentro de una señal, como por ejemplo, la periodicidad de una señal enmascarada bajo el ruido como puede ser el caso de la temperatura en el Puente “El Beltrán”. En este sentido cabe decir que las variables medidas están fuertemente condicionadas por una causa especial o variable principal: la temperatura, que tiene una distribución claramente Normal. En este caso, las pilas son altas y su giro por temperatura es determinante. Es precisamente, el caso contrario al del “Puente Infiernillo 0” presentado en los puntos anteriores.
- Se ha demostrado la utilidad de las técnicas de Control Estadístico en el campo de las Estructuras fuertemente condicionado por una variable estacionaria fundamental como es la temperatura.
- Con la Inferencia Estadística se han obtenido unas Bandas de Predicción para comprobar durante futuras campañas de inspección o medición que las relaciones entre los desplazamientos relativos tablero-pila/estribo se conservan.
- De esta manera se puede demostrar el buen funcionamiento de los aparatos de apoyo tipo POT así como su necesidad o no de sustitución por encastramiento, pérdida de capacidad deslizante...
- La estimación de todos los modelos predictivos da lugar a una Matriz de Coeficientes de Correlación que puede ser considerada como la Matriz de Estado 0 u origen con la cual se pueden desarrollar posteriores estudios de deterioro y evolución en el tiempo.
- En el caso del Puente “El Beltrán”, se ha definido una metodología para el control de la posición del punto fijo teórico basado en el control de la posición del punto térmico neutro (desplazamiento nulo) en sentido longitudinal.
- Ese estudio ha sido la base para el cálculo aproximado y estimativo de los coeficientes de deslizamiento desarrollados por los POT del puente. Este estudio es importante porque, dada la edad del puente, los aparatos de apoyo tipo POT representaban una tecnología desconocida que requería un

seguimiento. Además, dadas las características del puente, la operación de sustitución de apoyos (cuando proceda) implica un fuerte impacto en el tráfico por lo que debe estar rigurosamente justificada.

- En el caso del Puente “Infiernillo 0” se ha demostrado que la existencia de puntos que salen de los límites de control deben ser estudiados, y no pueden ser rechazados directamente. Deben ser estudiados con el fin de conocer su causa e influencia en la evolución de los datos sucesivos en la serie registrada. Precisamente en este caso el análisis de esos puntos supuso un mejor entendimiento del funcionamiento de la pila.

CAPÍTULO V

METODOLOGÍA APORTADA A LOS SISTEMAS DE GESTIÓN DE PUENTES

“Todo lo que se hace se puede medir, sólo si se mide se puede controlar, sólo si se controla se puede dirigir y sólo si se dirige se puede mejorar”

Pedro Mendoza

En los Capítulos anteriores se ha descrito de forma teórica y práctica cómo convertir los datos procedentes del seguimiento de la Instrumentación en información práctica a nivel de puente. En este Capítulo se propone la integración de los procedimientos presentados anteriormente en el Sistema de Gestión de Puentes de México (SIPUMEX) mejorando el rendimiento del Sistema.

5.1. Evolución de los Sistemas de Gestión de Puentes

Para aquilatar definitivamente la utilidad de la Instrumentación en el campo de los Puentes se incluye en este capítulo un análisis de los Sistemas de Gestión de Puentes actuales en el mundo circunscribiendo la importancia del sensor ya no a nivel de puente sino de red.

Para afrontar los retos actuales en cuanto a la Gestión de Puentes se vienen desarrollando numerosos programas de investigación en todo el Mundo.

Estos programas parecen estar centrados en la optimización de los recursos económicos y la maximización del periodo de retorno de las labores de reparación y mantenimiento en el conjunto de puentes a gestionar así como la reducción de los costes indirectos adicionales debidos a la congestión e interrupción del tráfico.

En Gran Bretaña en 1994 se creó la Highway Agency (HA) responsable del mantenimiento de aproximadamente 9500 km de autopistas. En el año 2001-2002, por ejemplo, se invirtieron 500 millones de libras en mantenimiento, lo que equivale a cerca de 56000 libras por km. En los últimos años este gasto se ha incrementado hasta llegar a los 750 millones.

La HA británica dispone del llamado Structures Management Information System (SMIS) que es un Sistema de Gestión de Puentes (Bridge Management System, BMS) que es usado para ayudar a los ingenieros a la hora de gestionar el mantenimiento global de la red de puentes y establece unos códigos de buena práctica.

En el Reino Unido se usan distintos sistemas de valoración del estado de conservación a escala de puente individual.

Normalmente estos sistemas de puntuación o valoración se basan en el estado de conservación de cada uno de los elementos, su apariencia, importancia del puente, severidad y extensión, y se establecen recomendaciones que se traducen en costes. Sin embargo, otras consecuencias de estas decisiones como los costes adicionales impuestos a los usuarios de las carreteras debido a las restricciones en la circulación, accidentes producidos por un mal estado de las carreteras, impacto ambiental también se están empezando a tener en cuenta a la hora de seleccionar una alternativa para el mantenimiento de una estructura sin olvidar que decisión tomada a escala individual afecta al conjunto de la red de puentes.

Stratt R. S. [SRS] hizo una comparativa en 2010 sobre los distintos Sistemas de Gestión de Puentes existentes en el Reino Unido, Europa y otros países.

Los países incluidos en el estudio fueron: Francia, Alemania, Reino Unido, Noruega, Eslovenia, España, Dinamarca, Finlandia, Estados Unidos y Canadá.

Ya por entonces, en 2010, todos los países usaban un Sistema de Gestión de Puentes completamente informatizado salvo Alemania y España (España lo haría en 2012) que ni siquiera disponían de una guía de recomendaciones o un manual de mantenimiento.

Sin embargo, independientemente de la manera de cada país de gestionar toda la información procedente de su red de puentes todos recogían básicamente la misma información sobre los trabajos de mantenimiento desarrollados: fecha, tipo, coste y localización.

Solamente Dinamarca y Canadá registraban directamente el estado de conservación de un puente inmediatamente antes y después de las labores de mantenimiento llevadas a cabo.

Por otro lado, la mayor parte de los países no usaban modelos de deterioro para predecir las condiciones de los puentes. Sin embargo, Finlandia usaba los modelos de Markov para el análisis a Nivel de red y modelos deterministas a Nivel de proyecto individual.

Estados Unidos y Canadá analizaban los datos históricos para detectar posibles evoluciones de los deterioros. Algo similar a lo que ya se hacía en Francia y Eslovenia.

En cuanto a los modelos de costes Stratt R. S. [SRS] indica que entonces la mayor parte de BMS tenían por objetivo simplemente registrar los costes de mantenimiento, reparación e inspecciones excepto en Alemania, Noruega y Eslovenia. Estos países generalmente no consideraban la existencia de costes indirectos causados por el mantenimiento. En el Reino Unido los costes debidos a las retenciones de tráfico estaban ya estandarizados o, en el peor caso, se modelaba mediante el software QUADRO.

En general, casi ningún país fundamenta sus decisiones sobre mantenimiento y reparaciones en los BMS. Dinamarca usaba un modelo de priorización y Finlandia usaba un índice de reparación. Canadá usa hoy en día un software (PONTIS) para obtener estrategias optimizadas. El Reino Unido usa el clásico análisis de coste-beneficio mientras que Francia y Alemania confiaban en el juicio del ingeniero.

En Estados Unidos se usan tres tipos de BMS:

- PONTIS: el más común. Se basa en el uso de un índice de estado para valorar las actuaciones sobre los puentes. De esta manera se hace una estimación del índice de los puentes en un futuro considerando las limitaciones presupuestarias. Los objetivos de PONTIS se limitan a reducir los costes de mantenimiento.
- BRIDGIT: usado en Maine, Luisiana y Washington. BRIDGIT ofrece una solución óptima dentro de un grupo de alternativas ordenadas por grado de idoneidad. Esto lo

consigue mediante un modelo extensivo que permite revisar las condiciones de los puentes, recomendando unas determinadas acciones para mejorar su estado. BRIDGIT se usa también como herramienta para gestionar y planificar inversiones y proyectos. El tipo de bases de datos que usa se denomina FoxPro o Visual FoxPro. Los puentes se pueden gestionar tanto a escala individual como colectiva usando la información recogida en la base de datos. Los resultados de las inspecciones se revisan y actualizan cada dos años a no ser que la estructura esté clasificada como con riesgo alto de incumplimiento de las normas vigentes. Las inspecciones visuales se rigen por una valoración de 3 a 5. Para predecir el estado de los puentes, BRIDGIT emplea un modelo de deterioro basado en las Cadenas de Markov. De esta manera se hace una estimación del estado futuro del puente considerando una matriz de probabilidad. Además, BRIDGIT considera los costes indirectos generados de las labores de mantenimiento, como por ejemplo, accidentes, retrasos y aumento en los tiempos y distancias de trayecto de los usuarios. Este BMS calcula y valora las distintas alternativas considerando los costes totales del puente para un ciclo de vida de 20 años y los beneficios sobre los usuarios. La priorización y planificación de los proyectos usa métodos de análisis coste-beneficio de tipo incremental muy útil cuando hay que buscar una solución óptima de coste mínimo condicionada por un presupuesto ajustado.

- Sistemas específicos de cada Estado: Alabama, Indiana, New York y Carolina. Estos sistemas según se explica en el Manual Bridge Evaluation [MBE] parten de la idea general de todos los BMS, es decir, que la mejor acción para cada puente, considerada aislada, no tiene por qué ser la mejor para el conjunto de todos los puentes. Los ingenieros de Puentes, Administradores, y Agentes Públicos saben de la necesidad de nuevos métodos analíticos y procedimientos para optimizar los recursos presupuestarios. Es decir, el objetivo fundamental es la conservación de las infraestructuras mediante la estrategia que maximice el beneficio social. Los BMS ayudan a los ingenieros a la hora de determinar la mejor actuación tanto a corto como a largo plazo considerando

Estos BMS trabajan en tres líneas:

- Bases de Datos: incluye los inventarios de puentes, inspección, estado de conservación y valoración.

- **Análisis de Datos:** las técnicas de optimización son en la actualidad las más usadas a la hora de gestionar una red de puentes. La mejor decisión es aquella que minimiza los costes a lo largo de la vida y que garantiza unas condiciones adecuadas en servicio. Las dos principales herramientas son los modelos de deterioro y los de costes relativos. Estos modelos se integran en un módulo de optimización que junto con las condiciones presupuestarias que existan generan una serie de modelos que generan el máximo beneficio. Esta técnica presenta dos puntos de vista: Top-Down y Bottom-Up. El primero de ellos parte de los niveles de red que se quieren alcanzar. El segundo parte de los análisis a nivel de proyecto que se van ajustando hasta alcanzar un nivel satisfactorio a nivel global.
- **Toma de Decisión:** se trata de usar todas las herramientas descritas hasta el momento para la toma de decisiones por parte de los Ingenieros responsables de los cuales se espera evalúen las distintas soluciones posibles teniendo en cuenta su conocimiento y experiencia.

Entre los daños y patologías más habituales que suelen presentar los diferentes elementos que conforman los puentes son tres: cimentaciones, especialmente en aquellas pilas y elementos situados en el interior de cauces; aparatos de apoyo, independientemente de su tipología y tamaño; y los sistemas de drenaje e impermeabilización, incluyendo entre estos a las juntas de dilatación. Muchos de estos daños y patologías no se detectan únicamente en puentes antiguos sino que muchos de ellos se encuentran en puentes modernos, de menos de 10-15 años, estructuras cuya envergadura suele ser un importante condicionante en la solución y reparación de los daños, sin considerar la propia gravedad de los mismos, tanto desde un punto de vista funcional – situados normalmente en vías de alta intensidad de tráfico- como estructural –debido a las mayores dimensiones y tecnologías utilizadas en la actualidad.

Los aparatos de apoyo son los elementos encargados de transmitir las cargas y movimientos del tablero a la subestructura de los puentes: pilas y estribos. Como bien es sabido, existen diferentes tipologías de apoyos en función de las cargas y movimientos que han de transmitir: neopreno zunchado, neopreno confinado, POT, esféricos, rodillos, etc. En las múltiples inspecciones realizadas por el autor de esta Tesis, se han detectado múltiples fallos en estos elementos, especialmente debido a malas condiciones de puesta en obra, aunque no por ello se deben descartar otros defectos como errores de proyecto o defectos de los materiales. En base a los daños detectados, resulta importante llamar la

atención en la falta de previsión de sustitución de estos elementos por parte de Proyectistas y Constructores, más teniendo en cuenta que son elementos fungibles y que se degradan con el paso del tiempo, por lo que en algún momento de la vida útil de la estructura se ha de proceder a su sustitución. Este hecho presenta una mayor importancia en el caso de los puentes de luces medias y grandes, donde las cargas a transmitir son importantes y suelen presentar pilas de gran altura donde la utilización de medios auxiliares de apeo resulta prácticamente imposible, debiendo acudir a sistemas especiales de trabajo, dificultando y encareciendo enormemente las tareas de sustitución de estos elementos. Los aparatos de apoyo más utilizados en los puentes de las carreteras españolas son los de neopreno zunchado. Resulta bastante habitual definir estos apoyos únicamente por sus dimensiones en planta y su espesor neto o total, sin indicar el número de capas y espesor de las mismas, características que confieren la capacidad de desplazamiento y de rotación a este tipo de apoyo. Por tanto, se considera necesario definir correctamente estos elementos en los proyectos, así como indicar los valores de su dimensionado para poder recalcular, en caso necesario, aparatos de apoyo diferentes por necesidades del suministrador o de la propia obra.

La mala nivelación de los aparatos de apoyo suele ser un daño bastante frecuente, especialmente en los tableros de vigas prefabricadas, donde estas operaciones no se realizan correctamente, produciéndose la expulsión de los aparatos de apoyo.

Los aparatos de apoyo deben colocarse horizontalmente, con sus dos caras perfectamente paralelas para lo cual se deberán disponer los tacones, cuñas o mesetas necesarias a tal fin, consiguiendo de esta forma la horizontalidad del apoyo. Así mismo, se deben dejar los resguardos correspondientes (mínimo de 5 cm) entre los neoprenos y los bordes de las mesetas de apoyo. De esta forma, se podrán asumir ligeros errores de replanteo y se garantizará la estabilidad del elemento de apoyo, no produciéndose su rotura. En el caso de mesetas o tacones de apoyo superiores a los 5 cm de altura, éstos deberán armarse para evitar su fisuración y rotura.

Cuando la envergadura de los puentes es media o grande, los aparatos de apoyo de neopreno zunchado resultan, en ocasiones, incapaces de soportar las tensiones que transmite el tablero, así como para absorber los movimientos debidos a los fenómenos reológicos del hormigón y a los efectos térmicos, pasado a utilizar en este caso aparatos de apoyo de neopreno confinado o aparatos de apoyo tipo POT. Dado que estos apoyos

son utilizados en puentes grandes, con grandes desplazamientos horizontales, estos apoyos habitualmente disponen de una lámina de teflón en su parte superior que desliza sobre una bandeja de acero inoxidable, colocada en el interior del tablero, reduciendo notablemente las fuerzas horizontales sobre las cabezas de pila y estribos. En cuanto a la capacidad de movimiento de estos apoyos, se clasifican en libres, unidireccionales y fijos. Los fallos habituales detectados en este tipo de apoyo son debidos a la degradación del material deslizante, el teflón. Los daños habituales detectados en estos apoyos son la expulsión del teflón, fluyendo lateralmente por el aparato de apoyo, y el deterioro del material debido al rasgado y expulsión del pistón de confinamiento. Estos deterioros implican el funcionamiento anómalo del aparato de apoyo, transmitiendo seguramente, mayores fuerzas horizontales de las previstas, a los elementos de la infraestructura.

Otro fallo habitual que suelen presentar estos aparatos de apoyo, suele encontrarse en deficiente definición de los recorridos teóricos de los aparatos de apoyo, así como del reglaje de las propias bandejas, por lo que con el paso de los años, es frecuente encontrar apoyos con las carreras agotadas, tocando incluso, los tornillos de sujeción de las bandejas con el pistón del confinamiento. En cuanto a la disposición de estos aparatos de apoyo, se han detectado errores tales como la disposición de dos aparatos de apoyo guiados sobre el mismo elemento (pila/estribo), con el consiguiente bloqueo que se produce en los apoyos, cuando no existe un perfecto paralelismo entre ambos elementos o exista algún pequeño defecto de construcción. Este hecho puede llevar a producir daños importantes en los aparatos de apoyo y sobre la propia estructura, así como otros daños menores como serían la rotura de la lámina de acero inoxidable que protege el tetón de la guía.

En cuanto a la mejora en el diseño de estos elementos, corresponde la mayor parte de concienciación y trabajo a los proyectistas, mejorando los detalles de apoyo y definición de los aparatos de apoyo, y exigiendo las condiciones de ejecución adecuadas. En los proyectos se debería dejar marcado claramente cuál debe ser el reglaje inicial de las bandejas, al igual que en las obras se debería marcar la posición inicial real, para poder conocer y determinar posibles deficiencias de funcionamiento. Por otro lado, también se deberán prever en los dinteles y cargaderos el suficiente espacio para la correcta ejecución de las mesetas de apoyo y, cuando resulte posible, para la ubicación de gatos hidráulicos para su sustitución. Así mismo, se deberían estudiar y definir en proyecto los puntos provisionales de apoyo, diseñando mamparos y subestructura para las cargas que han de soportar durante la sustitución.

5.2. Sistemas de Gestión de Puentes (BMS)

5.2.1. Sistemas de Gestión de Puentes (BMS) en España

Un Sistema de Gestión de Puentes es una metodología de trabajo para gestionar la conservación de un conjunto de estructuras. Para ello se han venido elaborando en las distintas administraciones españolas campañas de distinto tipo con un doble objetivo:

- Realizar un inventario de puentes.
- Conocer el estado de los mismos a través de inspecciones ordinarias, principales y especiales.

En el año 1960, el Ministerio de Fomento en España comenzó a realizar un inventario de sus estructuras, con el fin de iniciar un Sistema de Gestión de Puentes.

En el año 1999 la Dirección General de Carreteras implantó un Sistema de Gestión de las obras de paso de la Red de Carreteras del Estado [NMACR]. Este SGP se ha venido desarrollando desde entonces a partir de los siguientes elementos:

- Inventario de sus estructuras.
- Inspecciones: Básicas, Principales y Especiales.
- Catálogo de deterioros y sus causas.
- Catálogo de criterios de evaluación de la importancia de los daños.
- Estimación del estado de las obras de paso. Asignación de un índice de estado.
- Establecimiento de prioridades de reparación.
- Control y seguimiento de programas de actuación.

En el año 2000, existía una preocupación por la conservación de las infraestructuras y en concreto de los puentes [ST], debido al gran crecimiento del parque español de estructuras en la década de los 90 y al esperado aumento en el comienzo del siglo XXI. En este sentido, era necesario un Sistema de Gestión de Puentes cuyos objetivos eran:

- Información del estado de puentes. Creación de una base de datos fiable con las características principales de todos ellos.
- Evaluación de la seguridad y de la conservación de los puentes.
- Establecimiento de una serie de inspecciones ordinarias.

- Valoración de las actuaciones de mantenimiento necesarias.
- Optimización de la conservación.

Las inspecciones periódicas son útiles, pero también subjetivas, puesto que la valoración final puede variar en función de quién sea el operario que la realice.

La preocupación de la gestión de puentes de comienzos de siglo empezó a tener sus frutos en el año 2005. Existía experiencia ya de inspecciones y catálogos de daños dentro de cada elemento de una estructura: cimentaciones, estribos, pilas, dinteles, arcos, apoyos y juntas [LG].

En las Jornadas celebradas en San Sebastián en abril de ese mismo año, sobre la vida de los puentes diversos organismos presentaron varios sistemas de gestión de puentes que llevaban en funcionamiento varios años:

- ADIF [LR].
- Comunidad Autónoma de Galicia [PL].
- Diputación Foral de Guipúzcoa [ZZ].
- Consejería de Obras Públicas, Urbanismo y Transportes de la Comunidad de Madrid [LG].
- Ayuntamiento de Sevilla [ML].

En el año 2005, ADIF gestionaba 6371 puentes en una red de 11826 km de ferrocarril convencional [LR]. Dichas estructuras se habían construido desde los orígenes del ferrocarril, a mediados del siglo XIX, hasta entonces. Por tanto, sus materiales y su tipología eran muy variados.

El incremento de la velocidad del ferrocarril y de las cargas de tráfico que dichos puentes tenían que soportar, provocó el diseño de un Sistema de Gestión del mantenimiento de los mismos.

En primer lugar se realizó una clasificación de estructuras según su material: 845 puentes metálicos, 2598 estructuras de hormigón y 2928 obras de fábrica de piedra.

Dentro de los puentes metálicos, existen diferentes tipologías:

- Alma llena.

- Celosía: San Andrés, Linville, Pratt y Warren.
- Ortótropo.
- Cajón.
- Celosía múltiple.

Por otro lado, los puentes de hormigón, son de:

- Hormigón en masa: 45%.
- Hormigón armado: 40%.
- Hormigón pretensado: 15%.

Por último, los puentes de fábrica se clasifican en:

- Ladrillo: 27%.
- Mampostería: 5%.
- Sillería: 68%.

La capacidad estructural de los puentes puede presentar limitaciones de carga o de velocidad, lo que llevó a ADIF a clasificar las líneas en categorías -en función de las cargas admisibles por eje y por metro- desde la clase A29 hasta la D430, de acuerdo con la UIC.

La gestión del mantenimiento de los puentes en aquel momento se tenía que realizar de acuerdo a la legislación vigente: “Instrucción relativa a las acciones a considerar en el proyecto de puentes de ferrocarril IPF-11 [IPF]”. Fundamentalmente la conservación de los puentes de ferrocarril consistía en la inspección visual periódica y, en los metálicos, en pruebas de carga también periódicas.

A día de hoy, la Instrumentación de Puentes se está empezando a establecer como una herramienta básica del Sistema de Gestión, sobre todo de las estructuras singulares, siendo las inspecciones un complemento de la misma.

Tal es así que el Ministerio de Fomento viene desarrollando en los últimos años un programa de seguimiento de puentes instrumentados dentro de la Red de carreteras del Estado cuyo objetivo es contrastar los valores de la normativa actual vigente IAP-11 (www.celosia.es). Los puentes pertenecientes a este programa son:

- Puente de Iregua (Logroño)
- Puente de Alconetar (Cáceres)
- Viaducto de Almonte (Cáceres)
- Viaducto de Cañizares (Granada)
- Viaducto de Guadalfeo (Granada)
- Viaducto de Montabliz (Cantabria)
- Viaducto del Nalón (Asturias)
- Viaducto de Pujayo (Cantabria)
- Viaducto de Regueirón (Asturias)
- Viaducto de San Pedro (Asturias)

En estos puentes se vienen tomando datos de los siguientes parámetros:

- Giros (en pilas y tablero)
- Tensiones (en acero y hormigón)
- Reacciones en apoyos
- Fuerzas en tirantes
- Presión en gatos
- Velocidad y dirección del viento
- Temperaturas
- Aceleraciones
- Movimientos en juntas

5.2.2. Sistemas de Gestión de Puentes (BMS) en México

En México [CQLBS], el primer sistema de administración de puentes fue diseñado básicamente para manejar la información de todo el inventario de la Red Federal de Carreteras. Al inicio, se emplearon inspecciones visuales para evaluar diferentes partes de los puentes, y determinar un índice de la calificación de la condición estructural calculada del promedio de calificaciones individuales ponderadas de acuerdo con la importancia del defecto. Inicialmente, el resultado general del sistema de administración fue la visión global y calificación de todo el inventario de puentes con su tipo, tamaño, condición, localización, etc.

Más tarde, a pesar del gran valor del sistema de administración de puentes inicial, se concluyó que la información no era suficiente por ser necesaria una evaluación más precisa acerca de la condición estructural, y con ello estimar costos de mantenimiento en

un corto plazo. Al mismo tiempo, dado que en casi todos los casos los recursos económicos no son suficientes, se hace necesario elaborar programas de mantenimiento asignando diferentes prioridades, basados en una evaluación de la capacidad de carga de los puentes y de su vida residual.

A mediados de la década de los noventa, el Instituto Mexicano del Transporte, desarrolló un sistema de administración de puentes (SIAP) que incluía la evaluación estructural a partir de pruebas dinámicas, y una base de datos más completa que comprendía los datos de diseño, especificaciones, planos, historiales de inspección y mantenimiento, y archivos fotográficos.

Las conclusiones propuestas en este trabajo fueron propuestas al Instituto Mexicano del Transporte.

Los sistemas de posicionamiento global (GPS) con sistemas de información geográfica (GIS) hacen actualmente posible su incorporación y aplicación al SIAP, no sólo para almacenar datos, sino para el análisis y correlación con datos ambientales y geográficos. A finales de la década de los noventa, la aplicación del SIAP se presentó en CAPUFE, que cuenta con más de 2500 puentes, siendo algunos de los más grandes e importantes de México.

A pesar de los avances logrados en materia de información y la tecnología computacional, a la fecha se reconoce que la utilidad de los sistemas de administración de puentes radica fundamentalmente en el manejo de información actualizada, fiable y completa. Contar con un método de evaluación y un programa eficiente de inspección, son la clave para lograr que la información necesaria para definir los programas de mantenimiento de los puentes basados en un análisis estructural, capacidad de carga y predicción de vida. Apoyados en lo anterior, desde 2004, el IMT inició el desarrollo del concepto del SIAP-IMT, que es una versión actualizada de la versión del SIAP utilizado por CAPUFE y que incorpora diferentes niveles de inspección, análisis y evaluación. Este nuevo concepto se ha conceptualizado, bajo el modelo de un sistema de información geográfica del transporte SIGET, que comprende todos los aspectos de la red de transporte carretero.

En un aspecto general, dentro del contexto de los sistemas de administración de puentes, no siempre es posible utilizar modelos determinísticos para todos los puentes dentro del inventario, ya que resultaría muy complejo. La forma razonable para abordar

este problema es para estructuras semejantes o idénticas, mediante el análisis estadístico y evaluar la confiabilidad estructural a través del análisis probabilístico.

Por su parte la Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC) tiene a su cargo la atención de los 7231 puentes de la red federal de carreteras libres de peaje. Se requiere programar su atención oportunamente, en función de los recursos disponibles, y para ello, se utiliza el Sistema de Puentes de México (SIPUMEX).

El sistema cuenta con una base de datos en la que se tiene el inventario de todos los puentes con sus características geométricas y estructurales básicas, su ubicación, los materiales de que están contruidos, su estado físico y los datos de tránsito de los vehículos que soportan.

Personal de los Centros SCT realiza las inspecciones visuales de los puentes según una previa programación, y se actualiza la base de datos central localizada en la DGCC. Tal actualización, que en promedio se realiza cada dos años para cada uno de los puentes, permite detectar deterioros y deficiencias causadas por un diseño inadecuado o un procedimiento constructivo incorrecto; ello, por consiguiente, reduce al mínimo la probabilidad de que se colapse alguna estructura por causas ajenas a emergencias hidráulicas o sísmicas. Cabe mencionar que cuando se presentan dichas emergencias los puentes son inspeccionados nuevamente. Pero de lo que se trata es de reducir la probabilidad del colapso.

El estado físico de los puentes se denota con una calificación que va de "cero" (puentes que no requieren atención) a "cinco" (condición crítica de los puentes que requieren atención en el año en curso o en el siguiente).

Utilizando como parámetros la calificación de los puentes y el tránsito diario promedio anual de vehículos, se obtiene un listado de puentes en orden de prioridad, en el que se incluye el costo estimado de los trabajos requeridos. Este listado da origen al programa de estudios y proyectos de puentes del año en que se realiza la jerarquización y al programa de obras de reconstrucción de puentes del año siguiente. De esta manera se prioriza pero no se predice y ahí es donde incide la aportación de esta Tesis.

5.3. Aportación a la Inspección de puentes. Aplicación práctica al caso de una red de puentes en México

El presente punto tiene por objeto el análisis estructural crítico de los resultados de los trabajos de inventario e inspección de un Administrador tipo, en este caso Banobras, el responsable de Puentes y Pasos Vehiculares en México.

Es evidente la importancia de la efectividad en la evaluación del estado físico de las estructuras de manera que se puedan detectar elementos con posibles patologías estructurales. Esto supone avanzar en la parametrización de los trabajos de campo ofreciendo al inspector herramientas para la valoración cuantitativa del estado y comportamiento del puente. Es bajo este punto de vista que tendrían utilidad las Bandas de Predicción descritas en el capítulo anterior para el control de los movimientos en los aparatos de apoyo u otros elementos fungibles.

Pero es igualmente importante concebir el trabajo de inspección dentro de la globalidad de una red para la toma de decisiones sobre la conservación de los propios puentes y optimizar recursos económicos.

De entre todas las operaciones relativas al mantenimiento de los puentes existe una de especial importancia técnica y económica que es la sustitución de los aparatos de apoyo. En general, la vida útil estimada de estos elementos está comprendida entre 15-25 años. Puesto que los puentes forman parte de tramos construidos en épocas similares, el agotamiento de la vida útil de los aparatos de apoyo de un puente se traduce, a groso modo, en la sustitución simultánea de los aparatos de apoyo de todos los puentes del tramo de edad similar. Si sobre cada uno de esos puentes se realiza un control mediante Bandas de Predicción se puede saber cuantitativamente qué puentes necesitan ser intervenidos y en qué orden. Ahí la utilidad de todo el trabajo estadístico desarrollado hasta ahora.

Por lo tanto, en este punto se revisa una metodología de inventariado e inspección con el fin de mejorar la valoración a escala de puente y a escala de red afinando, concretamente, en la mejora en la valoración del estado de conservación de los aparatos de apoyo incluyendo en las fichas las Bandas de Predicción calculadas.

La metodología que se revisa corresponde a la Administración de México.

El Administrador responsable de las estructuras es Banobras y toda la información fue reportada a la Dirección General Adjunta de Supervisión física de autopistas que se encarga de actualizar la información.

5.3.1. Documentación de inventariado e inspección generada por un puente

De cada estructura se tiene la siguiente información:

- Reporte del estado físico de la estructura tras la última inspección realizada hasta la fecha. Se entiende que esta información es gestionada por la Dirección General Adjunta de Supervisión física de autopistas.
- Trabajos de inventario e inspección realizados:
 - Esquemas descriptivos: croquis, datos geométricos y viales.
 - Formato de inventario: fichas de inventario (F-001). Gestionadas por la aplicación SIAP (Sistema de Administración de Puentes).
 - Formato de inspección preliminar: fichas de inspección (F-003). Gestionadas por la aplicación SIAP (Sistema de Administración de Puentes).
 - Informe fotográfico: cuerpo, vista y lado de cada una de las distintas partes en las que se divide la estructura.
 - Informes técnicos: ficha resumen del estado de la estructura.

5.3.2. Análisis de Fichas de Inventario e Inspección

5.3.2.1. Reportes sobre el estado físico de las estructuras de la Dirección General Adjunta de Supervisión física de autopistas

La Dirección General Adjunta de Supervisión Física de Autopistas gestiona la información recogida en estas fichas tipo o reportes. Su tratamiento y utilización es vital para el planteamiento de políticas de intervención en las estructuras y presentan la siguiente estructura:

- Presentación de la estructura (1):
 - Fecha de elaboración
 - Tipo de estructura
 - Nombre
 - Ubicación
 - Autopista
 - Administrador responsable

- Breve descripción de la estructura (2):
 - Tipo de superestructura
 - Tipo de subestructura
 - Cimentación
 - Alineamiento
- Resultado de la inspección (3):
 - Elemento con problema
 - Descripción del problema
 - Causas probables del problema
 - Propuesta de solución del problema (problemas menores)
 - Propuestas de estudios a realizar (problemas mayores)
- Historial de reparaciones (4):
 - Intervenciones desarrolladas por orden cronológico

En la siguiente figura se presenta un ejemplo de ficha tipo y se identifican los puntos (1), (2), (3) y (4) indicados anteriormente:

5.3.3. Trabajos de inventario e inspección

5.3.3.1. Esquemas descriptivos

Se trata de un número variable de croquis en los que se incluyen, al menos, las siguientes representaciones:

- Alzado
- Planta
- Corte transversal

En estos croquis se identifican cada uno de los elementos de la estructura y se acotan las principales características geométricas (ancho de tablero, canto, separación entre traveses,...) y de gálibos horizontales y verticales. También se localizan los principales daños como resultado de las inspecciones preliminares.

5.3.3.2. Formato de inspección preliminar (F-003 SIAP)

Se trata de una ficha tipo en la que se distinguen 9 apartados tal y como se indica a continuación:

- Datos generales:

| 1. DATOS GENERALES | |
|----------------------|--------------------|
| AUTOPISTA: | NOMBRE DEL PUENTE: |
| UBICACIÓN KM: | ESTADO: |
| MUNICIPIO: | LOCALIDAD: |
| RESIDENTE DEL TRAMO: | |

Figura 130. Apartado 1 de ficha F-003. Datos generales.

- Condición general del puente:

| 2. CONDICION GENERAL DEL PUENTE | | | |
|---------------------------------|-------|---|------------------|
| HUNDIMIENTO | (004) | 4 | 1. Ligero |
| DESPLOME | (005) | 4 | 2. Moderado |
| SOCAVACION | (006) | 4 | 3. Grave |
| FLECHAS | (007) | 4 | 4. No se aprecia |
| CORROSION | (008) | 1 | |
| OTRO (Especificar) | (009) | | |
| CAUCE DEL RIO | (010) | 4 | |

1. Obstruido Ligeramente
 2. Obstruido Moderadamente
 3. obstruido Grave
 4. Sin obstrucción

SEÑALAMIENTOS QUE INDIQUE GALIBOS (011) SI NO

SEÑALAMIENTOS DE SEGURIDAD (012) SI NO

COMENTARIOS (013)
 Paso Inferior Vehicular (P.I.V.), Compuesto a base de superestructura espacial tipo tridilosa y subestructura de concreto reforzado; Se recomienda limpieza en superficie de rodamiento así como retiro de material suelto como basura y vegetación en los taludes, estribos, cunetas y lavaderos por parte de la brigada de conservación; Así mismo se recomienda para el mantenimiento mayor a puentes, el suministro y aplicación de impermeabilizante base cemento para el tablero de la losa (superficie de rodamiento), la reparación de elementos metálicos fisurados indicados en croquis, limpieza manual con chorro de aire y aplicación de pintura a toda la tridilosa, aplicación de concreto hidráulico en el delantal del los dos estribos para evitar el crecimiento de vegetación considerando pendiente para escurrimiento hacia el corte, ampliar el área de protección de los conos de derrame, reubicación y reconstrucción de lavaderos con concreto hidráulico reforzado, así como la reparación total de los terraplenes de acceso.

Figura 131. Apartado 2 de ficha F-003. Condición general del Puente.

- Superficie de rodamiento:

| 3. SUPERFICIE DE RODAMIENTO | |
|-----------------------------------|---|
| CONDICION (014) | 2 |
| 1. Buena 2. Regular 3. Mala | |
| ESPEJOR MAXIMO DE CARPETA (015) | (cm) |
| COMENTARIOS (016) | No existe carpeta asfáltica que proteja la losa del tablero |

Figura 132. Apartado 3 de ficha F-003. Superficie de rodamiento.

- Superestructura de hormigón:

| 4. SUPERESTRUCTURA DE CONCRETO | |
|--|--|
| AGRIETAMIENTO EN ZONA DE APOYOS (GRIETAS DE CORTANTE) (017) | <u>4</u> |
| 1. Ligero | |
| 2. Moderado | |
| 3. Grave | |
| 4. No se aprecia | |
| Especificar daños o estado | |
| AGRIETAMIENTO AL CENTRO EL CLARO (FISURAS POR FLEXION) (018) | <u>4</u> |
| 1. Ligero | |
| 2. Moderado | |
| 3. Grave | |
| 4. No se aprecia | |
| Especificar daños o estado | |
| AGRIETAMIENTO EN LOSAS (019) | <u>1</u> |
| 1. Ligero | |
| 2. Moderado | |
| 3. Grave | |
| 4. No se aprecia | |
| Especificar daños o estado | Se localizaron reparaciones a base de inyección de resina epoxica y ligeras fisuras por contracción. |
| AGRIETAMIENTO EN DIAFRAGMAS (020) | <u>1</u> |
| 1. Ligero | |
| 2. Moderado | |
| 3. Grave | |
| 4. No se aprecia | |
| Especificar daños o estado | No existe carpeta asfáltica que proteja la losa del tablero |

Figura 133. Apartado 4 de ficha F-003. Superestructura de hormigón (I de II)

| | |
|---|--|
| JUNTAS DE EXPANSION (021) | <u>2</u> |
| 1. Buen Estado | |
| 2. Regular Estado | |
| 3. Mal Estado | |
| 4. No se aprecia | |
| Especificar daños o estado | Se encuentran tapadas con material (grava y arena) lo cual acelera su desgaste e impide su función elástica |
| DISPOSITIVOS DE APOYO (022) | <u>2</u> |
| 1. Buen Estado | |
| 2. Regular Estado | |
| 3. Mal Estado | |
| 4. No existen | |
| Especificar daños o estado | Se encuentran contaminados con material fino y vegetación crecida al perímetro |
| DAÑO POR IMPACTO VEHICULAR POR DEFICIENCIA EN GALIBO (023) | <u>4</u> |
| 1. Ligero | |
| 2. Moderado | |
| 3. Grave | |
| 4. No se aprecia | |
| Especificar daños o estado | |
| DAÑO POR IMPACTO VEHICULAR EN GENERAL (024) | <u>4</u> |
| 1. Ligero | |
| 2. Moderado | |
| 3. Grave | |
| 4. No se aprecia | |
| Especificar daños o estado | |
| DRENAJE (025) | <u>3</u> |
| 1. Buen funcionamiento | |
| 2. Regular funcionamiento | |
| 3. Mal funcionamiento | |
| 4. No se aprecia | |
| Especificar daños o estado | No existen drenes de desagüe ni carpeta asfáltica que permitan el desalojo del agua de lluvia solo la condición ligeramente inclinada del puente permite el escurrimiento hacia el terraplén de acceso lado izquierdo. |
| DESCONCHAMIENTO EN LA SUPERESTRUCTURA (026) | <u>4</u> |
| 1. Ligero | |
| 2. Moderado | |
| 3. Grave | |
| 4. No se aprecia | |
| UBICACIÓN DEL DESCONCHAMIENTO(027) | |
| DIMENSION DEL DESCONCHAMIENTO (028) | <u>(cm)</u> |
| COMENTARIOS (029) | Se encuentran contaminados con material fino y vegetación crecida al perímetro |

Figura 134. Apartado 4 de ficha F-003. Superestructura de hormigón (II de II). En azul se ha remarcado la valoración realizada al estado de conservación de los aparatos de apoyo.

- Subestructura de hormigón:

5. SUBESTRUCTURA DE CONCRETO

| | |
|--|----------|
| AGRIETAMIENTO EN PILAS (030) | 4 |
| 1. Ligero | |
| 2. Moderado | |
| 3. Grave | |
| 4. No se aprecia | |
| Especificar daños o estado | |
| AGRIETAMIENTO EN ESTRIBOS (031) | 4 |
| 1. Ligero | |
| 2. Moderado | |
| 3. Grave | |
| 4. No se aprecia | |
| Especificar daños o estado | |
| DESCONCHAMIENTO EN PILAS (032) | 4 |
| 1. Ligero | |
| 2. Moderado | |
| 3. Grave | |
| 4. No se aprecia | |
| COMENTARIOS (033) | |

Figura 135. Apartado 5 de ficha F-003. Subestructura de hormigón.

- Puentes de acero:

| 6. PUENTES EN ACERO (estructura metálica espacial tipo tridilosa) | |
|---|----------------------|
| SUPERESTRUCTURA | SUBESTRUCTURA |
| PINTURA ANTICORROSIVA (034) 1. Adecuada 2. Faltante 3. Defectuosa 4. No se aprecia Especificar daños o estado | 2 (042) |
| Se localizan elementos reparados sin pintura y con primario degradado, así como elementos con pintura en mal estado y con inicios de corrosión principalmente en extremos | |
| CORROSION (035) 1. Ligero 2. Moderado 3. Grave 4. No se aprecia Especificar daños o estado | 2 (043) |
| Inicios de corrosión en elementos metálicos, principalmente en elementos reparados y expuestos a la lluvia (extremos) | |
| ELEMENTOS ROTOS (036) SI <input checked="" type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> | (044) |
| ELEMENTOS FALTANTES (037) SI <input type="checkbox"/> NO <input checked="" type="checkbox"/> | (045) |
| ELEMENTOS DEFORMADOS (038) SI <input checked="" type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> | (046) |
| DAÑO EN SOLDADURAS (039) 1. Ligero 2. Moderado 3. Grave 4. No se aprecia Especificar daños o estado | 2 (047) |
| Se localizaron 2 (dos) soldaduras fisuradas (se anexa croquis) | |
| DAÑO EN PERNOS Y REMACHES (040) 1. Ligero 2. Moderado 3. Grave 4. No se aprecia Especificar daños o estado | 4 (048) |
| COMENTARIOS GENERAL DE LA SUPERESTRUCTURA (041) La inspección visual a la estructura espacial arrojó 2 (dos) fisuras en soldadura de P.T.R., así como elementos con inicio de oxidación, provocada esta última por pintura deteriorada y primario degradado, también se localizaron elementos contaminados por vegetación crecida en los delantales de los estribos y por material producto de los trabajos de concreto lanzado que no fue debidamente retirado. Se anexa croquis descriptivo | |
| COMENTARIOS GENERAL DE LA SUBESTRUCTURA (049) | |

Figura 136. Apartado 6 de ficha F-003. Puente de acero.

- Puentes de hormigón pretensado:

| 7. PUENTES DE CONCRETO PRESFORZADO | |
|---|----------------------------|
| SUPERESTRUCTURA | |
| DUCTOS O CABLES EXPUESTOS (050) | Especificar daños o estado |
| SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> | |
| ANCLAJES DE PREESFUERZO SUELTOS (051) | Especificar daños o estado |
| SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> | |
| CABLES ROTOS (052) | Especificar daños o estado |
| SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> | |
| VAINAS O FUNDAS ROTAS (053) | Especificar daños o estado |
| SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> | |
| CORROSION EN CABLES (054) | Especificar daños o estado |
| SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> | |
| COMENTARIOS GENERAL DE LA SUBESTRUCTURA (055) | |
| | |
| SUPERESTRUCTURA | |
| DUCTOS O CABLES EXPUESTOS (056) | Especificar daños o estado |
| SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> | |
| ANCLAJES DE PREESFUERZO SUELTOS (057) | Especificar daños o estado |
| SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> | |
| CABLES ROTOS (058) | Especificar daños o estado |
| SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> | |
| VAINAS O FUNDAS ROTAS (059) | Especificar daños o estado |
| SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> | |
| CORROSION EN CABLES (060) | Especificar daños o estado |
| SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> | |
| COMENTARIOS GENERAL DE LA SUBESTRUCTURA (061) | |
| | |

Figura 137. Apartado 7 de ficha F-003. Puentes de hormigón presforzado.

- Calificación general del puente:

| 8. CALIFICACION GENERAL DEL PUENTE | |
|---|----------|
| SOCAVACION (062) | 4 |
| CIMENTACION (063) | 3 |
| APOYOS (064) | 3 |
| PIEDRA (065) | 1 |
| SISTEMA DE PISO (LOSAS) (066) | 2 |
| VIGAS Y DIAFRAGMAS (067) | 2 |
| DISPOSITIVOS DE APOYO (068) | 4 |
| TOTAL= _____ | |
| 5. Condición Excelente 4. Condición Buena 3. Condición Aceptable 2. Condición Regular 1. Condición Mala o Defectuosa 0. Condición de Falla | |

Figura 138. Apartado 8 de ficha F-001. Calificación general del Puente. En azul se ha remarcado la valoración realizada al estado de conservación de los aparatos de apoyo.

- Recomendaciones generales:

| 9. RECOMENDACIONES GENERALES | |
|--|---|
| INSPECCIONES (069) | 1 |
| 1. Evaluación a Corto Plazo (Máximo 12 meses) 2. Evaluación a Mediano Plazo (Máximo 2 años) 3. Evaluación a Corto Plazo (Máximo 3 años) 4. Otro (Especificar) | |
| SUPERFICIE DE RODAMIENTO (070) | 1 |
| 1. Evaluación a Corto Plazo (Máximo 12 meses) 2. Evaluación a Mediano Plazo (Máximo 2 años) 3. Evaluación a Corto Plazo (Máximo 3 años) 4. Otro (Especificar) | |
| SUPERESTRUCTURA (071) | 2 |
| SUBESTRUCTURA (072) | 2 |
| 1. Mantenimiento Menor 2. Mantenimiento Mayor 3. Reparación 4. Sustitución 5. Pruebas Especiales 6. Otro (Especificar) | |
| COMENTARIOS (073) | |
| Paso Inferior Vehicular (P.I.V.), Compuesto a base de superestructura espacial tipo tridilosa y subestructura de concreto reforzado; Se recomienda limpieza en superficie de rodamiento así como retiro de material suelto como basura y vegetación en los taludes, estribos, cunetas y lavaderos por parte de la brigada de conservación; Así mismo se recomienda para el mantenimiento mayor a puentes, el suministro y aplicación de impermeabilizante base cemento para el tablero de la losa (superficie de rodamiento), la | |

Figura 139. Apartado 9 de ficha F-003. Recomendaciones generales.

- Fotografías de inspección:

10. FOTOGRAFIAS DE INSPECCION (074)

Las fotografías de inspección deben mostrar las siguientes características

- Al puente en su conjunto
- Deterioros en la estructura del puente

Figura 140. Apartado 10 de ficha F-003. Fotografías de inspección.

5.3.3.3. Informe fotográfico

Se trata de una ficha tipo en la que se distinguen 15 apartados tal y como se indica a continuación:

- Panorámica
- Superficie de rodamiento
- Losa inferior
- Doble vol.
- Estructura
- Detalles de estructura
- Estribos
- Apoyos
- Pilas
- Juntas
- Parapetos
- Conos
- Lavaderos
- Terraplén
- Otras observaciones relevantes

Todos ellos presentan la misma estructura:

- Fotografía del elemento objeto de inspección
- Referencia al cuerpo, vista y lado desde el que se realiza la fotografía
- Breve descripción del estado del elemento o parte de la estructura
- Croquis en planta en el que se indica el punto desde el cual se tomó la fotografía incluida.

5.3.4. Conclusiones

Las fichas de inspección son claras y fáciles de completar lo cual es fundamental para el buen desarrollo de los trabajos. En ellas se valora el daño en cada elemento inspeccionado según el código que se indica a continuación: Falla (1), Mala (2), Regular (3), Aceptable (4), Buena (5) o Excelente (6).

Esta codificación del estado de los distintos elementos de la estructura es habitual pero sería interesante atribuir una serie de pesos a cada uno de los elementos e incluir una valoración global del mismo. Aunque el sistema usado permite ordenar una inspección especial o esperar a la siguiente inspección preliminar se puede obtener una información mucho más precisa con sólo definir unos criterios de ponderación.

Es por ello que se propone definir, al estilo de lo recomendado en la “Guía de Inspecciones Básicas de obras de paso” del Ministerio de Fomento de España publicado en 2009, un índice de gravedad global a partir de descomponer la calificación en un conjunto de calificaciones parciales correspondientes a elementos estructurales o de equipamiento claramente diferenciados.

Además, se propone atribuir un peso a cada uno de los distintos tipos de elementos. Finalmente se puede efectuar una calificación ponderada final de forma que el índice global de gravedad vendrá dado por:

$$\text{Índice global} = (\sum w_i * I_{\text{parcial}}) / \sum w_i$$

A continuación se incluye una propuesta de Tabla de Índices de gravedad parciales y de pesos:

| Índice $I_{parcial}$ | Situación |
|----------------------|--|
| 1 | Defectos sin consecuencia importante |
| 2 | Defectos que indican que <u>la estructura pudiera</u> correr el riesgo de tener una evolución patológica |
| 3 | Defectos que indican el comienzo de una evolución patológica |
| 4 | Defectos que indican que se está produciendo una evolución patológica |
| 5 | Defectos que <u>se pueden traducir</u> en una modificación del comportamiento de la estructura o parte de ella |
| 6 | Defectos que se traducen en la proximidad del estado límite de servicio de toda la estructura o parte de ella necesitando una restricción en el uso, o su puesta fuera de servicio |

Figura 141. Tabla de índices de gravedad parciales.

| Importancia | Peso w_i |
|-------------|------------|
| Nula | 0 |
| Reducida | 1 |
| Media | 5 |
| Alta | 15 |

Figura 142. Tabla de índices de pesos.

Del mismo modo se propone incluir las Bandas de Predicción como herramienta durante la ejecución de las inspecciones y la incorporación de los resultados cualitativos y cuantitativos en las fichas y reportes de inspección.

De esta manera se puede valorar el comportamiento de los aparatos de apoyo con criterios objetivos que justifiquen la decisión de valorar con un valor de $I_{parcial}$ eliminando las actuales imprecisiones recogidas en la Figura 141.

Además, deberían tenerse en cuenta las siguientes observaciones:

- Las Bandas de Predicción son unas herramientas prácticas para la valoración objetiva de las capacidades de los aparatos de apoyo. Se

recomienda incluirlas en las fichas de inspección con el fin de justificar los índices de gravedad parciales tomados.

- Del mismo modo se recomienda incluir la Matriz de correlaciones para obtener una conclusión del comportamiento global de los aparatos de apoyo del puente y su evolución en el tiempo.
- La estimación del estado de las obras de paso debe realizarse asignándoles un índice de condición que se obtiene a partir de la gravedad, de la extensión del deterioro y de su evolución.
- El establecimiento de prioridades de reparación, ponderando a su vez los índices de condición mediante factores que tienen en cuenta la seguridad, la funcionalidad, el tráfico, la importancia del itinerario donde está ubicada la estructura, la posibilidad de itinerarios alternativos, el valor patrimonial o histórico, etc.

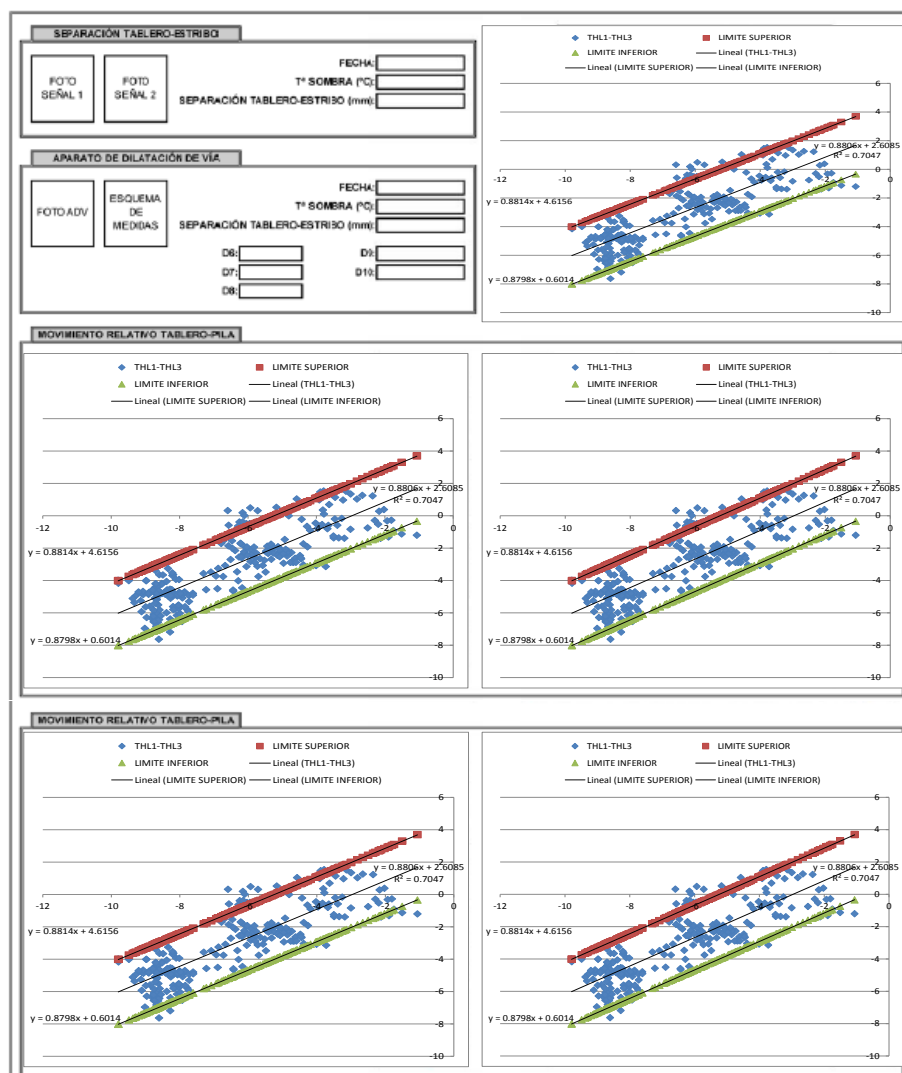


Figura 143. Ejemplo de ficha para control de movimientos en aparatos de apoyo incluyendo las Bandas de Predicción.

- La definición de las alternativas de reparación con su coste, considerando la magnitud de los daños y las circunstancias de accesibilidad en que la reparación debe realizarse; y la elaboración de los programas de actuación, adaptados a los presupuestos anuales disponibles.
- El control y seguimiento de los programas de actuación. Siendo este punto el último en enumerarse resulta un aspecto fundamental en la gestión ya que permite verificar, calibrar y determinar la eficacia de las actuaciones realizadas y su correcta elección y planificación.

5.4. Optimización de recursos en función del estado de los puentes

La predicción del estado futuro de los puentes continúa siendo un reto muy importante de la ingeniería de carreteras.

Para proyectar la evolución del estado de los puentes se utilizan los denominados modelos de deterioro. Existen distintos tipos de estos modelos, los cuales pueden clasificarse de la siguiente manera:

- Subjetivos. “Capturan” la experiencia sobre el deterioro de un modo formal o estructurado, empleando modelos de procesos de transición.
- Puramente mecanicistas. Se basan en algún tipo de variable física medible como el esfuerzo, la deformación o la deflexión.
- De regresión. La variable dependiente, que representa un deterioro funcional o estructural, observado o medido, se relaciona con una o más variables independientes, las cargas por eje o factores ambientales como la temperatura.
- Empírico mecanicistas. A través de ecuaciones de regresión, relacionan un parámetro de respuesta con un deterioro funcional o estructural medido.

Los modelos de deterioro también pueden agruparse en dos clases fundamentales:

- Deterministas. La condición futura se establece mediante un valor preciso, que se calcula relacionando de diversas maneras un indicador de deterioro con un conjunto de variables explicativas. En esta clase se agrupan los modelos puramente mecanicistas, de regresión y empírico mecanicistas antes descritos.
- Probabilísticos. El estado futuro del puente se estima como una función de probabilidad para el conjunto de posibles estados que podrían presentarse.

Se pueden utilizar dos tipos de funciones de probabilidad:

- Función continua. Expresa la probabilidad de que un índice de estado sea mayor que un valor dado en relación con la edad del puente. Este tipo de función se conoce como “curva de supervivencia”.
- Función discreta. Denominada también “función markoviana” porque se basa en el concepto de “cadenas de Markov”, esta función divide el espacio de todas las condiciones posibles en una serie de “estados”.

5.5. Conclusiones

- La mejor acción para cada puente, considerada aislada, no tiene por qué ser la mejor para el conjunto de todos los puentes. Por eso es importante concebir el trabajo de inspección dentro de la globalidad de la red a la que pertenece para la toma de decisiones sobre la conservación de los propios puentes y optimizar recursos económicos.
- En general, los resultados de las inspecciones se revisan y actualizan cada dos años a no ser que la estructura esté clasificada como con riesgo alto de incumplimiento de las normas vigentes. La estimación del estado de las obras de paso debe realizarse asignándoles un índice de condición, al menos en España, que se obtiene a partir de la gravedad, de la extensión del deterioro y de su evolución.
- Actualmente, las inspecciones principales son meramente visuales y se rigen por un sistema de valoración totalmente subjetivo. Las Bandas de Predicción son una aportación para la tecnificación de las inspecciones principales siendo fácilmente interpretables y extensibles a cualquiera de los elementos fungibles de los puentes: aparatos de apoyo, juntas de dilatación, tirantes,... Con estas bandas se dota a la inspección no solo de capacidad de priorizar posibles intervenciones sino de predecir su evolución.
- Por otro lado, algunos sistemas de gestión de puentes como BRIDGIT disponen de módulos de predicción y simulación a partir de Cadenas de Markov u otros más sofisticados y de esta manera se hace una estimación del estado futuro del puente (y de todos aquellos que componen la red) considerando una matriz de probabilidad.
- A pesar de los avances logrados en materia de información y la tecnología computacional, a fecha de hoy la utilidad de los Sistemas de Gestión de Puentes radica fundamentalmente en el manejo de información actualizada, fiable y completa. Fiabilidad implica control, y de ahí la evidente importancia de objetivar y tecnificar la evaluación del estado físico de las estructuras. Esto supone avanzar en la parametrización de los trabajos de campo ofreciendo al inspector herramientas para la valoración cuantitativa del estado y comportamiento del puente. Es bajo este punto de vista que

tendrían utilidad las Bandas de Predicción descritas para el control de los movimientos en los aparatos de apoyo.

- Del mismo modo se recomienda incluir la Matriz de Coeficientes de Correlación para obtener una conclusión del comportamiento global de los aparatos de apoyo del puente y su evolución en el tiempo, tal y como se explicó en el Capítulo IV. Puede interpretarse como una matriz de deterioro inicial que evoluciona en el tiempo.

5.6. Resumen

En la Figura 144 se representa el diagrama que resume la visión integradora que se pretende transmitir la metodología expuesta en este trabajo.

Obsérvese la importancia del dato medido a Nivel de Sensor y su repercusión hasta el Nivel de Red de Infraestructuras mediante la aplicación de distintas herramientas estadísticas.

Estas herramientas estadísticas se incluyen en la Figura 145 y se han descrito en los puntos anteriores de este trabajo.

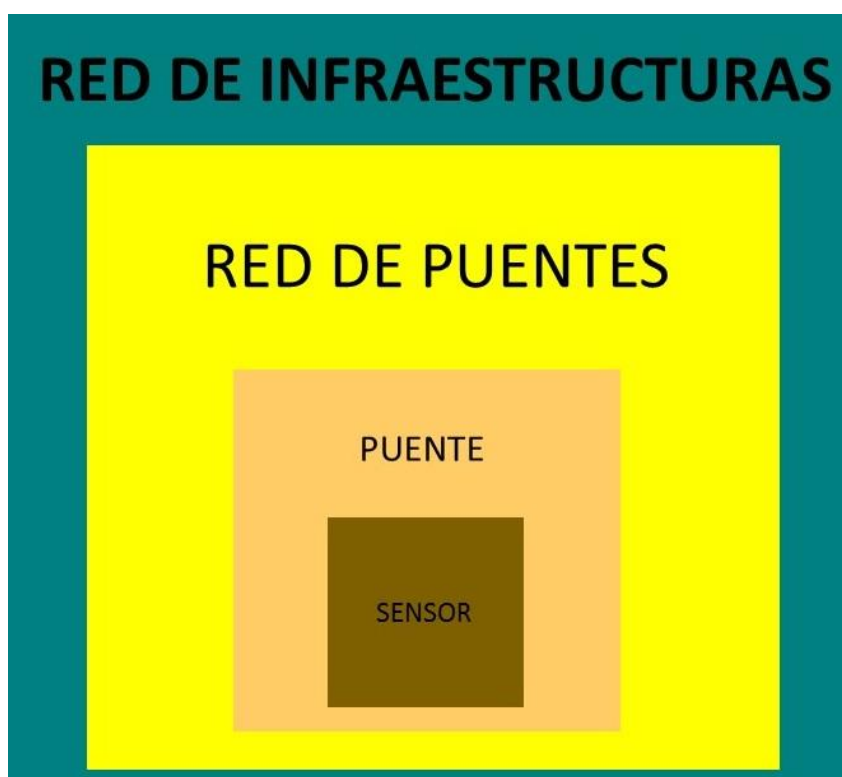


Figura 144. Niveles en un Sistema de Gestión de Infraestructuras.

Estas herramientas estadísticas se incluyen en la Figura 145. Supóngase que se dispone una Red compuesta por n puentes y, cada uno de estos puentes dispone de un Sistema de Instrumentación compuesto por m sensores. Por lo tanto:

- Nivel de Sensor: debe aplicarse la Función de Autocorrelación para conocer la serie de datos a analizar y filtrar las causas especiales existentes. Una vez filtrado se procederá a estudiar mediante los Diagramas de Control la calidad de la serie de datos para afrontar los estudios correspondientes a Nivel de Puente.
- Nivel de Puente: se realizan los modelos de Inferencia Estadística físicamente justificables y entendibles (no heurísticos). Una vez propuestos y alcanzado valores del coeficiente de correlación que garanticen la robustez del modelo propuesto se puede dotar a los modelos de capacidad predictiva mediante las Bandas de Predicción (no extrapolación).
- Nivel de Red: a la hora de gestionar la Red de Puentes y optimizar los recursos mediante simulación de distintas tácticas de gestión de desarrolla un modelo tipo Cadenas de Markov.

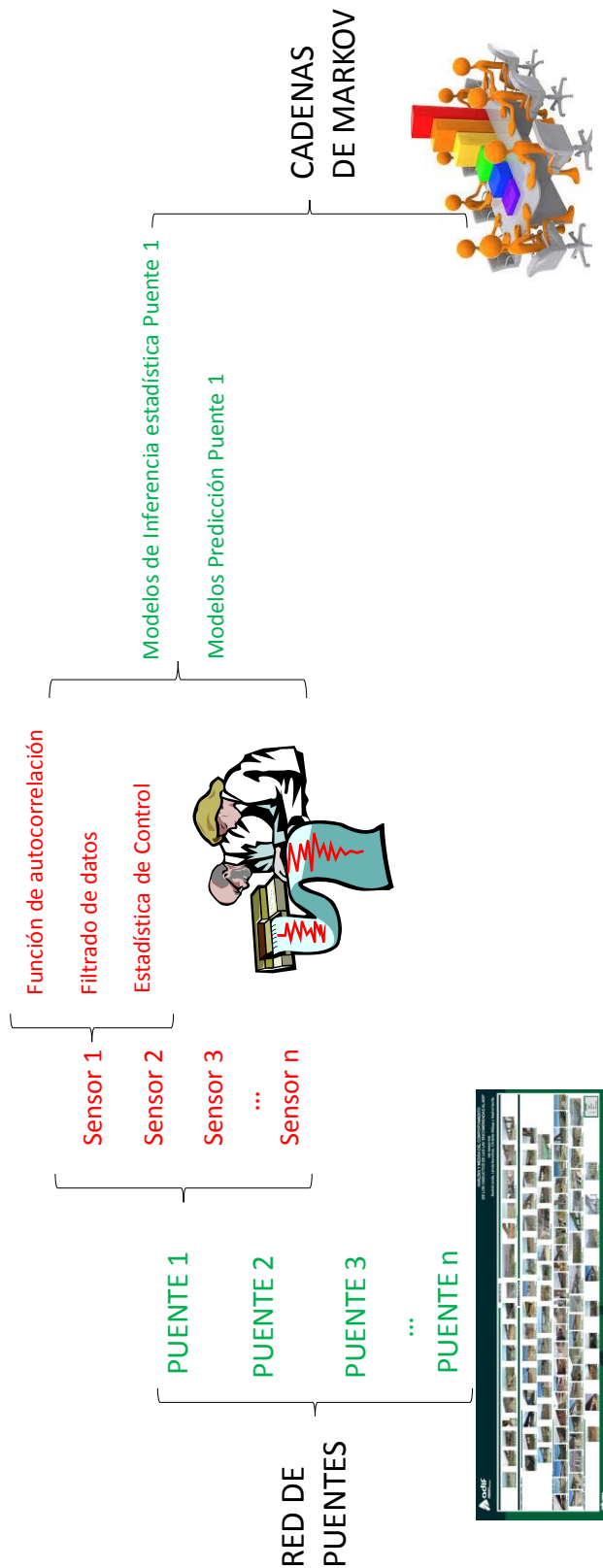


Figura 145. Procedimiento general para análisis de datos en un Sistema de Gestión de Puentes.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

“Cuando se piensa en los entornos como estables, tendemos a perder un sentimiento de responsabilidad por los medios en donde nos movemos”.

Olafur Eliasson

A continuación se recogen, a modo de resumen, algunas de las conclusiones obtenidas durante el desarrollo de este trabajo. Finalmente, se incluye una breve descripción de futuras líneas de investigación y trabajos inconclusos propuestos.



6.1. Introducción

En general se sabe que para un funcionamiento efectivo de un Sistema de Gestión de Puentes es necesario un aporte sistemático de información de calidad sobre las condiciones del puente, coste de los proyectos de mantenimiento y reparación...y su eficiencia a lo largo del tiempo.

La obtención de los datos, sobre todo los procedentes de inspecciones, es costosa y poco homogénea, lo que supone una merma de la calidad en la información que resta rendimiento al sistema.

Por todo ello es necesaria la definición de procedimientos eficaces que reduzcan el coste y mejoren la calidad incluyendo procedimientos estandarizados de inspección

visual, ensayos no destructivos y sistemas de adquisición de datos remotos. Éste es, en resumen, el principal objetivo de esta Tesis.

6.2. Conclusiones

6.2.1. Conclusiones sobre la Instrumentación en fase de construcción

- Se incluyen ejemplos en los que se demuestra la importancia de la Instrumentación para el control de los procesos constructivos y los elementos auxiliares.
- En esa línea se propone la instauración de sistemas de alarmas que analicen de forma autónoma los datos dinámicos y controlen las frecuencias naturales reales de vibración de la estructura independientemente de la fase de construcción en la que se encuentre.
- Cuando se coloca una dovela es posible que no se puedan alcanzar las coordenadas absolutas teóricas esperadas debido a la influencia de la temperatura sobre el tablero ya construido. De este modo, si se quiere trabajar con coordenadas absolutas deberá tenerse en cuenta la influencia del soleamiento.

6.2.2. Conclusiones sobre la Instrumentación en fase de servicio (mantenimiento y explotación)

- En este trabajo se presentan ejemplos reales en los que el control estadístico de calidad es de utilidad. De este modo se demuestra la importancia del conocimiento, por parte del ingeniero analista, tanto de las herramientas estadísticas a usar en cada momento como de los fenómenos físicos que controlan la verdad estructural previa presentación de conclusiones erróneas.
- Las predicciones basadas en las correlaciones son el corazón de los datos masivos. Los métodos de correlación y regresión lineal simple se utilizan para analizar datos bivariados con la finalidad de determinar si un ajuste lineal es adecuado, calcular la ecuación de la recta si así es, y usar esta ecuación con el fin de hacer inferencias respecto de la relación entre ambas cantidades. Sin embargo, es necesario especificar que la correlación no es causalidad por lo que debe entenderse como una prueba de que ante incrementos de una variable se producen (o no) incrementos en otra. No

obstante se puede continuar con el aprovechamiento de los datos mediante el cálculo de Bandas de Predicción para cada uno de los registros analizados.

- Estas Bandas de Predicción son de gran utilidad práctica y su uso como herramienta para el control del comportamiento del elemento que se estudie deberían ser incluidos en las políticas de mantenimiento, gestión y explotación de infraestructuras.
- Estas Bandas de Predicción pueden ser incluidas incluso en las Fichas de Inspección. Lo mismo que la Matriz de Coeficientes de Correlación que se puede considerar como una matriz de referencia u origen para el estudio de la evolución o deterioro en el tiempo.
- Los datos ya no deben contemplarse como algo estático cuya utilidad desaparece en cuanto se alcanza el objetivo para el que han sido recopilados. Por el contrario, los datos se convierten en una materia prima, en un factor vital, capaz de crear una nueva forma de valor económico. En la práctica, con la perspectiva adecuada, los datos pueden reutilizarse inteligentemente para convertirse en fuente de innovación y servicios nuevos.
- Tradicionalmente se ha usado la Instrumentación para relacionar la realidad y los modelos teóricos de cálculo. Sin embargo, ya no se trata de relacionar modelo con realidad, sino de modelo de cálculo estructural a modelo estadístico y viceversa. Es decir, en vez de trabajar con el modelo y la realidad como si de modalidades polarizadas se tratara ahora se trata de enfrentarlas al mismo nivel considerando a ambos coproductores de la realidad. Los resultados son la base para revisar las normativas en uso.
- Los procedimientos de reactivación de un Sistema de Instrumentación propuestos son, por sí mismos, una conclusión aportada por este trabajo.

6.2.3. Conclusiones sobre la toma de los datos durante la Instrumentación

- El sistema de toma de datos Continuo-Discreto presentado en los capítulos anteriores es, en sí mismo, una conclusión aportada por esta Tesis.

6.2.4. Conclusiones sobre el análisis de los datos

- Es necesario calcular la función de Autocorrelación de las series de datos procedentes de la Instrumentación y filtrarlas para eliminar cualquier estacionalidad. Solo de este modo se puede discernir sobre si el parámetro

medido se encuentra bajo control. Una vez verificado es posible obtener un modelo de predicción mediante bandas de incertidumbre suficientemente robusto.

- El filtrado de la temperatura viene a demostrar que en la naturaleza no hay fenómenos estáticos o dinámicos, sino más o menos rápidos. En definitiva todos los fenómenos se pueden representar mediante superposición de ondas. En el caso de la temperatura se puede decir que el ciclo anual respondería un primer modo (el que moviliza más masa). Mientras que el segundo modo sería el diario.
- La mayor complejidad en la aplicación de los métodos de estimación y simulación del deterioro a nivel de red no radica en el método mismo, sino en el tratamiento previo que es necesario dar a los datos, el cual básicamente comprende procesos de filtrado y detección de valores atípicos. Es ahí, precisamente donde incide este trabajo.

6.3. Nuevas líneas de investigación

- En la actualidad se habla abiertamente de BIG DATA y estructuras inteligentes pero lo que se viene haciendo hasta el momento con la Instrumentación de estructuras no se puede incluir bajo esta denominación. En general, los datos a analizar están estructurados según decisión de los ingenieros. Los datos estructurados no son BIG DATA, los no estructurados sí. Acceder a los datos generados por los usuarios a su paso por los puentes daría lugar a una fuente inagotable de registros que alimentarían una base de datos sobre la que se definiría con estadística de control los límites necesarios. Del mismo modo, se podrían definir Bandas de Predicción tal y como se muestra en este trabajo (aplicado a parámetros predominantemente estáticos o lentos). Los puentes más transitados serían los que generarían mayor número de registros informando así, de forma sencilla de su importancia dentro de la red a la que pertenezca.

Por ejemplo, tener datos de aceleraciones supone tener datos de tráfico interpretables desde el punto de vista económico, medioambiental y social. Estos datos ayudarían, por ejemplo, a valorar la sostenibilidad en el diseño de las estructuras. Si bien el anexo 13 de la EHE-2008 establece unos indicadores para medir la sostenibilidad medioambiental, se trata de una

primera aproximación que no contempla la efectiva reducción de aspectos de gran interés: reducción de emisiones de CO₂, reducción en el consumo energético necesario, reducción de la huella ecológica, reducción en el uso de materiales, etc. El Ingeniero del nuevo Siglo se va a enfrentar a una nueva manera de entender las estructuras. Las estructuras como fuente constante de datos y potencial información.

- Debe tenerse en cuenta que los estudios presentados en esta Tesis son analizados en valores relativos, nunca en valores absolutos, por lo que los errores de medida quedan anulados. Sin embargo, en caso de pretender obtener valores absolutos deberían calcularse los errores de las medidas (de sensor, de sistema, de cálculo, etc).
- En esta Tesis se correlacionan series de datos relacionados mediante la Mecánica clásica y la Resistencia de Materiales, sin embargo, el registro total de datos de la Instrumentación se presta a cualquier tipo de cálculo (incluido los de tipo heurístico).
- El estudio de la ampliación dinámica real en función del ratio de frecuencia resonante al paso de circulaciones reales de tipo ferroviario podría ser otro tema abordable. De este modo para cada frecuencia se podría obtener una ampliación dinámica que daría lugar a la obtención de una curva en la que se compararía con las obtenidas teóricamente. En un mismo gráfico se podría representar, para cada tipo de circulación, la amplificación dinámica, el ratio de frecuencia y el amortiguamiento. A su vez, todas las circulaciones podrían ser función de una circulación más una desviación con lo que toda la dinámica del puente, independientemente de la circulación quedaría recogida en una única curva.
- La transmisión de vibraciones de la superestructura a la subestructura podría ser un tema de estudio con el fin de obtener conclusiones relativas a la fuga de vibraciones mediante el estudio de correlaciones cruzadas.
- El estudio del coeficiente de impacto negativo real y teórico (IAPF-07) para tráfico ferroviario.
- En el mundo de diseño de aerogeneradores, se utilizan las matrices de Markov para varias cosas, por ejemplo, el diseño a fatiga de los distintos componentes donde las columnas son rangos (amplitudes de cargas) y las

filas valores medios; y dentro se almacena la cantidad tiempo (horas , minutos o segundos) calculados mediante un proceso de Rainflow Cycle Counting habitual. Este tipo de tratamiento de datos podría ser aplicable a los puentes instrumentados ofreciendo una información fundamental para este tipo de estudios.

- Estudio del amortiguamiento de las pilas usando los datos procedentes de los clinómetros frente a los datos procedentes de los acelerómetros.
- Estudio del Efecto lazo y la relación entre giros transversales y aceleraciones verticales en tablero también es un tema sin resolver y de gran importancia ante la necesidad de construir estructuras cada vez más exigentes geométricamente.
- Finalmente, cabe decir que en los modelos de regresión el objetivo fundamental que se persigue es inferir en la relación existente entre la media de una variable aleatoria, respuesta, y los valores de otra variable observada simultáneamente, covariable, admitiéndose la hipótesis de independencia estadística entre observaciones. Por el contrario, en los modelos de series temporales el objetivo fundamental es el estudio de la dependencia estadística que presentan las observaciones de una cierta respuesta realizadas a lo largo del tiempo. En el caso de que el proceso modelado sea normal, el estudio de dependencia estadística se reduce al estudio de la función de autocovarianza del proceso. Entre los modelos gaussianos o normales que se utilizan con mayor frecuencia destacan los modelos ARMA (modelo auto-regresivo de media móvil).
- Por último, interesa advertir que los objetivos perseguidos con un modelo de regresión (estudio de la media) y con un modelo de series temporales (estudio de dependencia) pueden ser incluidos en un mismo análisis y ser alcanzados con un modelo único tipo ARMA.

Por lo tanto, se presenta como propuesta final de esta Tesis la reproducción de los estudios en ella mediante modelos de series temporales y la discusión de la idoneidad de sus variantes (ARMA, AR, MA), algoritmos genéticos, programación dinámica o redes neuronales.

- En esta Tesis se ha planteado afrontar directamente el problema de la simulación de la eficacia de las distintas tácticas de intervención posibles

(teóricamente infinitas) mediante las Cadenas de Markov. Sin embargo se contempla como futura línea de investigación la integración en el procedimiento general, presentado en la Figura 145, de un rango finito de escenarios resultado de aplicar el Método de Monte Carlo para alimentar la simulación exclusivamente con escenarios realistas (los de mayor probabilidad). Esta línea de investigación, ya iniciada por el autor de esta Tesis, supondría la aportación definitiva para configurar una metodología global para el aprovechamiento máximo de la experiencia de la Instrumentación en el campo de la Ingeniería para el nuevo Siglo.

“Tengo las manos de ayer. Me faltan las de mañana”

Eduardo Chillida

ANEXO I

ESTADÍSTICA A NIVEL DE SENSOR

La descripción de un sensor y su papel en el Sistema de Instrumentación se basa en los siguientes parámetros:

Calibración en vacío: es el proceso mediante el cual se comprueban varias medidas en vacío. Se trata, básicamente, de la comprobación del “cero” cuando el sensor está midiendo en vacío. También se comprueba la medida de valores conocidos y comparables. Estos datos son valiosos y deben ser almacenados.

Rango: se define como la diferencia entre el valor máximo y mínimo que un sensor puede medir. Además, los sensores están diseñados para proporcionar una respuesta predecible y, por lo general, lineal para el rango especificado.

Sensibilidad: cambios en la señal de salida frente a los cambios en la señal de entrada. La sensibilidad suele ser constante. Por lo general, el sensor tiene sensibilidad lineal.

Resolución: cambio mínimo en la señal de entrada que produce una variación en la señal de medición.

Threshold: valor mínimo en la señal de entrada para la cual existe valor de salida. Por debajo de este valor el sensor lee cero.

Cero de un instrumento: se refiere siempre a una serie de datos. La salida del sensor se ajusta siempre para que lea “cero” en un punto concreto incluido en el rango de medida.

Desvío del cero: cambio en las lecturas con respecto al cero en un determinado periodo de tiempo. Suele deberse a cambios meteorológicos, condiciones eléctricas, incorporación de nuevos sensores o daño material en el sensor. Este error suele ser significativo cuando un sensor lleva midiendo durante un periodo largo de tiempo.

Fluencia: pérdida de estabilidad en la medida cuando las condiciones (ambientales, estructurales y electrónicas del sensor) no lo justifican.

Exactitud: máxima diferencia entre una medida y su valor real. Normalmente se expresa en términos de % de la escala de la señal de salida. En el sentido estricto, la exactitud nunca se puede conocer realmente porque el valor real nunca se conoce.

Precisión: es una medida de repetitividad. Cuando una variable es precisa quiere decir que sus medidas tienen poca dispersión entre sí. Una medida precisa puede tener, en cambio, una pobre exactitud si no se encuentra próxima al valor real.

Linealidad: describe la máxima desviación con respecto a la recta de calibración de la señal de salida del sensor. La mayor parte de los sensores son diseñados según una relación lineal con respecto a la señal de entrada. Por ejemplo, la recta de mínimos cuadrados está referida a la línea para la cual la suma de los cuadrados de los residuos es mínima. El término “residual” hace referencia, precisamente, a las desviaciones de las lecturas del sensor con los valores correspondientes a la línea de ajuste de los datos.

Histéresis: es la máxima diferencia de la señal de salida para cualquier valor dentro del rango especificado, cuando se provoca primero un aumento y luego una disminución de la señal de entrada. La histéresis está causada por un retraso en la acción del elemento de detección del transductor. La histéresis se expresa habitualmente en porcentaje de la escala de la señal de salida.

Banda de error: es una banda limitada por la máxima desviación de los valores de salida con respecto a una línea o curva de referencia. Se determina sobre la base de las desviaciones máximas observadas durante al menos dos ciclos de calibración consecutivos con el fin de incluir repetitividad. La banda de error representa las desviaciones que puedan deberse a la no linealidad, no repetitividad, histéresis, desplazamiento del cero, cambio de sensibilidad, y así sucesivamente. Es una forma conveniente de especificar el comportamiento del transductor cuando los distintos tipos de desviaciones no deben ser especificados ni determinados.

Calibración estática: básicamente se puede considerar la calibración estática como un proceso de comparación de la salida de un sistema de medida con respecto a una serie de valores conocidos de señales de entrada. Sin embargo, un sistema de medición calibrado con señales estáticas no puede leer correctamente cuando se someten a las señales de entrada dinámicas ya que las características dinámicas naturales y las características de respuesta del sistema de medición de la función de entrada forzando no se contabilizarían con una calibración estática. Un sistema de medición utilizado para señales dinámicas deberá calibrarse utilizando entradas dinámicas conocidas. Aunque lineal en la mayoría de los casos, la curva de calibración de un sistema de medición específico puede requerir una elección de una forma funcional no lineal para la relación que mejor describe los datos de calibración.

Datos sin sesgo (unbiased): los conjuntos de datos tienen dos importantes características: una tendencia central (o valor más representativo) y una dispersión. Un problema básico en cada experimento es obtener una estimación sin sesgo del valor verdadero de una cantidad, así como una medida objetiva de la dispersión o incertidumbre en la variable medida. Puesto que los errores se producen en todas las mediciones, nunca se puede medir con exactitud el verdadero valor de cualquier cantidad. El perfeccionamiento continuo de los métodos utilizados en las mediciones ha dado aproximaciones cada vez más cercanas, pero siempre hay un límite más allá del cual los refinamientos no se pueden hacer. Para determinar la relación que un valor medido tiene con el valor real, se debe especificar la estimación no sesgada del valor real de una medición y su incertidumbre (o precisión), es

decir, se debe indicar un intervalo basado en un Nivel de confianza deseado (o probabilidad de ocurrencia).

Muestreo: las estimaciones de la media, varianza y desviación típica dependerán del tipo de muestreo usado: muestreo con (muestreo aleatorio) o sin reemplazo (caso general).

$$\hat{\mu} = \bar{x}$$

$$\hat{\sigma}^2 = S^2 \frac{n}{n-1}$$

$$S^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n}$$

$$\hat{\sigma}_{\bar{x}}^2 = \frac{\hat{\sigma}^2}{n}$$

Estimaciones para muestra con reemplazo

$$\hat{\mu} = \bar{x}$$

$$\hat{\sigma}^2 = S^2 \left(\frac{n}{n-1} \right) \left(\frac{N-1}{N} \right)$$

$$\hat{\sigma}_{\bar{x}}^2 = \frac{\hat{\sigma}^2}{n} \left(\frac{N-n}{N-1} \right)$$

Estimaciones para muestra sin reemplazo

Tipos de errores: Normalmente se consideran dos tipos de errores a tener en cuenta cuando se habla de mediciones: sistemáticos o fijos, y errores aleatorios. Los errores sistemáticos son los que se producen de manera constante. Son el resultado de condiciones o procedimientos que son corregibles. Este tipo de error puede generalmente ser eliminado mediante calibración. Los errores aleatorios son errores accidentales que se producen en todas las mediciones. Se caracterizan por su naturaleza inconsistente, y su origen no puede determinarse en el proceso de medición. Estos errores se calculan por análisis estadístico. Existe un tercer tipo de errores, que se denominan ilegítimos o fallos. Estos errores son fallos humanos en la medición, por ejemplo, y no deben existir. Pueden ser eliminados mediante el uso de la atención en el experimento, los procedimientos de medición adecuados, y la repetición de la medición. Si los errores ilegítimos o fallos pueden ser eliminados por el cuidado y procedimientos de medición adecuados y los

errores sistemáticos pueden ser eliminados por la calibración del sistema de medición, quedarán únicamente los errores aleatorios que deberán ser determinados por análisis estadístico para aquilatar la precisión en la medición.

Propagación del error o Incertidumbre: En muchos casos la medida que se busca no se puede medir directamente y debe ser calculada a partir de valores representativos de dos o más medidas. Por lo tanto, se hace necesario conocer la incertidumbre o la precisión del nuevo valor resultante del cálculo. La precisión normalmente se especifica por los llamados índices de precisión ($\pm W_x$) que se calculan a partir de los errores aleatorios de diversas medidas. Para cada variable medida se debe conocer su índice de precisión $\pm W_x$. Los intervalos de confianza o de probabilidad para la obtención del intervalo $\pm W_x$ generalmente se especifican directamente o quedan implícitos en el tipo particular de índice de precisión que se utiliza. El índice de precisión de una cantidad calculada depende de los índices de precisión de las cantidades medidas necesarias para el cálculo. Si se determinan de forma independiente las cantidades medidas y si su distribución sobre una medida de tendencia central es aproximadamente simétrica, la propagación del error sería:

$$W_R^2 = \sum \left(\frac{dR}{dx_i} \right)^2 W_{x_t}^2$$

En esta ecuación R representa la magnitud calculada y x_i representa las variables independientes. El índice de precisión es una medida de la dispersión con respecto a la tendencia central y, normalmente, se usa la desviación típica como valor. Este tipo de metodología para el cálculo de la propagación del error se usa también en el desarrollo de experimentos.

Intervalo de incertidumbre: Cuando se han obtenido varias mediciones de una variable para formar un conjunto de datos (datos multimuestrales), las mejores estimaciones del valor más representativo (media) y de dispersión (desviación estándar) se obtienen a partir de las fórmulas indicadas en el punto "Muestreo". Cuando existe una sola medición (o cuando se toman los datos de manera que sean equivalentes a una sola medición), la desviación estándar no puede ser determinada y los datos se dice que son "de una sola

muestra de datos". En estas condiciones la única estimación del valor verdadero es la única medición, y se recomienda que el índice de precisión se estime como el error máximo razonable. Esto corresponde aproximadamente al Nivel de confianza del 99% asociado con los datos de multimuestreo.

Intervalo de incertidumbre considerando el error aleatorio: Una vez que las estimaciones insesgadas de media y la varianza se determinan a partir de la muestra de datos, el intervalo de incertidumbre para μ es:

$$\hat{\mu} \pm \hat{W} = \hat{\mu} \pm k(v, \gamma) \hat{\sigma}$$

donde $\hat{\mu}$ representa el valor más representativo de μ partir de los datos medidos y \hat{W} es el intervalo de incertidumbre o índice de precisión asociada a la estimación de μ . La magnitud del índice de precisión o intervalo de incertidumbre depende del Nivel de confianza γ (o probabilidad elegida), la cantidad de datos n , y el tipo de distribución de probabilidad que regula la distribución de los elementos medidos. Intervalo de incertidumbre considerando el error aleatorio, resolución, truncamiento y número de dígitos significativos El intervalo de incertidumbre \hat{W} en la ecuación anterior supone un conjunto de valores medidos teniendo en cuenta únicamente el error aleatorio. Por otra parte, se supone que el conjunto de valores medidos, que se muestra con un número significativo de dígitos, se ha obtenido con un sistema de medición de resolución infinita. Cuando existe resolución finita y se aplica el truncamiento de dígitos, el intervalo de incertidumbre puede ser mayor que si se considera sólo el error aleatorio. El intervalo de incertidumbre nunca puede ser inferior a los límites de la resolución o límites de truncamiento de los valores medidos.

Resolución y truncamiento: Sea $\{s_n\}$ el conjunto teóricamente posible de mediciones de cifras significativas no limitadas en un sistema de medida de resolución infinita, y sea $\{x_n\}$ el conjunto real de las mediciones expresadas con m cifras significativas en un sistema de medida de resolución finita. Entonces $s_i - x_i = \pm e_i$ es la resolución o la deficiencia de truncamiento causada por el proceso de medición. Las estimaciones no sesgadas de la media y la varianza son:

$$\hat{\mu} = \frac{\sum s_i}{n} = \bar{s} \quad \hat{\sigma}^2 = \frac{\sum (s_i - \bar{s})^2}{n-1}$$

Teniendo en cuenta que el conjunto $\{x_n\}$ está disponible en lugar de $\{s_n\}$, la media y la varianza resultan:

$$\hat{\mu} = \frac{\sum x_i}{n} \pm \frac{\sum e_i}{n} = \bar{x} \pm \frac{\sum e_i}{n} \quad \hat{\sigma}^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}$$

El truncamiento o la resolución no afecta a la estimación de la varianza, pero sí afecta a la estimación de la media porque no se distribuye necesariamente al azar y puede tener un único signo (positivo o negativo). Por lo tanto \bar{x} puede estar sesgada tanto como $\sum e_i / n$ por arriba o por debajo de la estimación objetiva del valor μ de modo que $\hat{\mu} = \bar{x} \pm \bar{e}$.

Si el truncamiento no es más que el dado por los límites de la resolución (R) del sistema de medición, la incertidumbre en x como medida representativa de μ nunca será mayor que R más la incertidumbre debido al error aleatorio. Por lo tanto:

$$\hat{\mu} = \bar{x} \pm (\widehat{W} + R)$$

Cabe destacar que el intervalo de incertidumbre nunca puede ser inferior a los límites de resolución de la medición. Los límites de resolución no se pueden reducir sin cambiar el sistema de medición.

Dígitos significativos: Cuando x_i es observada con m dígitos significativos, la incertidumbre (excepto para el error aleatorio) nunca es mayor de $\pm 5/10^m$ y los límites para si serán:

$$x_i - \frac{5}{10^m} < s_i < x_i + \frac{5}{10^m}$$

La relación para el valor estimado de μ teniendo en cuenta los m dígitos significativos será:

$$\hat{\mu} = \bar{x} \pm \frac{\sum e_i}{n} = \bar{x} \pm \frac{\sum (\frac{5}{10^m})}{n} = \bar{x} \pm \frac{5}{10^m}$$

El valor estimado de la varianza no viene afectado por la magnitud constante de $5/10^m$. Cuando la incertidumbre debida a los dígitos significativos se combina con los límites de resolución y el error aleatorio, el intervalo de incertidumbre pasa a ser:

$$\hat{\mu} = \bar{x} \pm (\widehat{W} + R + \frac{5}{10^m})$$

Teniendo todo esto en cuenta se llega a la conclusión de que el número de dígitos significativos de una medición debe ser cuidadosamente elegido en relación con los límites de resolución del sistema de medición de manera que $5/10^m$ sea aproximadamente de la misma magnitud que R . Dígitos significativos adicionales implicarían mayor exactitud en la medida de la que realmente existe teniendo en cuenta la capacidad de resolución del sistema de medición.

Tamaño de la muestra: Saber exactamente el tamaño de la muestra y qué datos tomar son dos cuestiones importantes a resolver en cualquier experimento. Suponiendo que se han medido las variables correctas, el tamaño de la muestra se puede definir como:

$$\mu = \bar{x} \pm (\widehat{W}_{\bar{x}} + R + \frac{5}{10^m})$$

Donde se supone que existen distintas muestras para la estimación de μ y la media de las medias se representa como \bar{x} . Esta ecuación puede reescribirse asumiendo que se trata de una variable aleatoria.

$$\mu = \bar{x} \pm (k(v, \gamma) \widehat{\sigma}_{\bar{x}} + R + \frac{5}{10^m}) = \bar{x} \pm (k(v, \gamma) \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} + R + \frac{5}{10^m})$$

El valor de n para conseguir una diferencia $x - \mu$ dada como un % de μ se puede determinar como:

$$n = \left[\frac{k(v, \gamma) \hat{\sigma}}{\left(\frac{\%}{100}\right) \hat{\mu} - R - \left(\frac{5}{10^m}\right)} \right]^2$$

Esta ecuación solo ofrece valores válidos de n una vez se han estimado y validado el resto de parámetros.

Esto significa que los valores más correctos de n sólo se pueden obtener una vez que se han especificado el sistema de medición y el procedimiento de toma de datos para los que se conocen R y m . Además, ya sea un experimento preliminar o una parte del experimento real se debe realizar para obtener buenas estimaciones de μ y σ . Debido a que depende no sólo del tipo de distribución de los datos, sino también del tamaño de la muestra n , la solución requiere de un proceso iterativo.

Por lo tanto, las mejores estimaciones de la cantidad de datos a tomar sólo se pueden obtener después de que se haya comenzado el experimento. Sin embargo, la ecuación puede ser muy útil para fines de predicción si se desean estimar los valores de μ , σ , K , R , y m . Esto es especialmente importante en los experimentos para los que el coste de una sola pasada puede ser relativamente alta.

Bondad del ajuste: Métodos estadísticos pueden utilizarse para ajustar una curva a un conjunto de datos dado. En general, el principio de mínimos cuadrados se usa para minimizar la suma de los cuadrados de las desviaciones de distancia de la curva para el montaje. Las desviaciones con respecto a una curva y asumida se deben a errores en y , en x , o en ambos x e y . En la mayoría de los casos los errores en la variable independiente x son mucho menores que la variable dependiente y . Por lo tanto, sólo los errores en y se consideran para la curva de mínimos cuadrados. La bondad de ajuste de una curva asumido se define por el coeficiente de correlación r , donde

$$r = \pm \sqrt{\frac{\sum(y-\bar{y})^2}{\sum(y_i-\bar{y})^2}} = \pm \sqrt{1 - \frac{\sum(y_i-y)^2}{\sum(y_i-\bar{y})^2}} = \pm \sqrt{1 - \frac{\hat{\sigma}_{y,x}^2}{\hat{\sigma}_y^2}}$$

Cuando el coeficiente de correlación es cero, los datos no se pueden explicar con la supuesta curva. Sin embargo, cuando r está próximo a ± 1 , la variación de y con respecto a x se puede explicar según la curva supuesta según una buena correlación.

La expresión que expresa la bondad del ajuste viene dada por:

$$P[r_{calc} > r] = \alpha = 1 - \gamma$$

Donde r_{calc} se calcula según la expresión anterior, y las hipótesis nula y alternativa son como se indica a continuación:

H_0 : No hay correlación de la ecuación de regresión con los datos.

H_1 : Correlación de la ecuación de regresión con los datos.

La bondad de ajuste para una línea recta se determina comparando r_{calc} con el valor de r obtenido en $n-2$ grados de libertad a un Nivel de confianza seleccionado γ de las tablas. Si $r_{calc} > r$, la hipótesis nula es rechazada y se debe inferir un ajuste significativo de los datos dentro del Nivel de confianza. Sin embargo, si $r_{calc} < r$, la hipótesis nula no

puede ser rechazada y no hay correlación del ajuste de la curva con los datos para el Nivel de confianza escogido.

Función de densidad o probabilidad: si se considera la medición de una cantidad x . Se tiene:

x_i : medición i de la cantidad

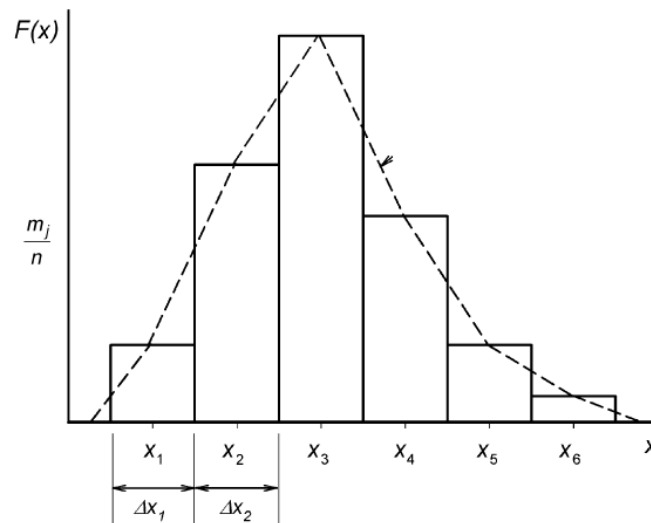
x : valor más representativo de la magnitud medida

d_i : desviación de la medición $x_i - x$

n : número total de mediciones

Δx : cambio medible más pequeño de x .

m_j : número de mediciones en el grupo de tamaño x_j



En el histograma y el polígono de frecuencias se tiene:

$$x_j - \left(\frac{1}{2}\Delta x_j\right) \leq x < x_j + \left(\frac{1}{2}\Delta x_j\right)$$

La altura de cada rectángulo del histograma representa la proporción m_j/n y es igual a la probabilidad $F_j(x)$ de que un valor x sea igual a $x_j \pm \Delta x_j/2$. De esta manera se pueden asemejar las siguientes expresiones:

$$p(x)_j = \frac{m_j}{n\Delta x}$$

Además, la forma del histograma se conserva porque en la transformación la ordenada se modifica por un factor de escala constante ($1/\Delta x$). El diagrama resultante se denomina función de densidad o de probabilidad.

La suma total de las áreas bajo los rectángulos es igual a la unidad. En el límite, cuando el número de datos se aproxima a infinito En el límite, como el número de datos se aproxima al infinito y el recuento se hace progresivamente más pequeño, se obtiene una curva suave llamada función de densidad o de probabilidad.

Para integrar esta expresión, se requiere la función de densidad de probabilidad exacta de $p(x)$. Sobre la base de las hipótesis formuladas, se han obtenido varias formas de las leyes de distribución de frecuencias.

La distribución de un conjunto propuesto de mediciones es generalmente desconocida inicialmente. Sin embargo, la distribución normal (e incluso binormal) se ajusta a las distribuciones de datos observados en un gran número de casos.

$$p(x) = \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\right)e^{-(x-\bar{x})^2/2\sigma^2}$$

Definición del intervalo de confianza para la media μ : Si se tiene un conjunto de medidas función de una variable aleatoria x , entonces el teorema central del límite afirma que la distribución de medias de las muestras de tamaño n es gaussiana (normal) con media μ y varianza $\sigma_{\bar{x}}^2 = \frac{\sigma^2}{n}$ y, por lo tanto, $\bar{x} \sim G(\mu, \frac{\sigma^2}{n})$.

Además, la variable $z = (\bar{x} - \mu)/(\frac{\sigma}{\sqrt{n}})$ también es gaussiana con media cero y varianza unidad.

La variable aleatoria z se utiliza para determinar los límites de confianza en μ debido al error aleatorio de las mediciones cuando σ se conoce.

El límite de confianza se determina a partir de la siguiente afirmación probabilística y la Distribución de Gauss para un Nivel de confianza deseado:

$$P \left[-z < \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} < z \right] = \gamma$$

En general:

$$\mu = \bar{x} \pm k \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Donde k depende del Nivel de confianza que se lee de la propia distribución normal.

Inferencia y comparación: Bajo ciertas condiciones específicas algunos eventos siempre existen. Algunos otros eventos, sin embargo, pueden o no suceder. En las mismas condiciones específicas, estas últimas dependen de la aleatoriedad y, por lo tanto, la probabilidad de ocurrencia de este tipo de eventos no es segura. En general, responder correctamente a las preguntas derivadas de la observación de las medidas implica el diseño de experimentos, la realización de mediciones, análisis de datos e interpretación de los resultados. En este empeño se observan dos fenómenos comunes: (1) mediciones repetidas del mismo atributo difieren debido a errores de medición y la resolución de la capacidad del sistema de medición y (2) los atributos de entidades idénticas difieren debido a las diferencias materiales, las tolerancias de fabricación, desgaste de la herramienta, etcétera.

Las conclusiones basadas en experimentos son inferencias estadísticas y sólo se puede hacer con algún elemento de duda. Los experimentos se llevan a cabo para hacer inferencias estadísticas con mínima duda. Por lo tanto, los experimentos están diseñados especificando los datos requeridos, la cantidad de datos necesarios, y los límites de confianza deseado para sacar conclusiones. En este proceso se especifica un Sistema de Instrumentación, un procedimiento de toma de datos, y un método estadístico para obtener conclusiones en los Niveles de confianza preseleccionada.

En el análisis estadístico de los datos experimentales se consideran tanto las tareas descriptivas como las de inferencia.

La tarea descriptiva supone presentar un conjunto comprensible de observaciones. La tarea de inferencia determina la validez de la totalidad mediante el examen de una muestra. La tarea de inferencia requiere el muestreo, la comparación, y una variedad de pruebas estadísticas para obtener estimaciones sin sesgo y límites de confianza para tomar decisiones.

Contraste de hipótesis: Una hipótesis estadística es una afirmación relativa a la distribución de una variable aleatoria. El contraste de hipótesis estadística es un procedimiento para aceptar o rechazar la hipótesis. Una hipótesis se indica de tal manera que el experimento intenta anular la hipótesis. Por lo tanto, la hipótesis a prueba se llama hipótesis nula, H_0 . Todas las alternativas a la hipótesis nula se denominan hipótesis alternativas, H_1 . Si los resultados del experimento no pueden rechazar H_0 , el experimento no puede detectar las diferencias en las mediciones en el Nivel de probabilidad elegido.

En definitiva, la prueba estadística determina si un proceso o producto es mejor que otro con algún grado de confianza declarado. El concepto se puede utilizar con una cierta distribución estadística para determinar los límites de confianza.

Comparación entre variables (F de Snedecor): Para probar si dos muestras son de la misma población, se compara en primer lugar su variabilidad o dispersión característica usando la distribución F de Snedecor.

Si x e y son variables aleatorias de muestras diferentes, los parámetros $U = \sum(x_i - \bar{x})^2 / \sigma_x^2$ y $V = \sum(y_i - \bar{y})^2 / \sigma_y^2$ son también variables aleatorias y siguen distribuciones Chi-cuadrado siendo $v_1 = n_1 - 1$ y $v_2 = n_2 - 1$ los grados de libertad de cada variable respectivamente. De esta manera la nueva variable $(U/v_1)/(V/v_2)$ responde a la función F de Snedecor con v_1 y v_2 grados de libertad ($W \sim F(Y, v_1, v_2)$)

$$P[F_L < W < F_R] = \gamma$$

$$W = \left(\frac{U}{v_1}\right) / \left(\frac{U}{v_2}\right) = \frac{\hat{\sigma}_1^2}{\hat{\sigma}_2^2}$$

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

$$H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

Comparación de medias (T de Student): La experimentación industrial compara a menudo dos conjuntos de datos para determinar si la resistencia, dureza, o la vida residual ha sido mejorada como consecuencia de la aplicación de un nuevo tratamiento o procedimiento. Si se supone que el tratamiento no cambia la variabilidad de los artículos

ensayados (H_0), entonces la distribución T determina si el tratamiento tuvo un efecto significativo en las características de la pieza (H_1).

$$t = \frac{d - \mu_d}{\sigma_d}$$

$$d = \bar{x}_1 - \bar{x}_2$$

$$\mu_d = \mu_1 - \mu_2$$

$$\sigma_d^2 = \sigma_{\bar{x}_1}^2 + \sigma_{\bar{x}_2}^2 = \frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}$$

$$\sigma_c^2 = \frac{\hat{\sigma}_1^2 v_1 + \hat{\sigma}_2^2 v_2}{v_1 + v_2}$$

$$\sigma_d^2 = \frac{\hat{\sigma}_c^2}{n_1} + \frac{\hat{\sigma}_c^2}{n_2} = \sigma_c^2 \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)$$

$$P \left[-t\sigma_c \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} < \bar{x}_1 - \bar{x}_2 < t\sigma_c \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \right] = \gamma$$

$$\tan \theta = \frac{\hat{\sigma}_1 / \sqrt{n_1}}{\hat{\sigma}_2 / \sqrt{n_2}}$$

Comparación de distribuciones (Chi-cuadrado): La distribución Chi-cuadrado se utiliza para probar si el fenómeno observado encaja o no en lo esperado o teórico. La frecuencia de las clases esperadas se basa en una supuesta distribución o una hipótesis H_0 . Esta prueba estadística se utiliza para comparar el rendimiento de las máquinas, por ejemplo.

El estadístico Chi-cuadrado se define como:

$$\sum \left[\frac{(O_j - E_j)^2}{E_j} \right]$$

donde O_j es la frecuencia observada de ocurrencia en el intervalo de clase j y E_j es la frecuencia esperada de aparición en el intervalo de clase j . La frecuencia de las clases se basa en una supuesta distribución o hipótesis H_0 .

ANEXO II

ESTADÍSTICA A NIVEL DE MEDICIÓN

La medición es el proceso por el cual se realiza una comparación cuantitativa entre un estándar y un valor a medir (mensurando). El patrón de comparación es de la misma naturaleza que el mensurando, y la medida en que se refiere a la ingeniería mecánica de las normas están definidas por la ley y mantenida por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST, antes conocido como el Oficina Nacional de Normas y Unidades de Medida). Las cuatro unidades independientes que se han definido son longitud, tiempo, masa y temperatura. Todas las demás unidades se derivan de estas cuatro.

Exactitud y precisión: En la práctica, se usan cuatro términos para describir la medición que realiza un instrumento: la exactitud, la precisión, la sensibilidad y la linealidad.

La precisión es la capacidad de la lectura para acercarse al valor verdadero. Puesto que hay algún error en cada lectura, el valor verdadero nunca se conoce.

Los instrumentos de medición deben compararse con un estándar de forma regular, para medir siempre con exactitud.

Sensibilidad y resolución: Estos dos términos tienen que ver con el más pequeño cambio en la cantidad medida ante la cual el instrumento responde. Obviamente, la exactitud de un instrumento dependerá en cierta medida de la sensibilidad. Si, por ejemplo, la sensibilidad de un transductor de presión es de 1 kPa, cualquier lectura particular del transductor tiene un error de potencial de al menos 1 kPa. Si las lecturas esperadas están en el intervalo de 100 kPa y un posible error de 1% es aceptable, entonces el transductor con una sensibilidad de 1 kPa puede ser aceptable, dependiendo de lo que otras fuentes de error presenten en la medición. Por otro lado, un instrumento muy sensible es difícil de usar. Por lo tanto, una sensibilidad significativamente mayor que la necesaria para obtener la precisión deseada no es preferible.

Linealidad: La curva de calibración de un instrumento no tiene por qué ser una línea recta. Sin embargo, es preferible que la conversión de una lectura en el valor medido correspondiente se pueda hacer mediante la multiplicación por una constante en lugar de una curva de calibración no lineal o mediante el cálculo de una ecuación. En consecuencia los fabricantes de instrumentos en general, tratan de producir instrumentos con una lectura lineal, y el grado en que un instrumento se acerca a este ideal viene indicado por su linealidad. Varias definiciones de linealidad se utilizan en la especificación del instrumento. La llamada linealidad independiente es probablemente la más utilizada en las especificaciones. Para esta definición los datos para la lectura de instrumentos frente a la entrada se representan gráficamente y luego se ajustan los datos mediante el método de los mínimos cuadrados. La linealidad es entonces una medida de la desviación máxima de cualquiera de los puntos de calibración de la línea recta. Esta desviación se puede expresar como un porcentaje de la lectura real o un porcentaje de la lectura a escala completa. Este último es, probablemente, el más comúnmente utilizado, pero esto puede hacer que un instrumento parezca ser mucho más lineal de lo que realmente es.

Cabe señalar que, aunque las especificaciones pueden referirse a un instrumento con una linealidad dada en tanto por ciento, a lo que hace realmente referencia es a un porcentaje de no linealidad. Si no se especifica este matiz como si fuera una linealidad independiente, el usuario del instrumento debe tratar de minimizar el error en las lecturas mediante la selección de una escala, si esa opción está disponible, de tal manera que la lectura real esté cerca de la escala completa.

Para los instrumentos que utilizan procesamiento digital, la linealidad sigue siendo un problema ya que el convertidor analógico-digital que se utiliza puede ser no lineal. Por lo tanto las especificaciones de linealidad siguen siendo esenciales.

Impedancia: Cuando se realiza cualquier medición se debe responder a dos preguntas: ¿cómo se ve afectada la medida por el instrumento utilizado para medirla? ¿Sería la cantidad medida la misma si el instrumento no hubiera estado allí? Si las respuestas a estas preguntas son no, el efecto del instrumento se llama interferencia. Para caracterizar la interferencia, se usan los conceptos de rigidez e impedancia. En la entrada de cada componente en un sistema de medición existe una q_{i1} variable que es la que valora la transmisión de información. En el mismo punto, sin embargo, está asociado con q_{i1} otra

q_{i2} variable tal que el $q_{i1} q_{i2}$ producto tiene las dimensiones de energía y representa la velocidad a la que la energía está siendo retirada del sistema. Cuando se identifican estas dos cantidades, la impedancia de entrada generalizada Z_{gi} puede ser definida como

$$Z_{gi} = q_{i1} / q_{i2}$$

Donde q_{i1} es una variable de resistencia.

El q_{i2} cantidad se llama la variable de flujo o por medio de la variable. En el caso dinámico estas variables pueden ser representadas en el dominio de la frecuencia por su transformada de Fourier.

No todas las interacciones entre un sistema y un dispositivo de medición se prestan a este tipo de análisis. Un tubo de Pitot, por ejemplo, insertado en un campo de flujo distorsiona el campo de flujo, pero no extrae energía del campo.

Por otro lado, supóngase el caso de un manómetro de presión incrustado en el subsuelo. Tal calibre, si es mucho más rígido que el suelo circundante, tomará una parte desproporcionada de la carga total y, en consecuencia indicará una presión más alta que la que habría existido en el suelo si el medidor no hubiera estado allí.

Análisis del error: Se puede aceptar como axioma que siempre habrá errores en los valores medidos. Así, si se mide una cantidad X , la diferencia entre el valor correcto q y X vendrá dada por:

$$\pm (q - X) = e \text{ o } q = X \pm e$$

Es esencial, por lo tanto, en todos los trabajos de medición que se haga una estimación adecuada del error e .

Sin tal estimación de la medición del error la medida X no tiene completa validez. Hay dos formas de estimar el error en la medición. La primera es la estimación externa del parámetro C_e , donde $C_e = e/q$. Esta estimación se basa en el conocimiento de los equipos de prueba y medición y en cierta medida de la C_i estimación interna.

La estimación interna se basa en un análisis de los datos utilizando los conceptos estadísticos.

Estimaciones internas: Por lo general, no se pueden repetir las mediciones muchas veces. Sin embargo los medios estandarizados para el tratamiento de resultados de mediciones repetidas son útiles, incluso en el análisis de errores para una sola medida.

Si alguna cantidad se mide muchas veces y se supone que los errores se producen de una manera completamente aleatoria, que los errores pequeños tienen más probabilidades de ocurrir que los grandes errores, y que los errores tienen las mismas probabilidades de ser tanto positivos como negativos, la distribución de los errores puede ser representada por la curva normal.

$$F(X) = \frac{Y_0 e^{-(X-U)}}{2\sigma^2}$$

Esta curva es la distribución normal de probabilidad. El área bajo la curva entre X y δx representa el número de datos que cae dentro de estos límites, y el área total bajo la curva indica el número total de mediciones realizadas. Si se define la distribución normal de manera que el área entre X y $X+\delta x$ es la probabilidad de que un dato caiga entre esos límites, el área total bajo la curva será la unidad.

$$F(X) = \frac{\exp - (X - U)^2 / 2\sigma^2}{\sigma\sqrt{2\pi}}$$
$$P_x = \int \frac{\exp - (X - U)^2 / 2\sigma^2}{\sigma\sqrt{2\pi}} dx$$

Ahora si U se define como la media de todas las mediciones y s como la desviación estándar,

$$\sigma = \left[\frac{\sum (X - U)^2}{N} \right]^{1/2}$$

donde N es el número total de mediciones. En realidad esta definición se utiliza como la mejor estimación para una desviación estándar, que es, para un número muy grande de datos.

Para subconjuntos más pequeños de las mediciones la mejor estimación del σ está dada por

$$\sigma = \left[\frac{\sum (X - U)^2}{n - 1} \right]^{1/2}$$

donde n es el número de mediciones en el subconjunto. Obviamente, la diferencia entre los dos valores de n se convierte en insignificante cuando n se hace muy grande (o cuando $n \rightarrow N$).

El área bajo la curva entre $-\sigma$ y $+\sigma$ es 0.68. Por lo tanto 68% de las mediciones se puede esperar que tenga errores que caen en la gama de $\pm \sigma$. Para el rango de $\pm 2\sigma$ la zona es 0.95. Por lo tanto, el 95% de las mediciones caen en este rango. Las probabilidades son aproximadamente 384/1 para el rango de $\pm 3\sigma$. Algunas otras definiciones relacionadas con la curva de distribución normal son los siguientes:

1. Error probable. El error probable que se produce en la mitad de las mediciones.
2. La media de error. La media aritmética de todos los errores independientemente de su signo. Responde a la expresión 0.8σ .
3. Límite de error. El error que es tan grande que es muy poco probable que se produzca. Generalmente se considera 4σ .

Cálculo del error en X usando la distribución Normal: Las definiciones anteriores se aplican estrictamente sólo si el número de mediciones es muy grande.

Supongamos que se han hecho n mediciones. ¿Cómo de buena es esta muestra? Para determinar esto, se procede de la siguiente manera:

$$U = F(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) = \frac{\sum X_i}{n}$$

$$e_a = \sum \frac{\partial F}{\partial X_i} e_{xi}$$

donde $i \neq j$. Si los errores e_i son independientes, los productos cruzados tenderán a cero:

$$(e_a)^2 = \sum \left(\frac{\partial F}{\partial X_i} e_{xi} \right)^2$$

Donde

$$\frac{\partial F}{\partial X_i} = \frac{1}{n}$$

$$e_a = \left[\sum \left(\frac{1}{n} \right)^2 e_{xi}^2 \right]^{1/2} = \left[\left(\frac{1}{n} \right)^2 \sum (e_{xi})^2 \right]^{1/2}$$

$$\sum (e_{xi})^2 = n\sigma^2$$

Y

$$e_a = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Esta ecuación debe ser corregida porque los errores reales en X no son conocidos. Si el número n se aproximase a infinito, la ecuación sería correcta. Dado que n es un número finito, la ecuación corregida se escribe como

$$e_a = \frac{\sigma}{\sqrt{n-1}}$$

$$q = U \pm \frac{\sigma}{(n-1)^{1/2}}$$

Esto nos dice que si una lectura es probable que difiera del valor verdadero en una cantidad σ , entonces el promedio de 10 lecturas tendrá un error de sólo $\sigma / 3$ y la media de 100 lecturas será errónea por $\sigma / 10$. Para reducir el error por un factor de 2, el número de lecturas debe aumentarse en un factor de 4.

Estimaciones externas: Se puede suponer que en cada medición habrá algún error, y si los dispositivos de medición se calibran adecuadamente, los errores son tan propensos a ser tanto positivos como negativos. La peor situación en cuanto a la valoración de la medida del experimento sería que todos los errores tuvieran el mismo signo. En ese caso, suponiendo que los errores fueran todos mucho menores que 1, el error resultante sería la suma de los errores individuales, es decir,

$$\epsilon_E = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 + \dots$$

Sería muy raro que todos los errores que tuvieran el mismo signo. Del mismo modo que sería muy inusual para los errores que se distribuyeran de una manera tal que

$$\epsilon_E = 0$$

A continuación se expone un método general para la combinación de errores y determinar, en definitiva, qué error cabe esperar como resultado de la combinación.

Supongamos que $V = F(a, b, c, d, e, \dots, x, y, z)$ donde a, b, c, \dots, x, y, z representan parámetros que han sido calculados individualmente. Entonces se tiene que:

$$\delta V = \sum \left(\frac{\delta F}{\delta n} \right) \delta n$$

$$\epsilon_E = \sum \left(\frac{\delta F}{\delta n} \right) e_n$$

La suma de los cuadrados de los errores viene dada por:

$$e_E^2 = \left[\sum \left(\frac{\delta F}{\delta n} \right) e_n \right]^2$$

Asumiendo que los errores son independientes y simétricos se puede considerar que los productos cruzados son nulos. Y así se tiene:

$$\sum \left(\frac{\delta F}{\delta n} \right) \left(\frac{\delta F}{\delta m} \right) e^n e^m = 0 \quad n \neq m$$

$$(\epsilon_E)^2 = \sum \left(\frac{\partial F}{\partial n} \right)^2 e_n^2$$

$$e_E = \left[\sum \left(\frac{\partial F}{\partial n} \right)^2 e_n^2 \right]^{1/2}$$

Donde el valor de ϵ_e es siempre mucho menor que ϵ_e

$$\epsilon_e = [|\epsilon_a| + |\epsilon_b| + |\epsilon_c| + \dots + |\epsilon_z|]$$

ANEXO III
PUENTES INSTRUMENTADOS PARA SU
CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO



Figura 146. Gateway Bridge (Australia). Vano principal de 260 m.



Figura 147. Viaducto de Vilvoorde (Bélgica). Vano principal de 160 m.



Figura 148. Viaducto de Peace (Canada, 1927). Combinación de arcos inferiores y un vano tipo arco superior de sección metálica. Longitud total de 1768 m.



Figura 149. Puente de Champlain (Canada, 1962). Vanos principales metálicos tipo cantilever. Longitud total de 7412 m.



Figura 150. Great Belt East Bridge (Dinamarca). Vano colgante principal de 1624 m y sección de tablero tipo cajón metálico.



Figura 151. Millau Viaduct (Francia). Puente de vanos atirantados de 342 m de longitud máxima y sección de tablero tipo cajón metálico.



Figura 152. Harilaos-Trikoupias (Grecia). El puente principal tiene cinco vanos atirantados de 560 m de longitud máxima.



Figura 153. Akashi-Kaikyo (Japón). Puente metálico colgante de 3911 m con vano central de 1991 m y vanos laterales de 960 m.



Figura 154. Alvsborg Bron Bridge (Suecia). Puente colgante con vano principal de 417 m y tablero de sección celosía metálica. Construido en 1966.



Figura 155. Varina-Enon Bridge (EE.UU). Puente atirantado con tablero tipo cajón y 192 m de longitud de vano central.

ANEXO IV

OTROS TIPOS DE ESTRUCTURAS INSTRUMENTADAS

Este trabajo se centra en la Instrumentación de puentes y viaductos, si bien, esta técnica es aplicable a otros campos.

4.1. Elementos auxiliares durante la construcción

Las estructuras requieren de elementos auxiliares que los soporten durante su construcción. En este sentido, los medios auxiliares son también estructuras, generalmente metálicas, cuyo cálculo se basa en modelos teóricos y empíricos recogidos en la normativa vigente.

Por ejemplo, con el fin de conocer el comportamiento real de la estructura, las cimbras autolanzables se han comenzado a instrumentar con extensómetros y células de carga que realizan lecturas en tiempo real de las acciones a las que está sometida la cimbra y de su respuesta estructural. Además se miden también las condiciones ambientales como son la temperatura, y la velocidad y la dirección del viento. El sistema informático es muy similar al de las estructuras convencionales, si bien la conexión se realiza vía wifi, ya que el cableado dificulta las maniobras de movimiento de la cimbra [OL].

Del mismo modo, en el proceso de construcción por avance en voladizo también es habitual instrumentar los carros de avance para controlar las fuerzas en los anclajes de los marcos de los carros durante el proceso habitual de izado y ripado de dovela. Tal es el caso, por ejemplo, del Puente sobre la Bahía de Cádiz construido entre los años 2008 y 2015, y que se explicará más detenidamente en el punto correspondiente.

4.2. Tensión de adherencia en el terreno

La tensión de adherencia es el parámetro fundamental interviniente en el diseño de los anclajes al terreno, de los pilotes y de los micropilotes. El conocimiento de dicho parámetro tiene un cierto grado de incertidumbre debido a las formas en las que éste se obtenía hasta ahora:

- Ensayos de penetración.
- Tablas de tensiones de adherencia basadas en ensayos ya realizados.

Sin embargo, gracias a la Instrumentación de estos elementos se puede llegar a conocer las tensiones de adherencia [RGM].

En los bulbos debe estudiarse la posición de los sensores teniendo en cuenta que el número de sensores no puede ser muy elevado debido al espacio limitado. Los sensores miden la deformación; para obtener la fuerza hay que multiplicar por la sección resistente del bulbo en la posición del sensor, que es un dato conocido previamente. De esta forma, para una determinada fuerza de tesado, se puede obtener la fuerza en el bulbo en cada sección instrumentada y, por tanto, las fuerzas que se van transmitiendo al terreno a las distintas profundidades. Con dichas fuerzas y la superficie en contacto con el terreno se obtiene la tensión de adherencia.

Además, la Instrumentación de anclajes controla su correcta ejecución, ya que es capaz de detectar problemas en la inyección.

La Instrumentación de pilotes y micropilotes permite obtener:

- Longitud del elemento que entra en carga.
- Evolución de las tensiones en el elemento en función de la carga aplicada.
- Tensiones límites y remanentes en las capas del terreno que se agoten.

Este tipo de estudio se llevó a cabo, por ejemplo, durante la construcción del Viaducto de Pujayo perteneciente a la Autovía de la Meseta A-67 (Tramo Molledo-Pesquera, Cantabria).

4.3. Vías de ferrocarril

4.3.1. Vía en placa

La vía en placa o vía sobre placa de hormigón tiene como objetivo obtener una alta calidad de vía disminuyendo los costes de mantenimiento. Su colocación se realiza sin balasto y consta de una placa de hormigón que transmite a la plataforma tensiones uniformemente distribuidas y de menor valor que con balasto. Está constituida a partir de losas de hormigón dispuestas una a continuación de otra. El movimiento relativo de las mismas puede convertir la vía en insegura.

En este sentido, en el año 2008 el consorcio formado por BAM, Fluor y Siemens, responsable del mantenimiento de las líneas de Alta Velocidad de ferrocarril de Holanda, lanzó un proyecto a gran escala que consistía en la Instrumentación de toda la vía, dentro

del programa SMARTEC [SM]. Dicho proyecto fue muy complejo debido a las exigencias de funcionalidad de una línea de Alta Velocidad y al espacio reducido. A lo largo de los 80 km de línea de Alta Velocidad se dispusieron 130 sensores con el fin de medir movimientos horizontales y verticales, así como la temperatura.

4.3.2. Vía convencional

En la Comunidad de Cantabria existe en la actualidad una red ferroviaria de vía estrecha gestionada por el ente público Ferrocarriles Españoles de Vía Estrecha (FEVE).

En general, línea de vía estrecha se caracteriza por servir un tráfico mixto, es decir, integrado por trenes de viajeros y mercancías simultáneamente. Dichos tráfico se diferencian en sus acciones sobre la vía, al transmitirle diferentes cargas por eje, y circular a distintas velocidades.

En el año 2010, y dentro del programa DINTRA (Dinámica Transversal para vías de ancho métrico), un grupo de investigación formado por la Universidad Politécnica de Valencia, la Universidad de Cantabria y un consorcio de empresas entre las cuales se encontraba APIA XXI, S.A., fueron puestos en conocimiento por medio de FEVE de una serie de problemas que afectaban a distintas secciones de vías de ancho métrico a su paso por la Comunidad de Cantabria.

La problemática presentada en líneas generales se puede resumir en los siguientes puntos:

- Solucionar problemas de pérdida de alineación de vía.
- Disminuir la vulnerabilidad de la vía ante cambios térmicos, pandeo de vía.
- Aumentar la velocidad de circulación en curva.
- Incrementar la carga máxima por eje.

Para estudiar todos estos puntos se diseñaron unos útiles equipados de transductores de desplazamiento de hilo para medir los movimientos transversales en ciertos puntos críticos del trazado.



Figura 156. Instrumentos de medición de desplazamientos colocados en vía de estrecho métrico en La Cavada (Cantabria).

4.4. Edificación

Los edificios singulares pueden presentar movimientos y deformaciones a lo largo de su vida útil que no son despreciables y que generalmente son controlados mediante sistemas de Instrumentación. La Catedral de Sevilla, por ejemplo, lleva siendo objeto de control de los giros en cabeza y base de algunas columnas ante la evidente pérdida de verticalidad.

4.5. Centrales nucleares

En las centrales nucleares, se controlan magnitudes como la radiación, la humedad, las vibraciones... mediante un Sistema de Instrumentación similar al de las estructuras [HH] [HHM] pero muchas veces integrado dentro de un Sistema de Gestión de Nivel superior basado en SCADA que permite controlar y supervisar procesos industriales a distancia. Facilita retroalimentación en tiempo real con los dispositivos de campo (sensores y actuadores), y controla el proceso automáticamente. Provee de toda la información que se genera en el proceso productivo (supervisión, control calidad, control de producción, almacenamiento de datos, etc.) y permite su gestión e intervención.

4.6. Eólica offshore

El consorcio empresarial IDERMAR, al cual pertenece APIA XXI, desarrolló algunos prototipos de boyas meteorológicas para eólica off-shore que flotan desde 2009 cerca de

las costas cántabras. Se dispuso una compleja Instrumentación orientada en tres direcciones:

- Comportamiento estructural durante la erección de la boya.
- Comportamiento estructural en servicio.
- Datos meteorológicos.
- Posicionamiento.

Para el análisis del comportamiento estructural se instrumentaron distintas secciones de la estructura con bandas extensiométricas y rosetas. También se usaron células de carga para el control de las fuerzas de las cadenas en las uniones boya-muerto una vez puesta en servicio.

Para el análisis meteorológico fue necesario un importante equipo de anemómetros (cazoletas y ultrasónicos) colocados a distintas alturas. Dada la sensibilidad en la medición se dispusieron adicionalmente varios sistemas de posicionamiento espacial además de acelerómetros para corregir las lecturas de velocidad y dirección que emitían los sensores.

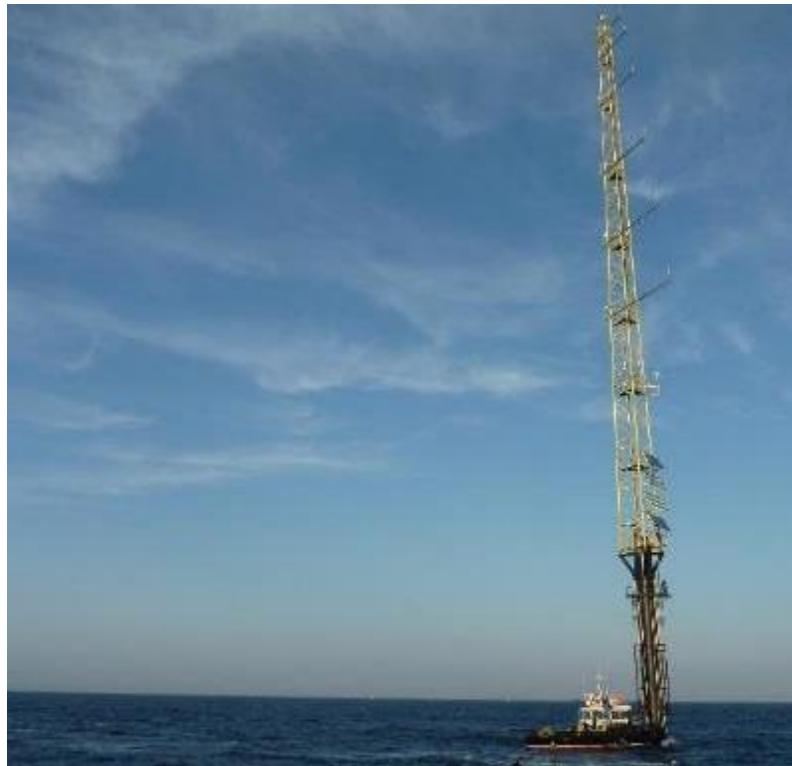


Figura 157. Boya III. Final del proceso de izado. APIA XXI, S.A.



Figura 158. Boya III. Boya en posición abatida en dique. Anemómetros en distintas secciones. *APIA XXI, S.A.*

De forma paralela y con el fin de completar los trabajos desarrollados se construyeron unos mástiles en tierra los cuales se equiparon con los mismos sistemas de navegación que los colocados en las boyas y cuyo objetivo principal fue el estudio de la influencia de las vibraciones y el movimiento en las lecturas de los anemómetros así como el desarrollo de un algoritmo de corrección de las lecturas de los anemómetros en función de su inclinación.



Figura 159. Mástiles de experimentación para el estudio de la influencia del movimiento en las lecturas de los anemómetros de cazoletas y ultrasónicos. APJA XXI, S.A.

4.7. Ingeniería naval

SMARTEC ha instrumentado una gran variedad de estructuras de diversa naturaleza.

En el año 2008 monitorizó el barco Four Island con el fin de conocer su comportamiento estructural. En el proyecto ha colaborado con Pegaso Systems Srl [SMA].

4.8. Ingeniería aeronáutica

En el campo de las estructuras aeroespaciales, se publicó un estudio de la NASA para el Reusable Launch Vehicle X-3372 en el año 2007 en el que se utilizaban sensores de fibra óptica.

4.9. Otras escalas

Los estudios en modelo reducido hacen uso generalmente de una sensórica adaptada a las necesidades del modelo.

En este sentido cabe comentar que durante el desarrollo de los distintos prototipos de boyas meteorológicas para el control del recurso eólico off-shore en los que ha participado APIA XXI fue necesario el estudio a escala reducida de distintos elementos.

Por un lado, se trabajó con maquetas a escala de los distintos prototipos y se simularon distintas condiciones de oleaje y viento con el fin de estimar las fuerzas en las cadenas y ángulos de inclinación en cada caso. Este tipo de trabajos se desarrollaron en el tanque de oleaje construido por APIA XXI en sus instalaciones para tal efecto entre los años 2008 y 2010.

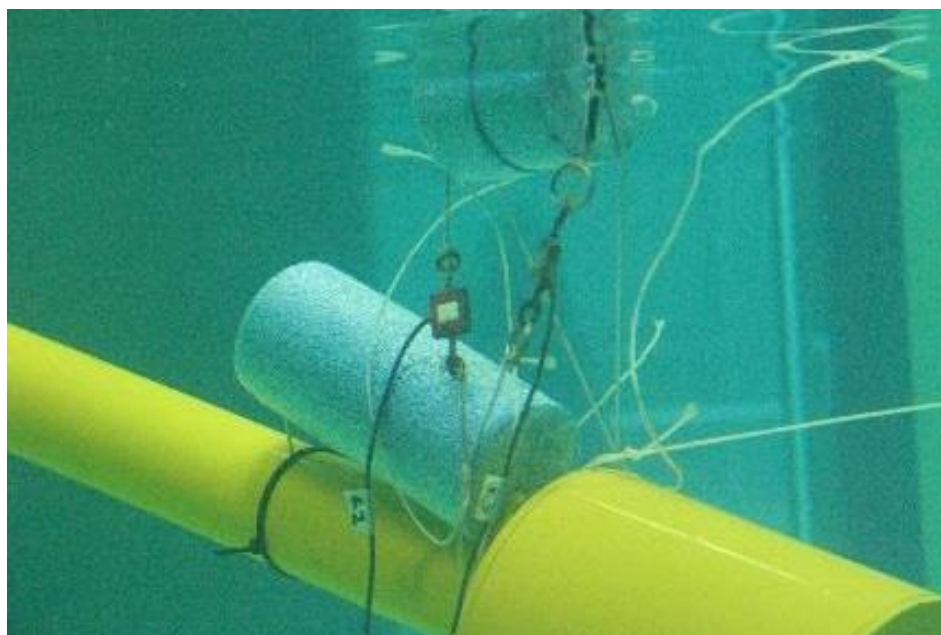


Figura 160. Desarrollo de ensayos en tanque de olas. Control de tensiones con células de carga para el estudio de fuerzas en tirantes durante el proceso de transporte.

APIA XXI, S.A.

En este sentido cabe comentar que durante el desarrollo de los distintos prototipos de boyas meteorológicas para el control del recurso eólico off-shore en los que ha participado APIA XXI fue necesario el estudio a escala reducida de distintos elementos.

Con el fin de conocer, ajustar y extrapolar las calibraciones teóricas de los anemómetros ofrecidas por los fabricantes se realizaron diversos ensayos en túnel de viento bajo condiciones de flujo ideales. En estos ensayos se estudió la influencia del movimiento del brazo de sustentación del anemómetro en las lecturas. Se distinguieron dos situaciones: estática (brazo con distintas inclinaciones) y dinámica (distintas velocidades de oscilación del brazo).

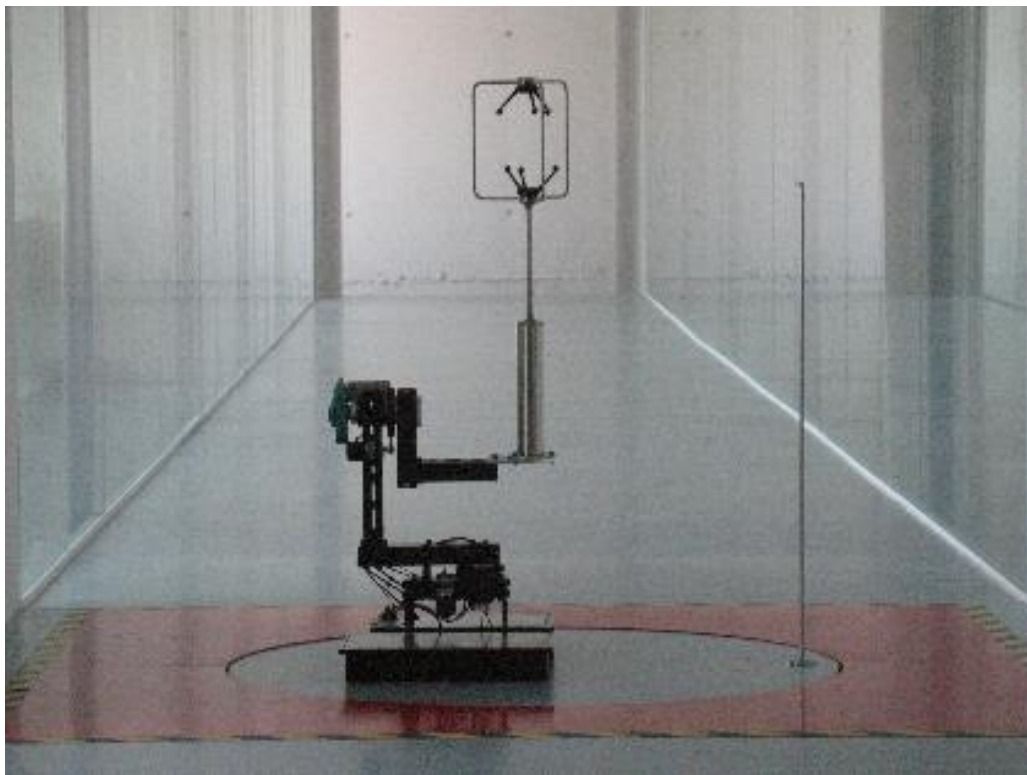


Figura 161. Desarrollo de ensayos en túnel de viento ACLA-16 del IDR (Instituto Universitario de Microgravedad Ignacio da Riva, Madrid). APIA XXI, S.A.

ANEXO V

COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL PUENTE EL BELTRÁN

5.1. Introducción

La metodología habitual para validar el comportamiento dinámico de los tableros de puentes consiste en un análisis modal, obteniendo los principales modos de vibración y amortiguamiento, pudiendo comparar dichos valores de cálculos con los obtenidos en la realidad mediante la Prueba de Carga o el paso de una circulación real conocida.

El conocimiento de dichos valores permite conocer y comprender el comportamiento de la estructura frente a cargas dinámicas. A su vez, la obtención de las frecuencias propias de los modos principales permite aplicar los criterios de diseño de las normativas en vigor, realizando comprobaciones simplificadas con relaciones sencillas.

Este modelo en 3D permite obtener los modos y frecuencias propios de vibración, que en este caso no solo corresponden a la flexión del puente, sino que también se observan otros modos de vibración como el longitudinal y el transversal de las pilas. Los valores de frecuencias obtenidos cuyos modos correspondan a la flexión longitudinal del puente son utilizados posteriormente para realizar los cálculos en el dominio del tiempo.

Los valores obtenidos con este modelo son comparables con los obtenidos mediante la Instrumentación, ya que ambos modelos están basados en un modelo en 3 dimensiones.

Aplicando el modelo que se pretende calibrar, se obtienen los siguientes periodos de vibración con sus correspondientes modos de vibración (idF):

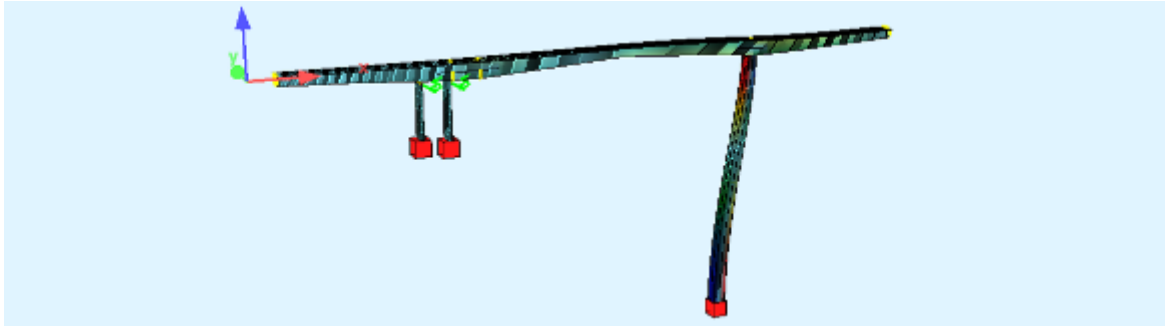


Figura 162. Modo 1: 0.13 Hz

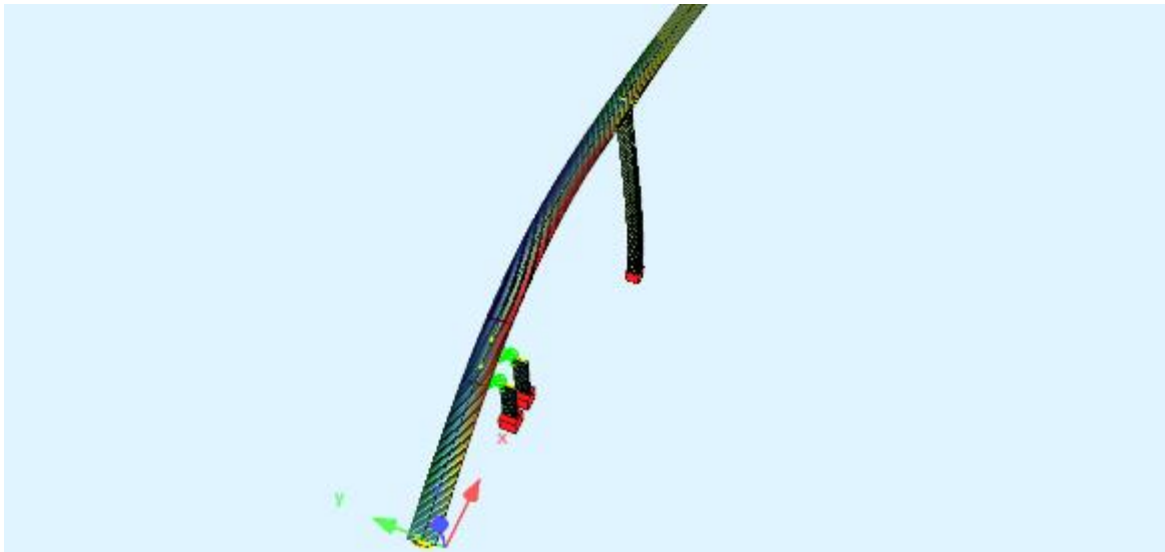


Figura 163. Modo 2: 0.18 Hz



Figura 164. Modo 3: 0.56 Hz

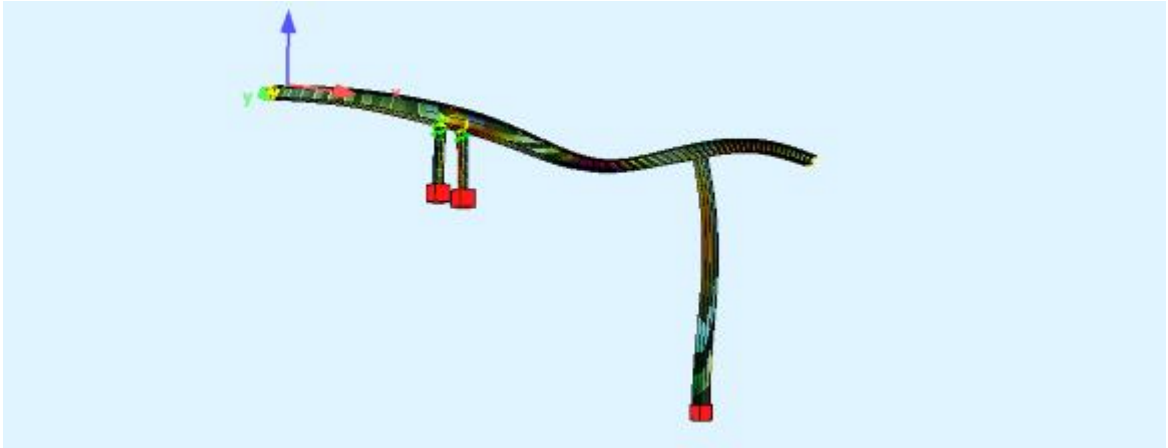


Figura 165. Modo 4: 1.00 Hz

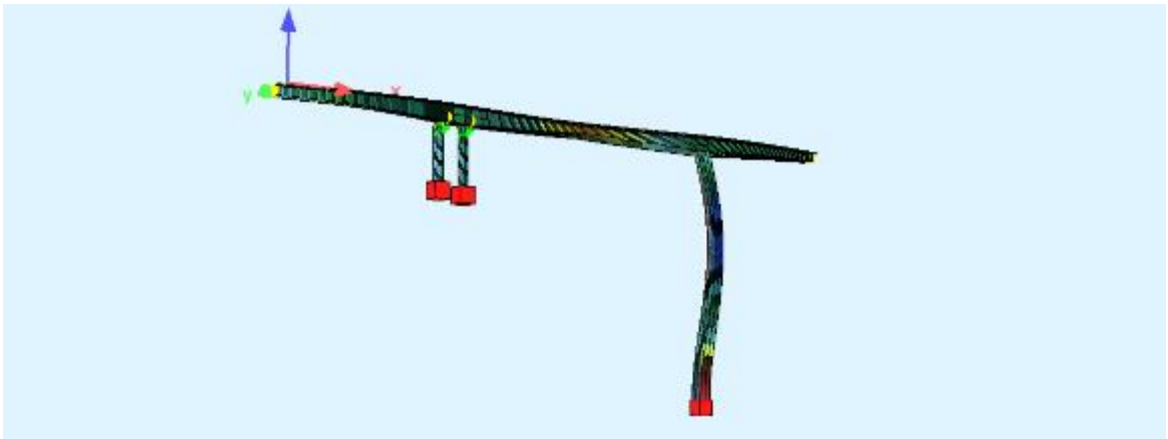


Figura 166. Modo 5: 1.17 Hz



Figura 167. Modo 6: 1.36 Hz

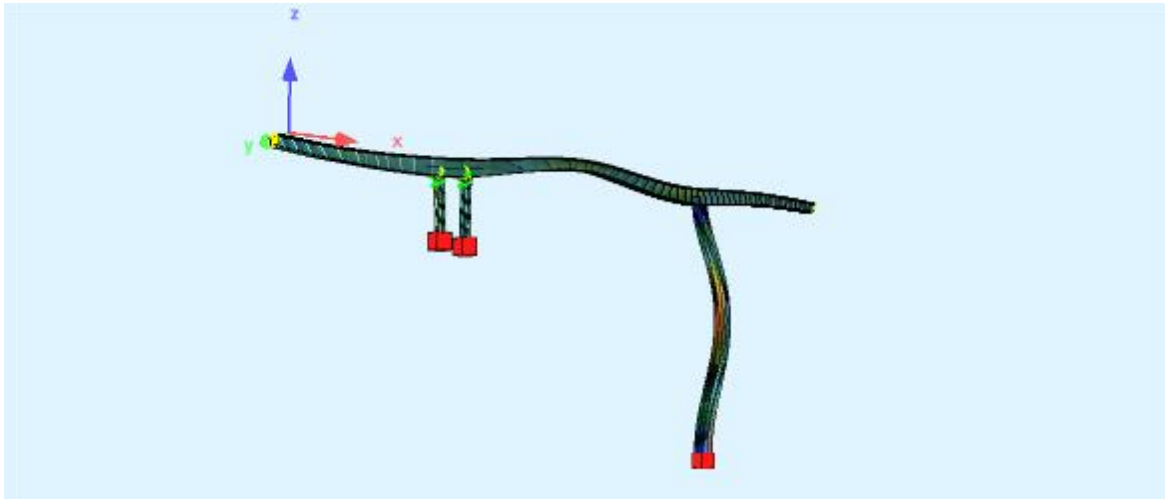


Figura 168. Modo 7: 1.45 Hz

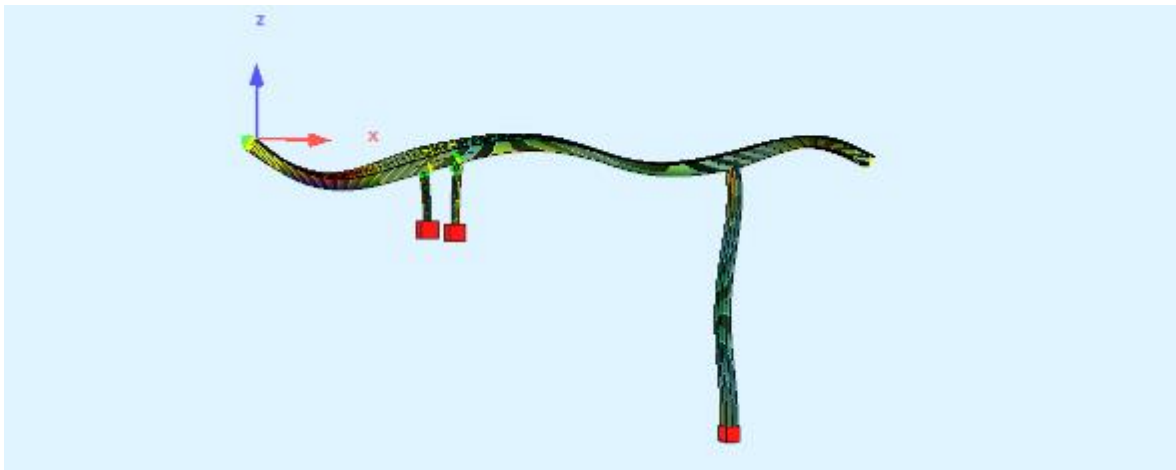


Figura 169. Modo 10: 2.18 Hz

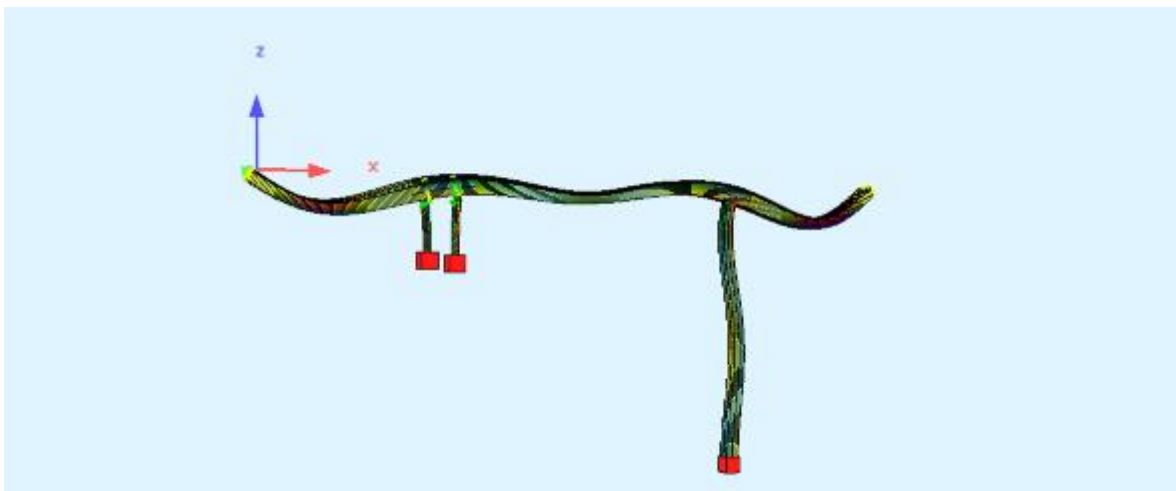


Figura 170. Modo 12: 2.40 Hz

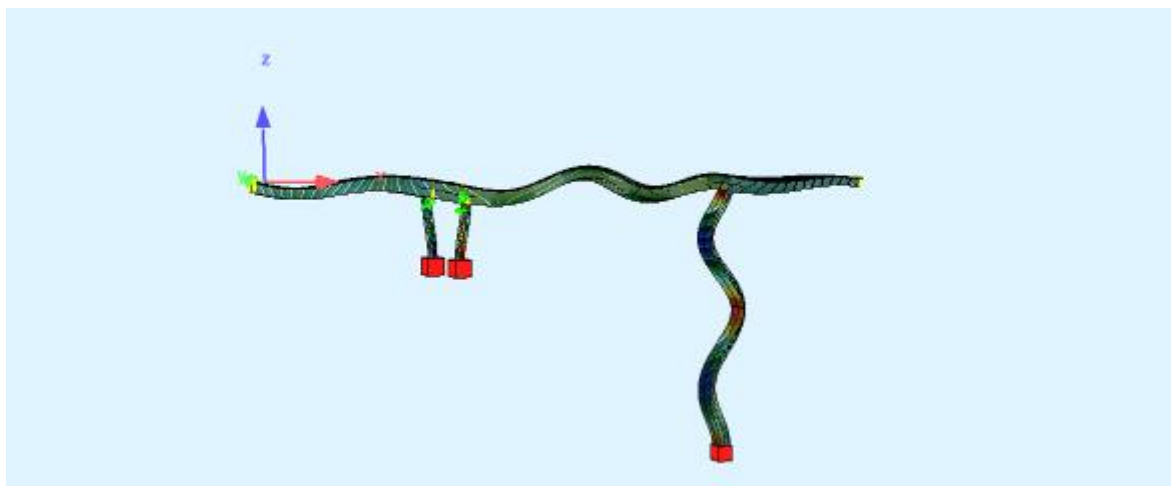


Figura 171. Modo 27: 7.69 Hz

Para el cálculo dinámico, los dos modos de vibración que nos interesa son los de flexión del tablero, que corresponden con los modos 4, 7, 10 y 12. Estos modos tienen frecuencias de 1.00, 1.45, 2.18 y 2.40 Hz respectivamente.

El modo 1 corresponde al movimiento longitudinal del tablero, donde se observa claramente como las pilas intermedias, donde se encuentran los POT, no intervienen en dicho movimiento.

Los modos 2 y 3 son los correspondientes al modo de vibración de flexión transversal del tablero.

El primer modo donde encontramos la flexión longitudinal de la estructura es el modo 4. Posteriormente, se van alternando los modos de flexión transversal y longitudinal de la pila, hasta llegar a los modos 7, 10, 12 y 27.

5.2. Análisis en el dominio del tiempo

A continuación se incluyen los registros de aceleraciones entre los meses de noviembre 2012 y 2013.

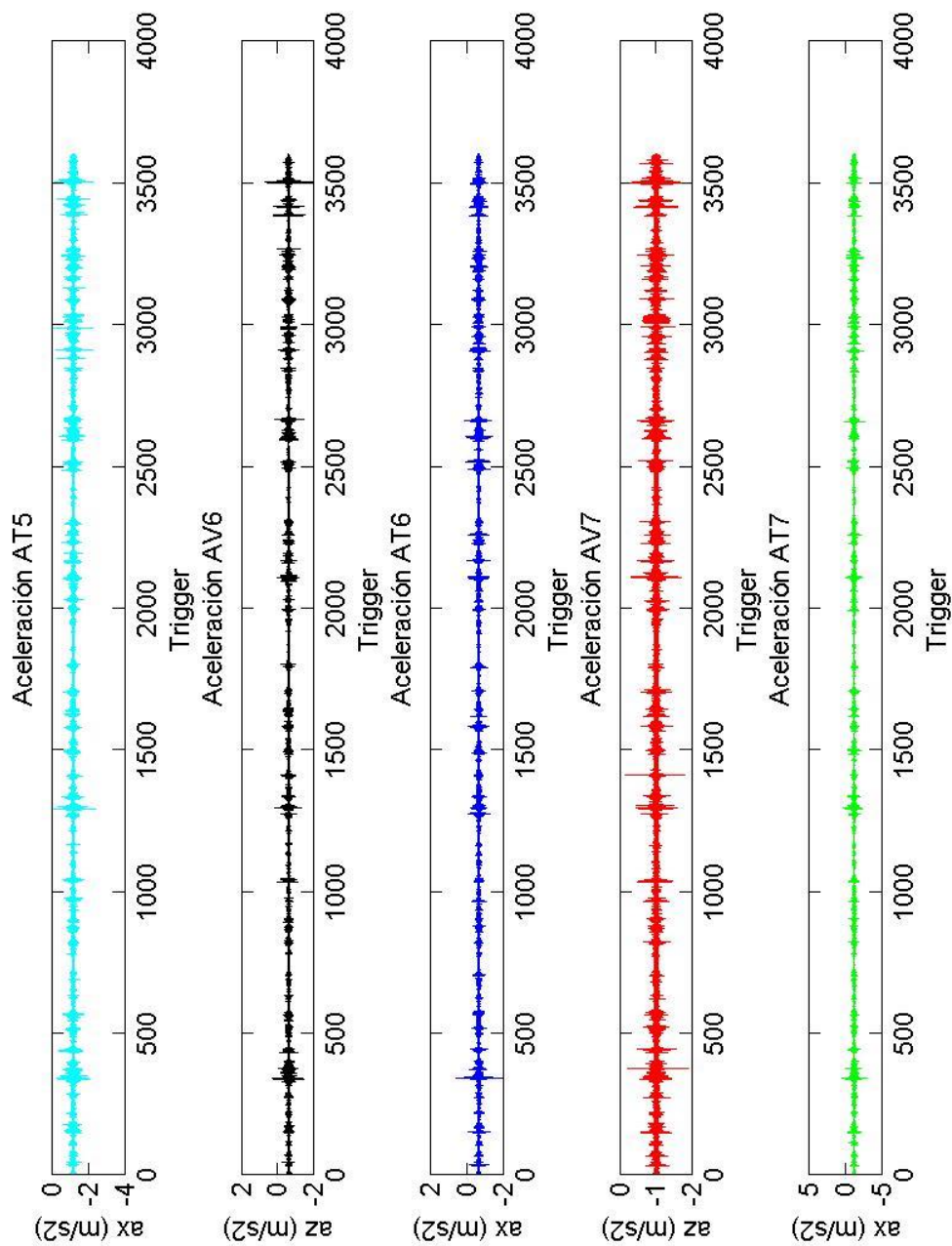


Figura 172. Registro de aceleraciones para un día tipo del mes de noviembre 2012.

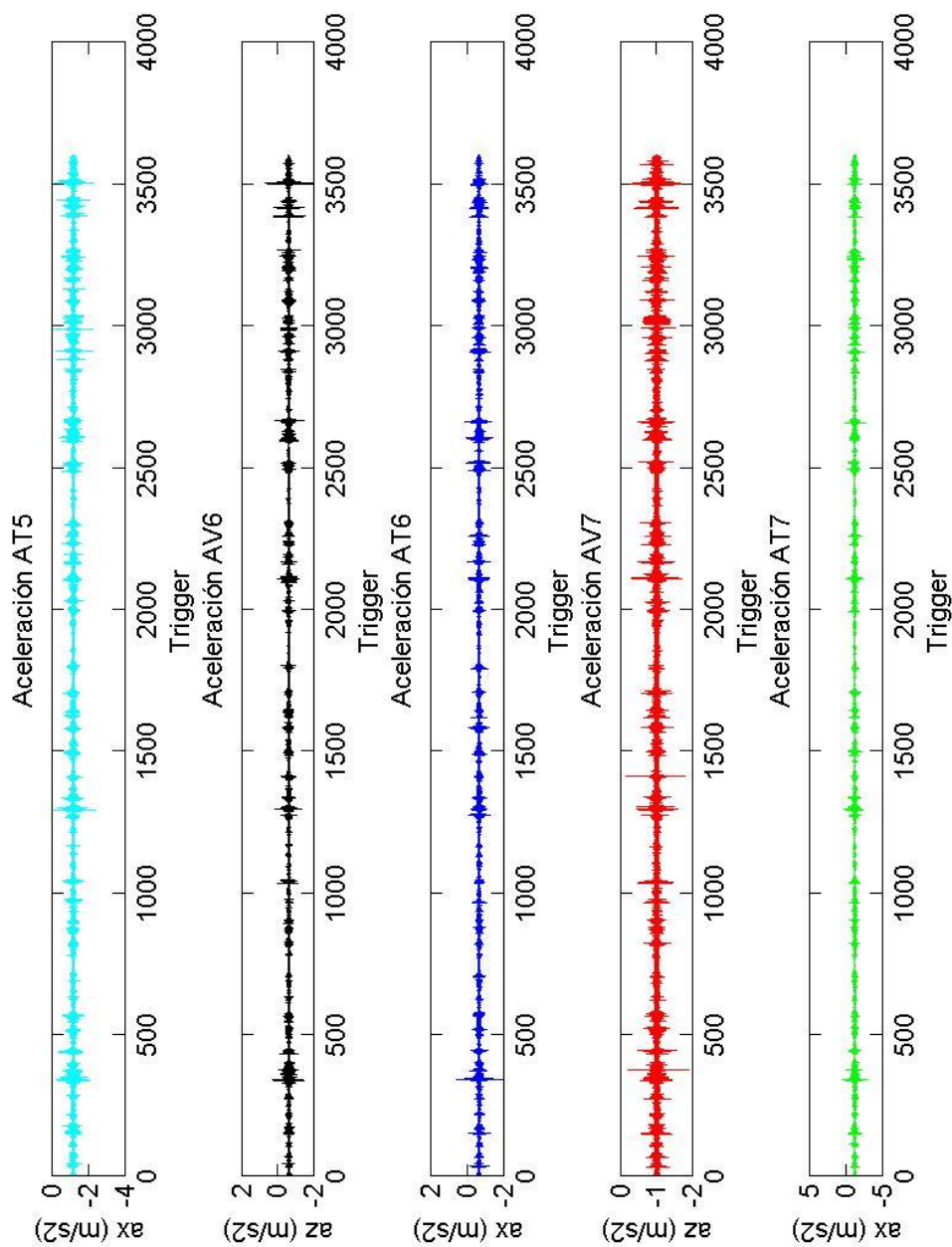


Figura 173. Registro de aceleraciones para un día tipo del mes de enero 2013.

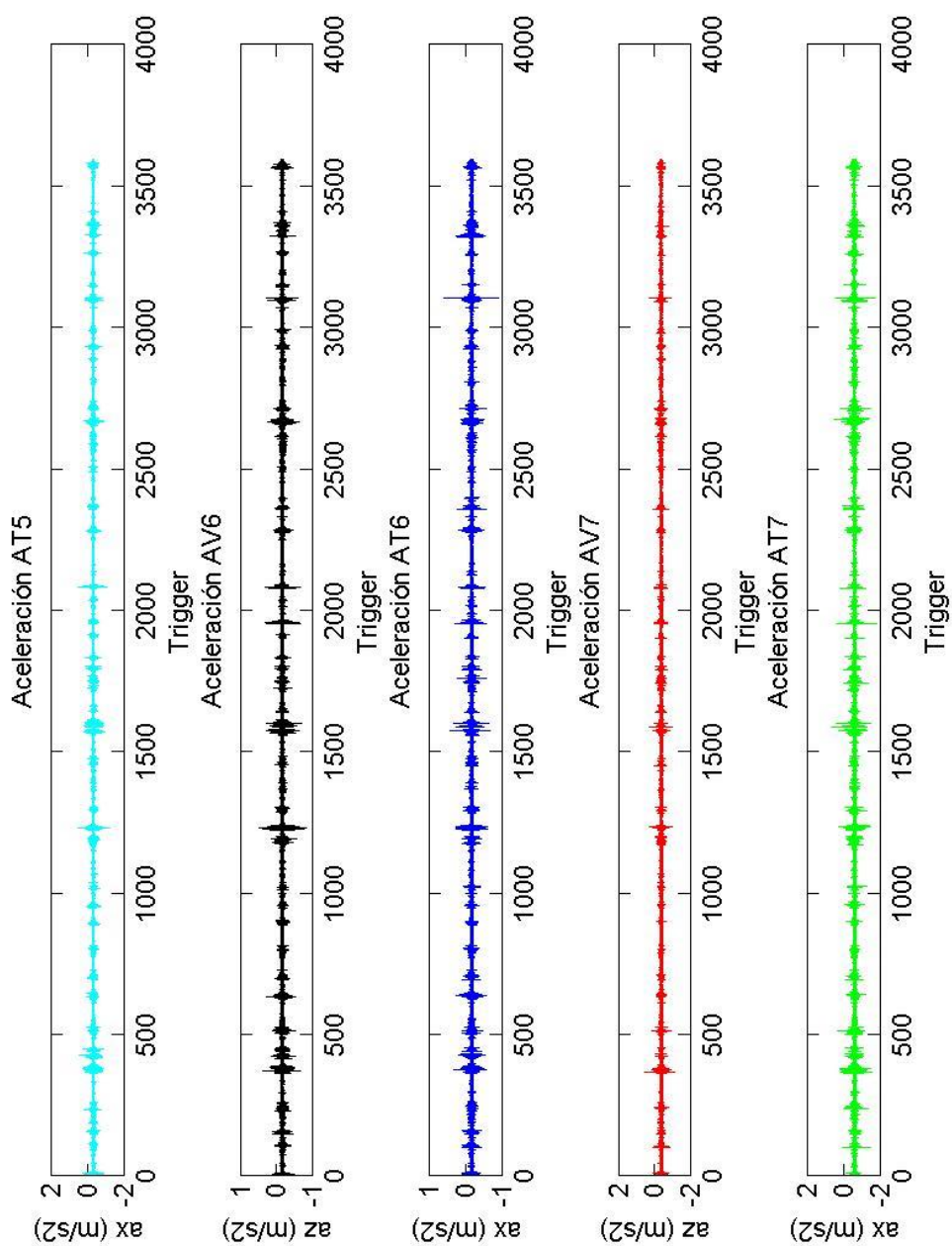


Figura 174. Registro de aceleraciones para un día tipo del mes de febrero 2013.

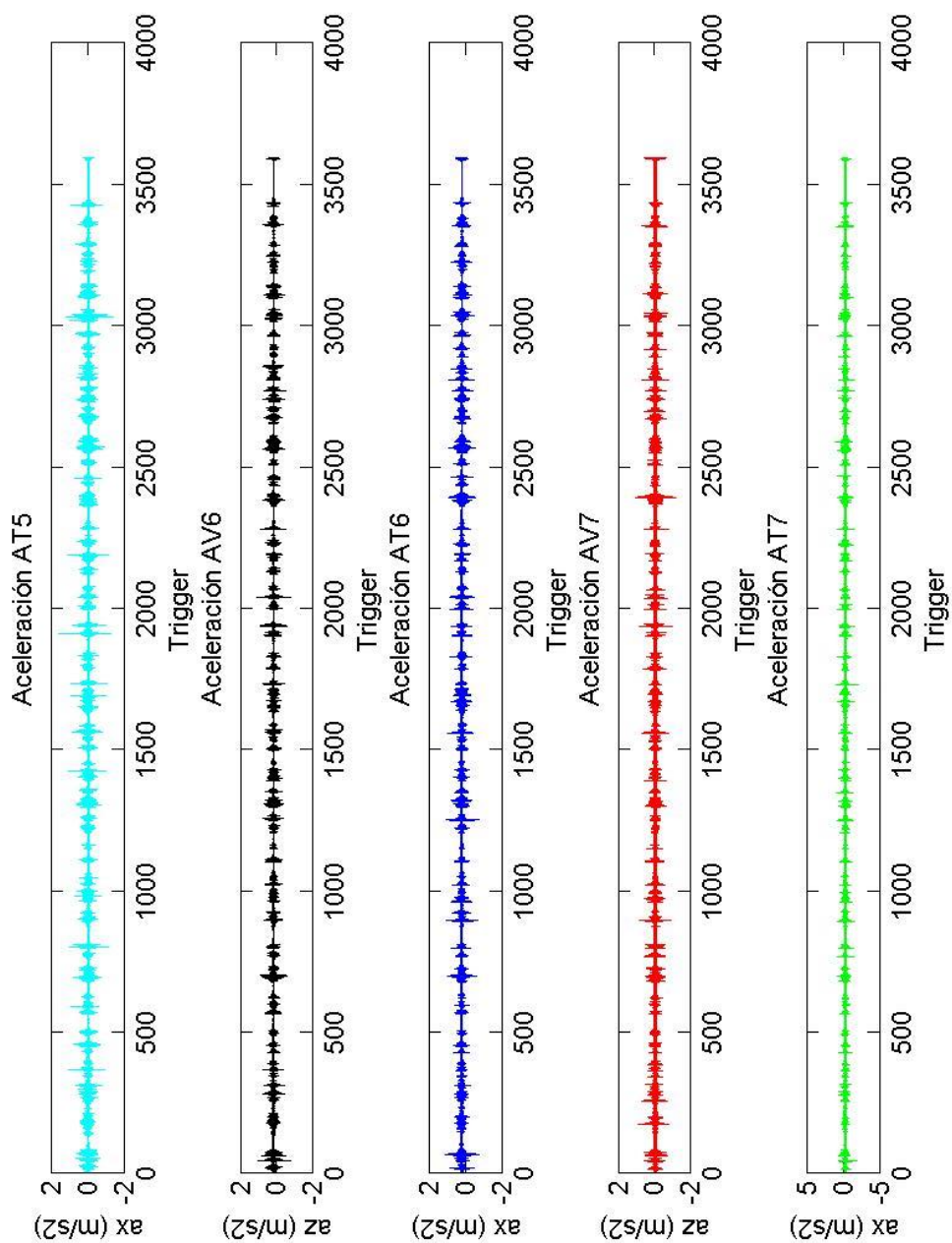


Figura 175. Registro de aceleraciones para un día tipo del mes de marzo 2013.

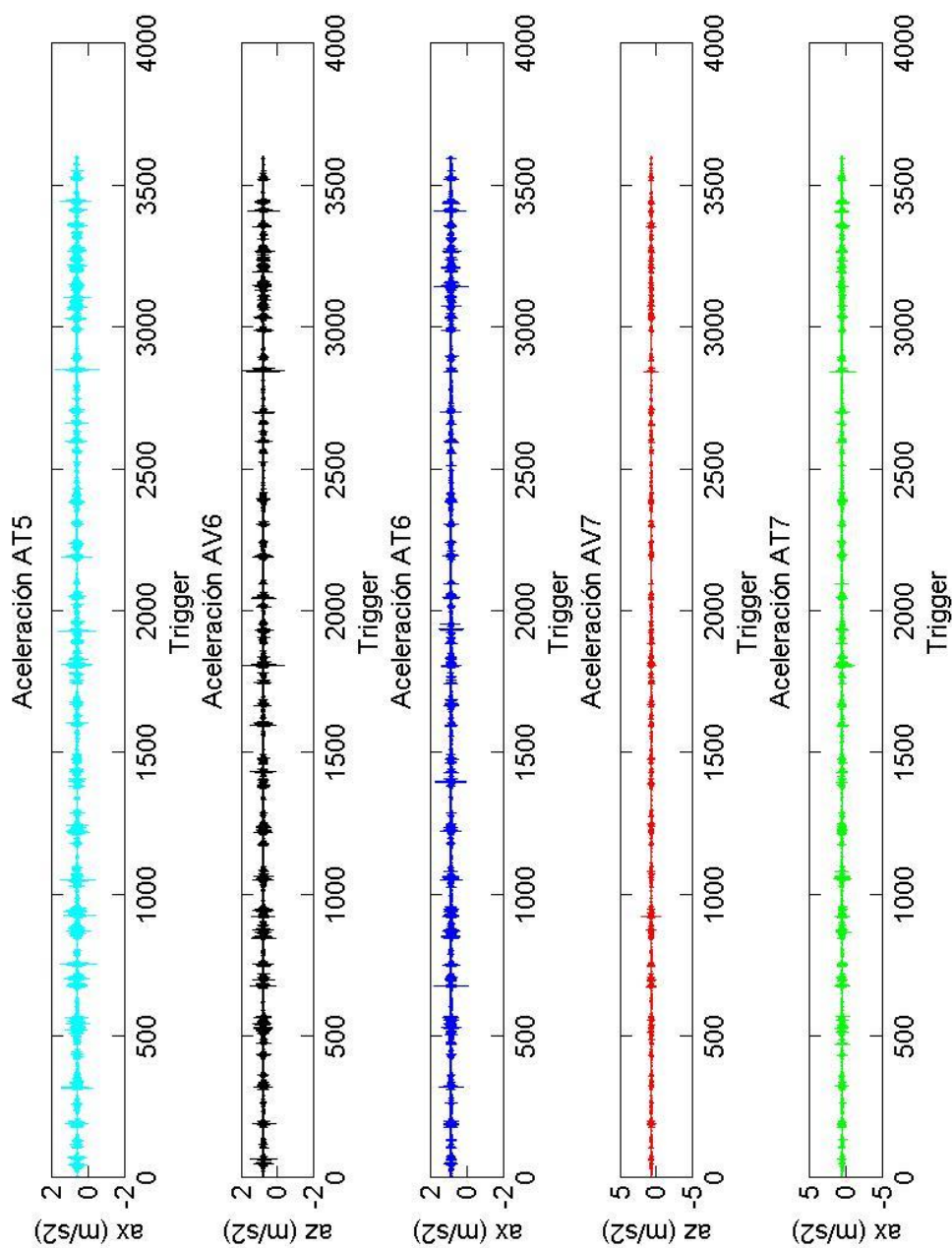


Figura 176. Registro de aceleraciones para un día tipo del mes de abril 2013.

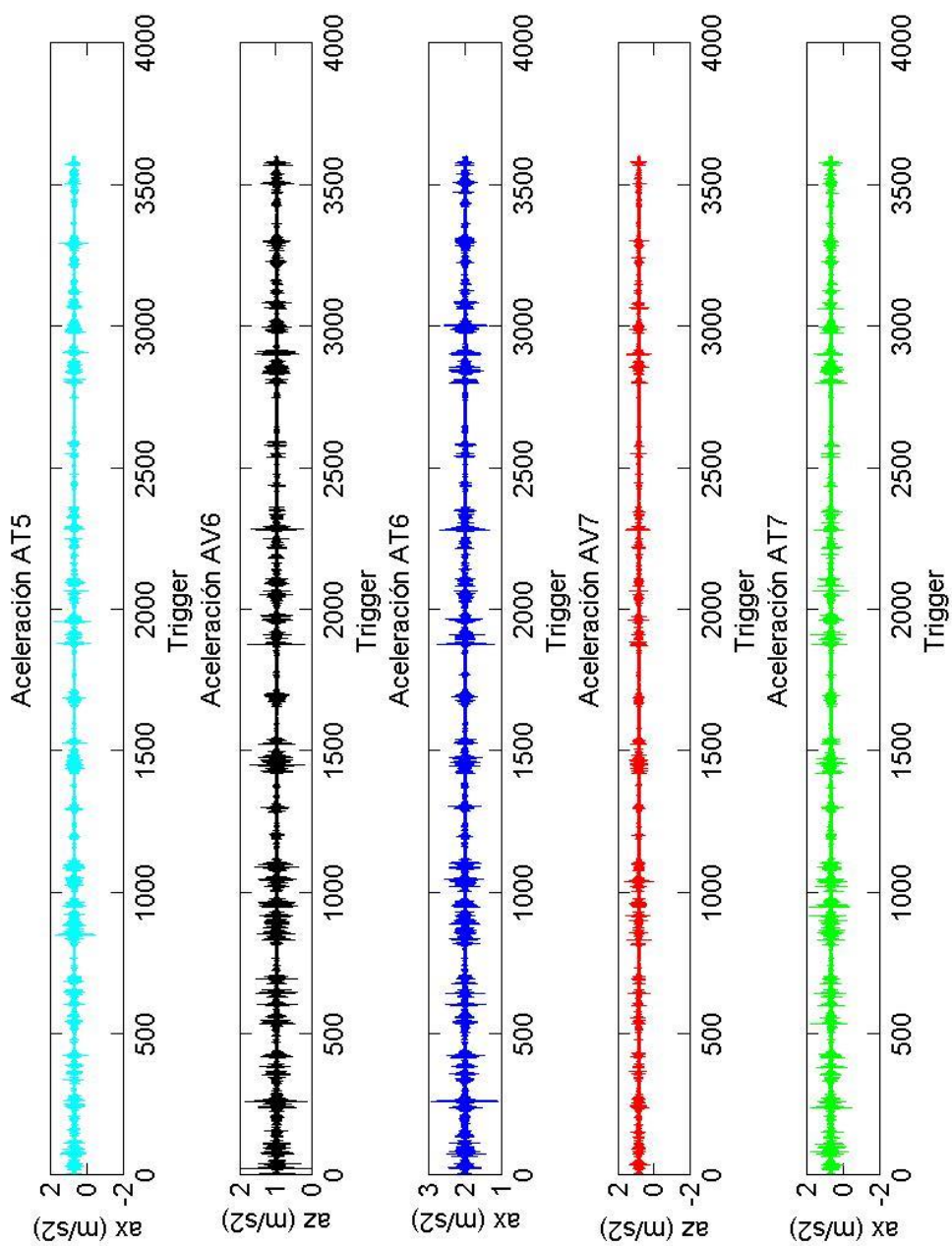


Figura 177. Registro de aceleraciones para un día tipo del mes de mayo 2013.

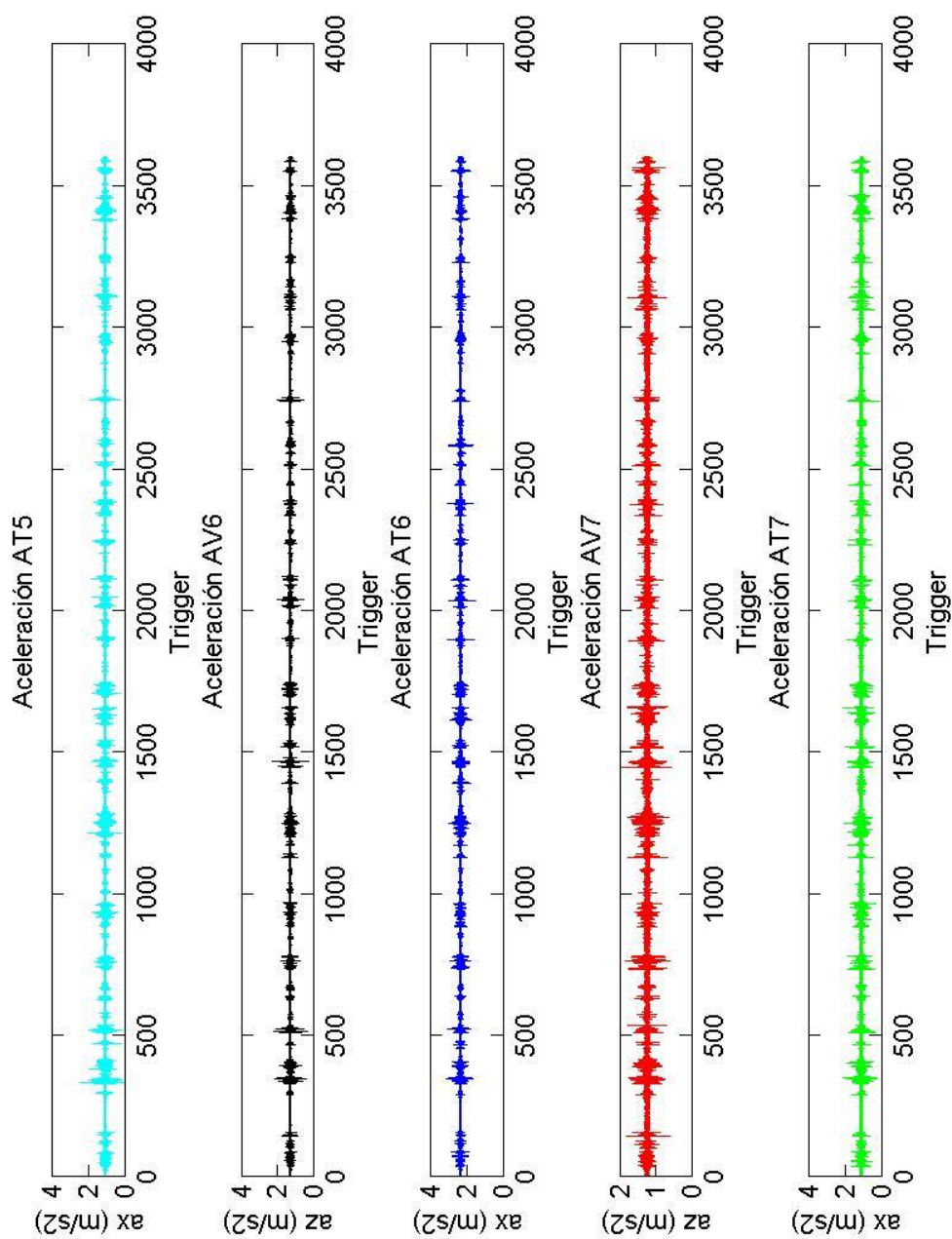


Figura 178. Registro de aceleraciones para un día tipo del mes de junio 2013.

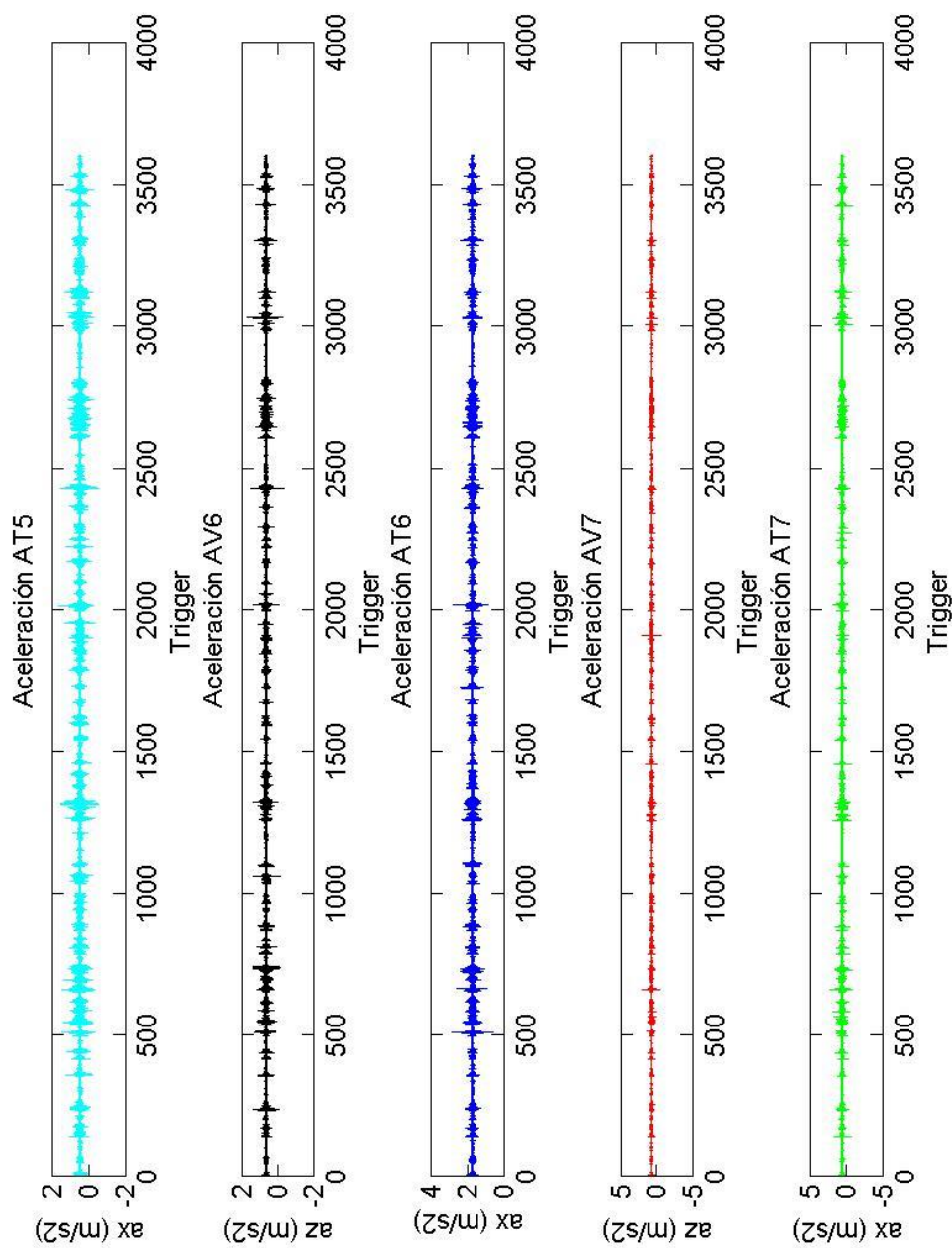


Figura 179. Registro de aceleraciones para un día tipo del mes de agosto 2013.

5.3. Análisis en el dominio de las frecuencias

El análisis en el dominio de las frecuencias sirvió para comprobar la existencia de tres modos de vibración a flexión longitudinal.

La aplicación de un filtro paso bajo para hacer prevalecer las frecuencias inferiores a 5 Hz y la posterior aplicación de la Transformada de Fourier dio como resultado las frecuencias antes mencionadas.

En estos casos la estrategia para discriminar estos patrones fue analizar cortes de duración constante a lo largo del periodo a analizar. Se probó con varias unidades de segmentación y se realizó el análisis en segmentos solapados a más del 50%. Cada segmento se ponderó con una ventana tipo Butterworth que realza el centro del segmento y contrarresta la redundancia del solape. Si las series de espectros consecutivos así calculados presentan de forma significativa picos estables o líneas espectrales con claridad se da por bueno el resultado obtenido. Por el contrario, si estos picos no aparecen o no presentan ningún tipo de estabilidad, no se dará por válida la existencia del patrón.

Lo que interesa destacar aquí es el hecho de que la secuencia de espectros debe mostrar una constancia en la posición (frecuencia) de las líneas espectrales correspondientes al patrón analizado. Esta constancia es la que permite deducir un patrón. Lógicamente dicho patrón presenta una evolución y un cambio interno, pero mantiene unas propiedades formales que vienen reflejadas por la estabilidad de la posición de sus líneas espectrales.

La siguiente gráfica representa la secuencia de espectros para los registros obtenidos durante una prueba.

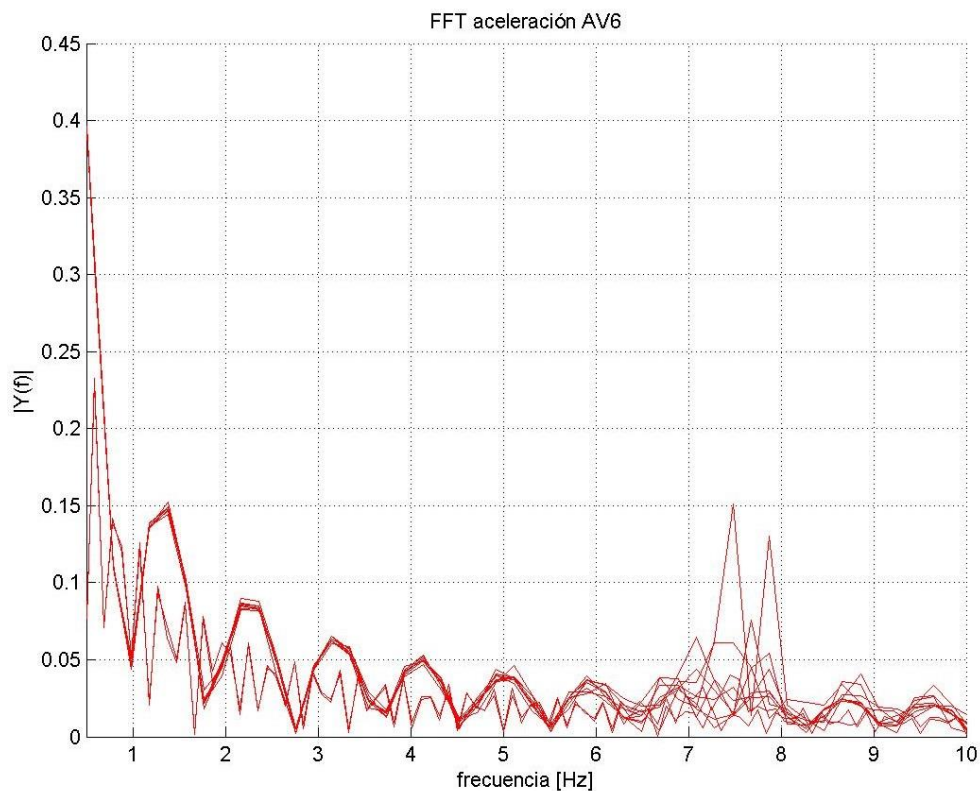


Figura 180. Registro de aceleraciones durante el mes de junio 2013.

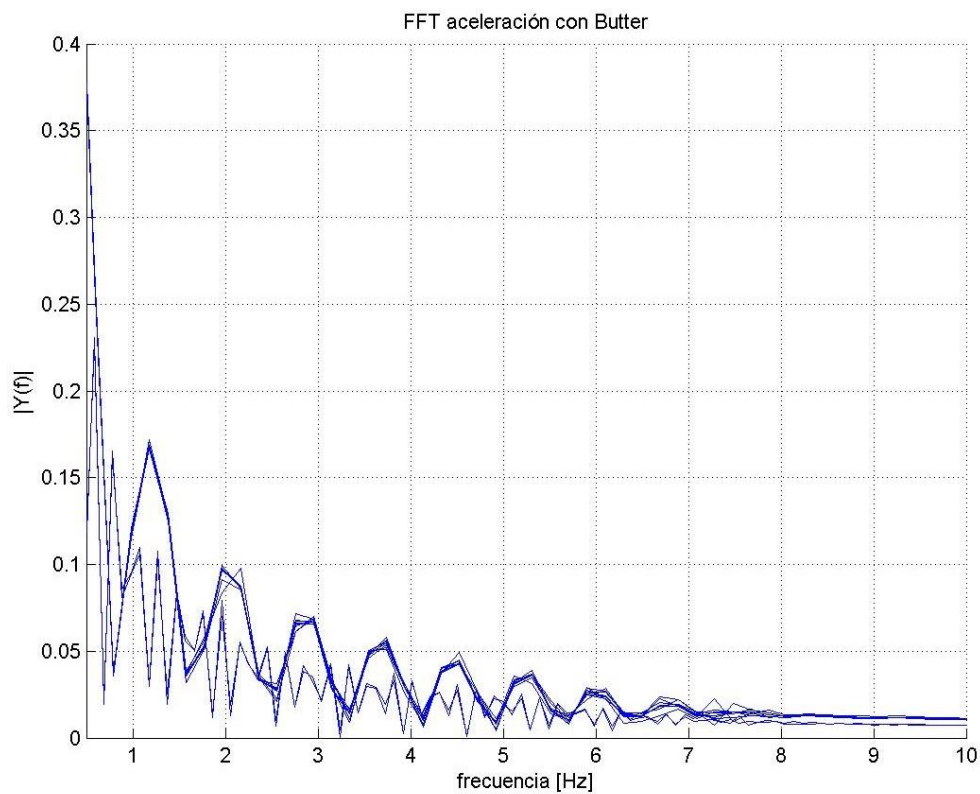


Figura 181. Registro de aceleraciones durante el mes de junio 2013.

Se incluye únicamente el análisis espectral de un único mes porque en todos ellos se ha registrado unos resultados idénticos.

Básicamente se puede decir que el primer modo de vibración por flexión longitudinal aparece aproximadamente a 1.38 Hz más próximo del modo 7 del modelo de cálculo (1.45 Hz) que del 5.

La siguiente frecuencia más importante se observa a 2.16Hz que se correspondería con el modo 10 del modelo (2.17 Hz).

Se observa también una frecuencia importante en torno a los 7.5 Hz que podría corresponderse al modo 27 (7.69Hz) de mucha menor energía y fácilmente filtrable.

5.4. Amortiguamiento

El amortiguamiento en una estructura vibrante se asocia con la disipación de energía mecánica, normalmente por conversión en energía térmica. La energía disipada es igual al trabajo realizado por la fuerza de amortiguamiento. En el caso de vibración libre, el efecto del amortiguamiento se manifiesta en un continuo decaimiento de la amplitud.

En la mayoría de los casos el amortiguamiento se evalúa a partir de una curva de caída, en vez de una curva de resonancia. Midiendo la caída de la curva de respuesta a una perturbación inicial que responda como un oscilador con un solo grado de libertad se pueden determinar las propiedades de amortiguamiento viscoso equivalente usando las ecuaciones:

$$A = 1/m * \ln(x_n/x_{n+m}) \quad \text{y} \quad \zeta = A/(2*\pi)$$

A y ζ dependen a menudo de la amplitud. Así, resultan diferentes valores del amortiguamiento en distintas partes de la curva.

El amortiguamiento en elementos de hormigón armado y pretensado en régimen cuasi-elástico muestra algunas características especiales debido a fisuración.

Para Niveles bajos de esfuerzos, correspondientes al estado sin fisurar, se tiene un cociente de amortiguamiento relativamente pequeño ($\zeta < 1\%$). El coeficiente de amortiguamiento aumenta con la formación de fisuras. En el estado final fisurado pero todavía con esfuerzos relativamente pequeños, el cociente de amortiguamiento es relativamente alto, quizás el doble o el triple del valor inicial del estado sin fisurar. Con

un aumento posterior de los esfuerzos, el coeficiente de amortiguamiento decrece rápidamente y puede alcanzar un valor menor que el inicial del estado sin fisurar [RG].

A continuación se incluye una tabla resumen con los amortiguamientos calculados en los vanos 3 (AV06) y 4 (AV07) a lo largo del año de registro.

| | AV06 | AV07 |
|-----------------|--------------|--------------|
| nov-12 | 0,01 | 0,002 |
| ene-13 | 0,007 | 0,01 |
| feb-13 | 0,009 | 0,002 |
| mar-13 | 0,005 | 0,009 |
| abr-13 | 0,004 | 0,003 |
| may-13 | 0,008 | 0,003 |
| jun-13 | 0,002 | 0,002 |
| jul-13 | 0,002 | 0,007 |
| ago-13 | 0,004 | - |
| Promedio | 0,006 | 0,005 |
| DesvTip | 0,003 | 0,003 |

Figura 182. Evolución del coeficiente de amortiguamiento en los vanos 3 y 4.

Se puede observar como el promedio de los amortiguamientos calculados es similar en ambos vanos y acorde con los valores de amortiguamiento propios de estructuras presforzadas sin fisurar (0,004-0,007).

5.4.1. Evolución del amortiguamiento en vano 3 (AV6)

nov-12

| m | X_n | X_{n+m} | $DL_{(0 - (n+m))}$ | DL |
|----|--------|-----------|--------------------|--------------|
| 18 | 0,235 | 0,0495 | 0,086534047 | 0,08653405 |
| 26 | 0,0495 | 0,0091 | 0,073893434 | 0,06514224 |
| 20 | 0,0091 | 0,0039 | 0,064040765 | 0,04236489 |
| | | | 0,074822749 | 0,06468039 |
| | | | ζ | 0,010 |

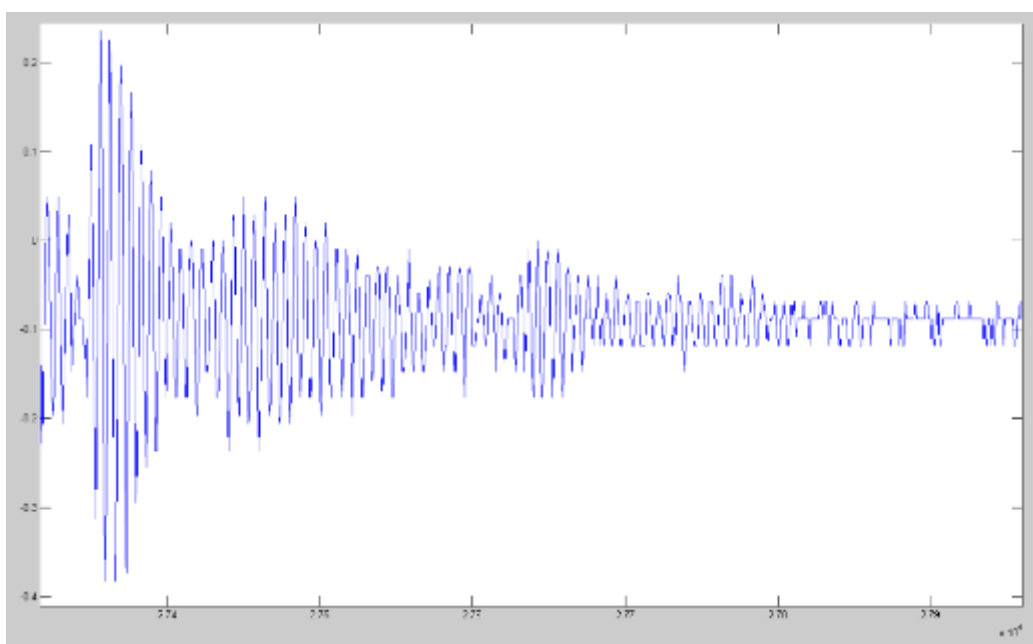


Figura 183. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV6 en vano 3 al paso de una circulación real tipo. Noviembre 2012.

ene-13

| m | X_n | X_{n+m} | $DL_{(0 - (n+m))}$ | DL |
|---|-------|-----------|--------------------|------------|
| 6 | 0,824 | 0,53 | -1,96709E-05 | 0,07354892 |
| 8 | 0,53 | 0,46 | -1,62417E-05 | 0,01770631 |
| | | | -1,79563E-05 | 0,04562762 |
| | | | ζ | 0,007 |

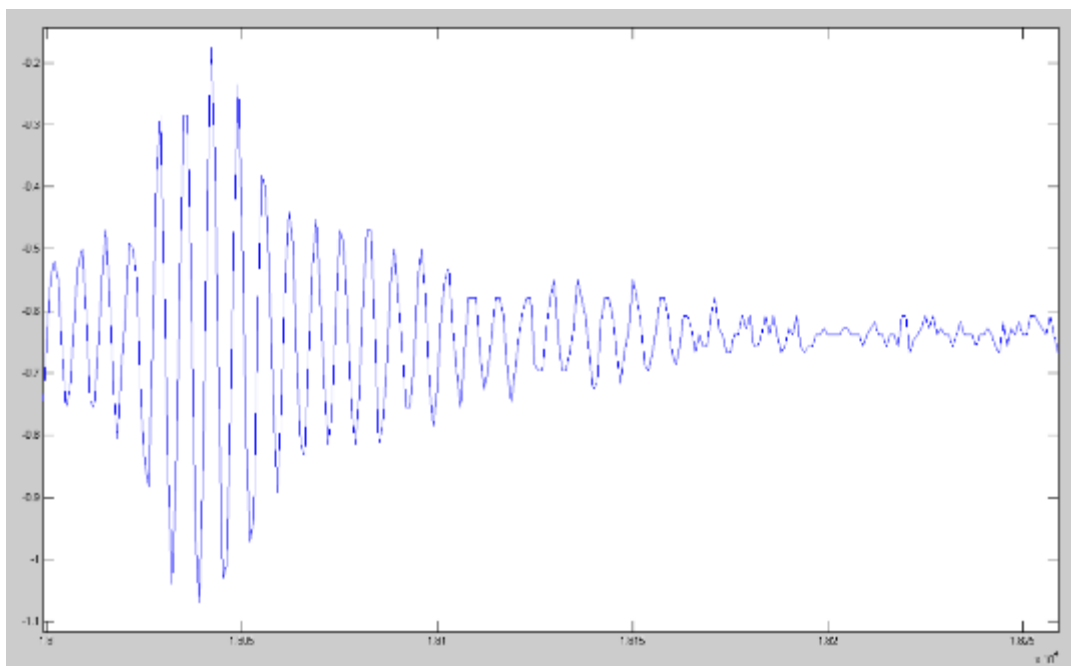


Figura 184. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV6 en vano 3 al paso de una circulación real tipo. Enero 2013.

feb-13

| m | X_n | X_{n+m} | $DL_{(0 - (n+m))}$ | DL |
|---|--------|-----------|--------------------|------------|
| 7 | 1,1472 | 1,02 | -1,77579E-05 | 0,01678879 |
| 5 | 2,02 | 0,96 | -1,70235E-05 | 0,1487839 |
| 5 | 0,96 | 0,93 | -1,66384E-05 | 0,00634974 |
| | | | -1,71399E-05 | 0,05730748 |
| | | | ζ | 0,009 |

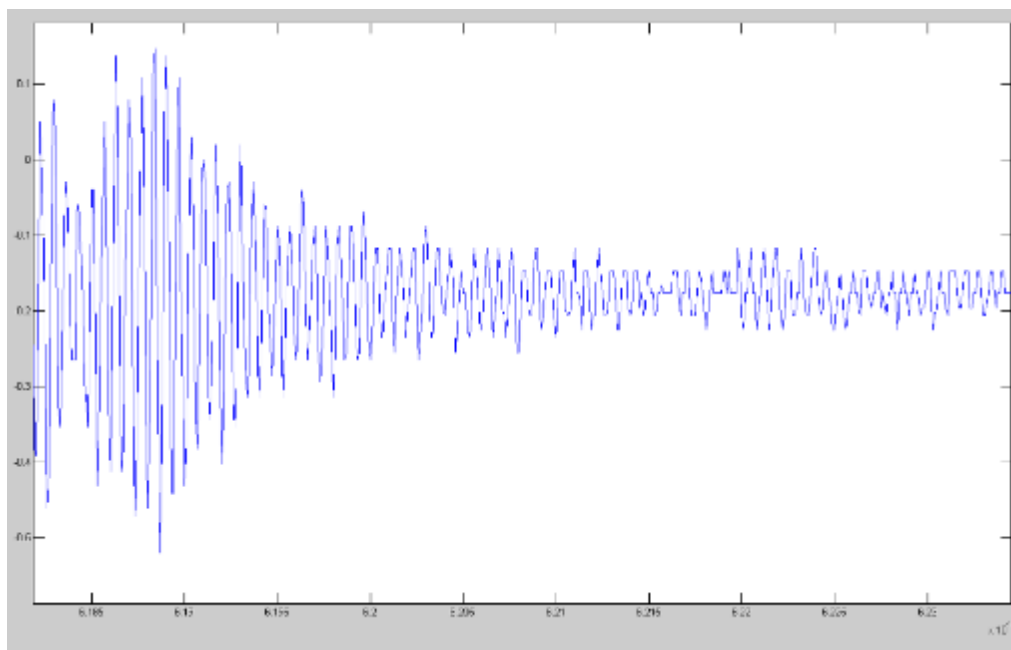


Figura 185. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV6 en vano 3 al paso de una circulación real tipo. Febrero 2013.

mar-13

| m | X_n | X_{n+m} | $DL_{(0 - (n+m))}$ | DL |
|----|-------|-----------|--------------------|------------|
| 8 | 1,118 | 0,863 | -1,0489E-05 | 0,03236025 |
| 9 | 0,863 | 0,661 | -8,33825E-06 | 0,02962898 |
| 17 | 0,661 | 0,37 | -3,65933E-06 | 0,0341324 |
| | | | -7,49554E-06 | 0,03204054 |
| | | | ζ | 0,005 |

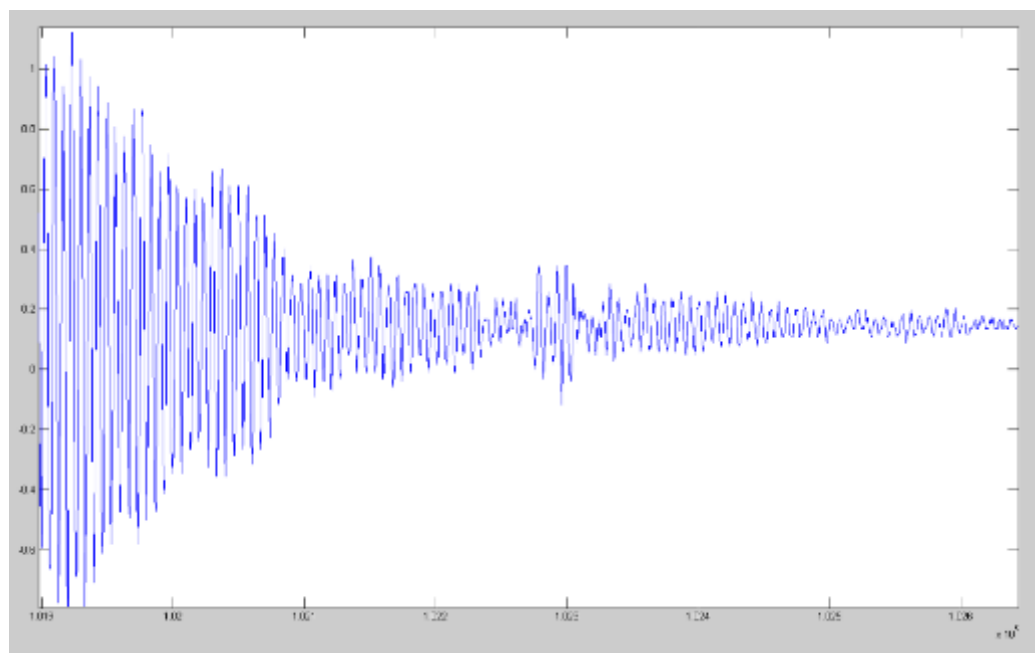


Figura 186. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV6 en vano 3 al paso de una circulación real tipo. Marzo 2013.

abr-13

| m | X_n | X_{n+m} | $DL_{(0 - (n+m))}$ | DL |
|---|-------|-----------|--------------------|------------|
| 3 | 1,373 | 1,265 | -1,01761E-05 | 0,02730867 |
| 4 | 1,265 | 1,148 | -9,5891E-06 | 0,02426271 |
| 5 | 1,148 | 1,058 | -9,09528E-06 | 0,01632819 |
| | | | -9,62015E-06 | 0,02263319 |
| | | | ζ | 0,004 |

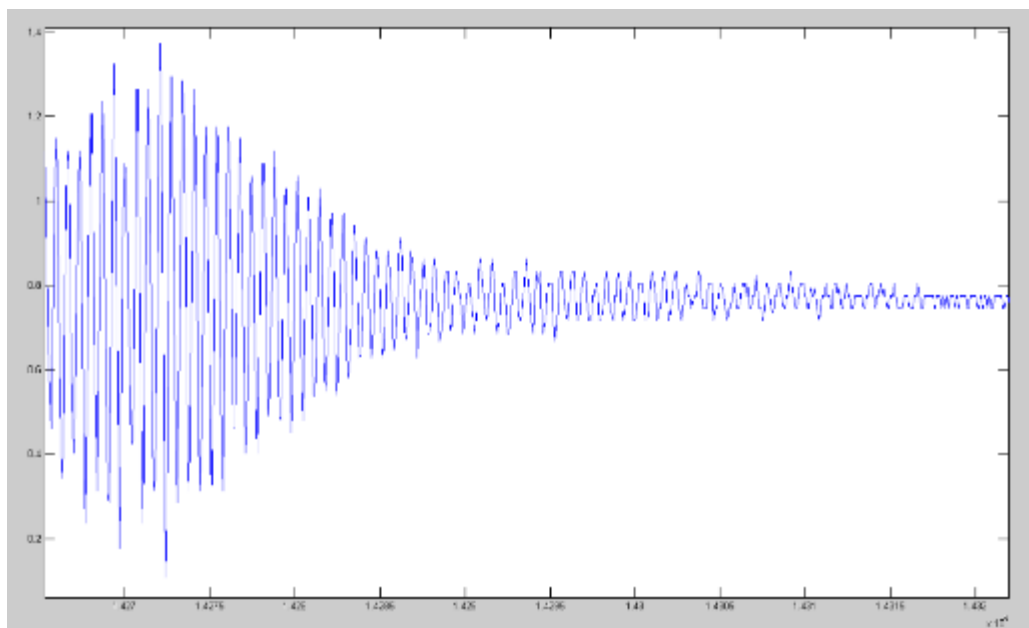


Figura 187. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV6 en vano 3 al paso de una circulación real tipo. Abril 2013.

may-13

| m | X_n | X_{n+m} | $DL_{(0 - (n+m))}$ | DL |
|----|-------|-----------|--------------------|------------|
| 1 | 1,373 | 1,295 | -8,25213E-06 | 0,05848743 |
| 1 | 1,295 | 1,197 | -7,8716E-06 | 0,07869227 |
| 18 | 1,197 | 1,058 | -7,27412E-06 | 0,00685767 |
| | | | -7,79928E-06 | 0,04801246 |
| | | | ζ | 0,008 |

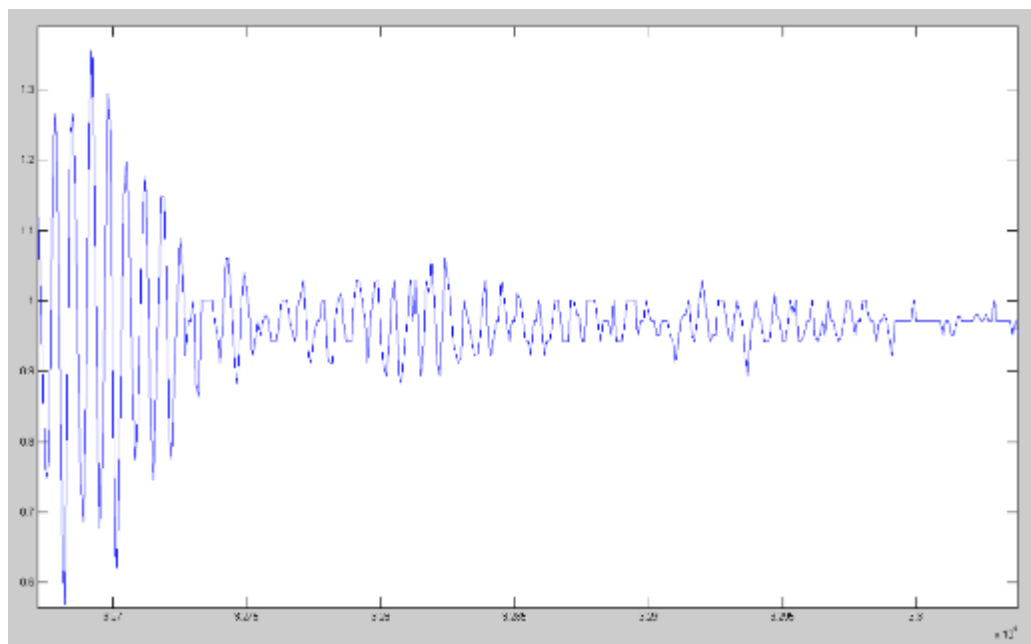


Figura 188. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV6 en vano 3 al paso de una circulación real tipo. Mayo 2013.

jun-13

| m | X_n | X_{n+m} | $DL_{(0 - (n+m))}$ | DL |
|---|-------|-----------|--------------------|------------|
| 4 | 1,668 | 1,55 | -7,5984E-06 | 0,01834259 |
| 7 | 1,55 | 1,442 | -7,30728E-06 | 0,0103177 |
| 4 | 1,442 | 1,403 | -7,19673E-06 | 0,00685456 |
| | | | -7,36747E-06 | 0,01183828 |
| | | | ζ | 0,002 |

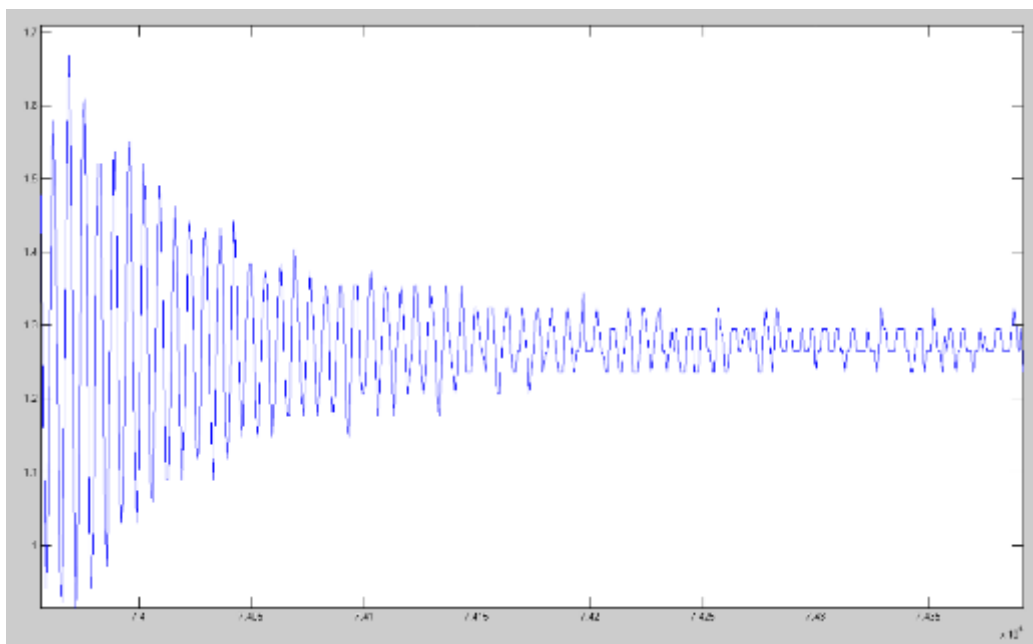


Figura 189. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV6 en vano 3 al paso de una circulación real tipo. Junio 2013.

jul-13

| m | X_n | X_{n+m} | $DL_{(0 - (n+m))}$ | DL |
|---|-------|-----------|--------------------|------------|
| 4 | 0,775 | 0,71 | -3,81615E-06 | 0,02189951 |
| 6 | 0,71 | 0,66 | -3,56404E-06 | 0,01217086 |
| 5 | 0,66 | 0,63 | -3,40342E-06 | 0,009304 |
| | | | -3,59453E-06 | 0,01445812 |
| | | | ζ | 0,002 |

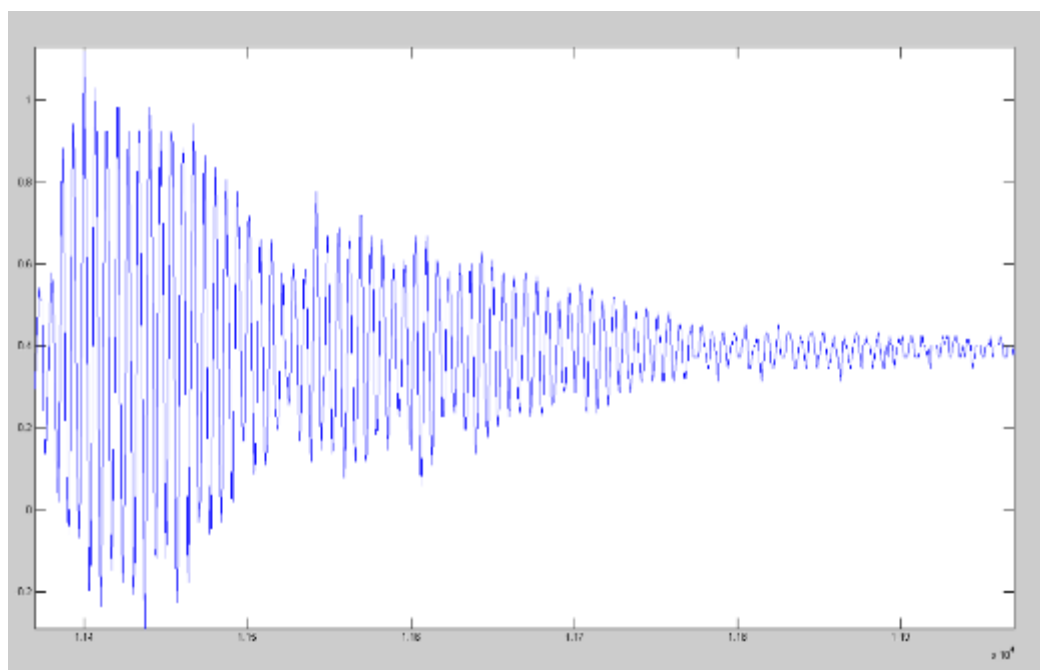


Figura 190. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV6 en vano 3 al paso de una circulación real tipo. Julio 2013.

ago-13

| m | X_n | X_{n+m} | $DL_{(0 - (n+m))}$ | DL |
|---|-------|-----------|--------------------|------------|
| 6 | 1,668 | 1,462 | -5,51857E-06 | 0,02196999 |
| 5 | 1,462 | 1,236 | -5,01153E-06 | 0,033585 |
| 8 | 1,236 | 1,089 | -4,62917E-06 | 0,01582756 |
| | | | -5,05309E-06 | 0,02379419 |
| | | | ζ | 0,004 |

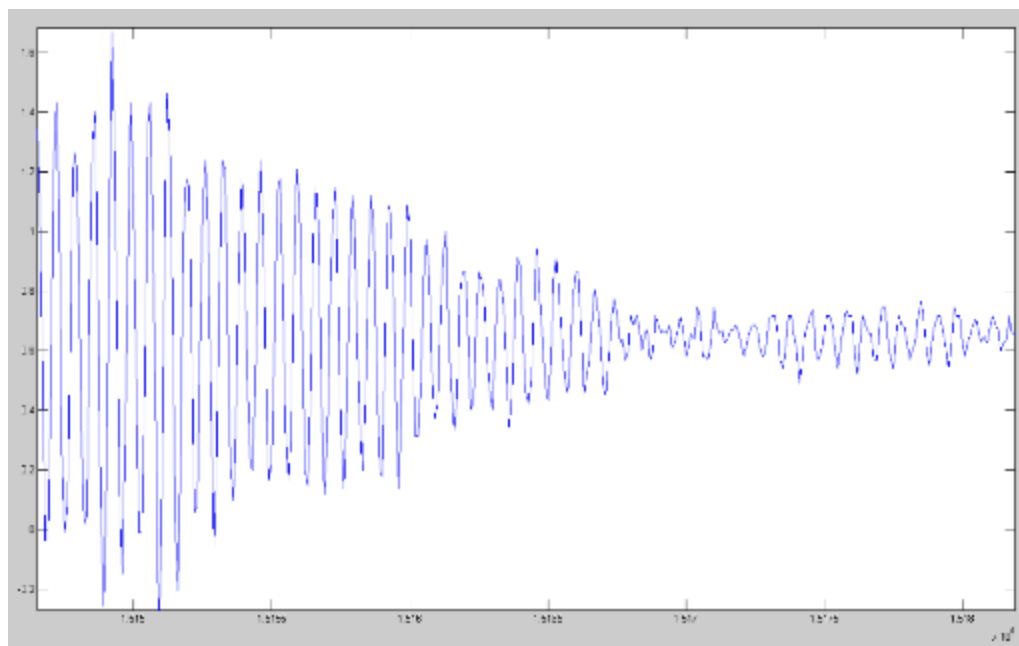


Figura 191. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV6 en vano 3 al paso de una circulación real tipo. Agosto 2013.

5.4.2. Evolución del amortiguamiento en vano 4 (AV7)

nov-12

| m | X_n | X_{n+m} | $DL_{(0 - (n+m))}$ | DL |
|----|--------|-----------|--------------------|------------|
| 11 | 1,0293 | 0,89 | 0,013219343 | 0,01321934 |
| 8 | 0,89 | 0,83 | 0,011326765 | 0,00872447 |
| 9 | 0,83 | 0,74 | 0,011785145 | 0,01275283 |
| | | | 0,012110418 | 0,01156555 |
| | | | ζ | 0,002 |

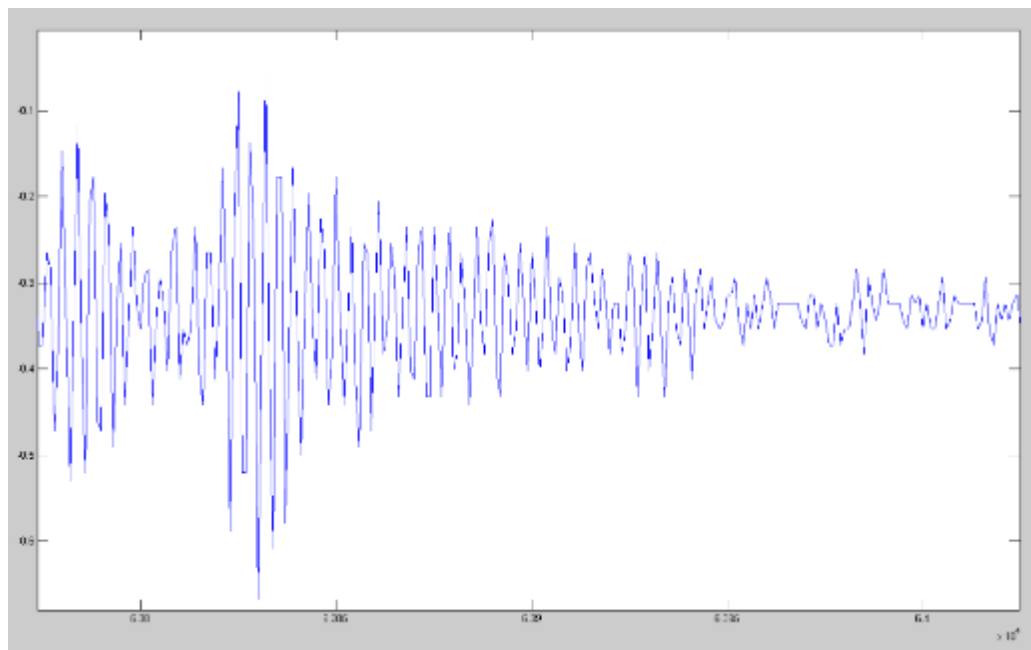


Figura 192. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV7 en vano 4 al paso de una circulación real tipo. Noviembre 2012.

ene-13

| m | X_n | X_{n+m} | $DL_{(0 - (n+m))}$ | DL |
|----|-------|-----------|--------------------|------------|
| 8 | 0,48 | 0,32 | 2,82809E-05 | 0,05068314 |
| 7 | 0,32 | 0,25 | 3,42508E-05 | 0,03526573 |
| 15 | 0,25 | 0,05 | 7,31767E-05 | 0,10729586 |
| | | | 4,52361E-05 | 0,06441491 |
| | | | ζ | 0,010 |

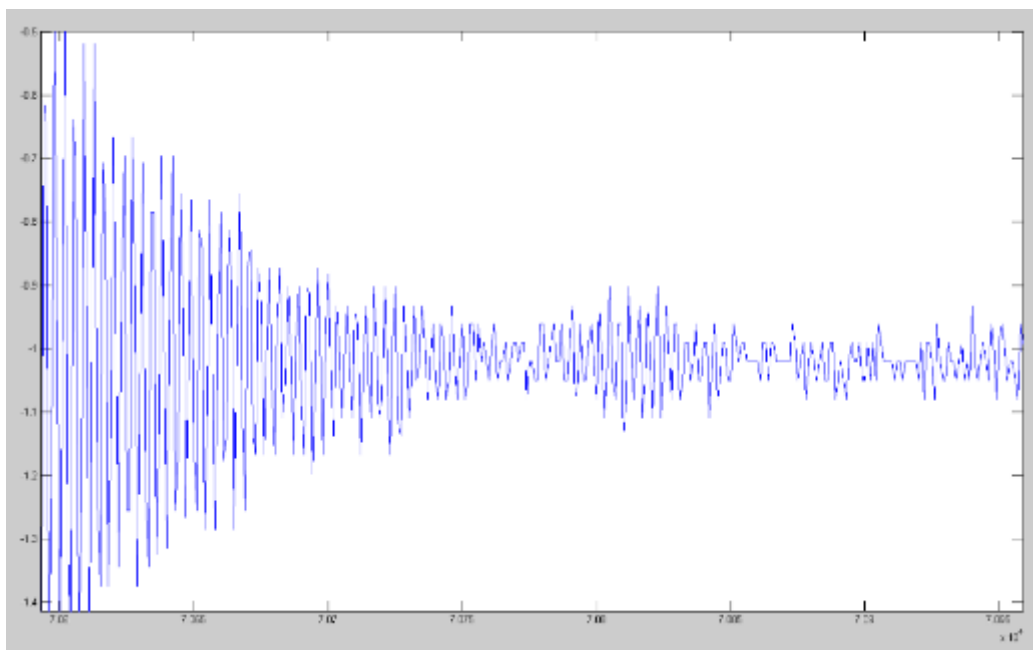


Figura 193. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV7 en vano 4 al paso de una circulación real tipo. Enero 2013.

feb-13

| m | X_n | X_{n+m} | $DL_{(0 - (n+m))}$ | DL |
|----|-------|-----------|--------------------|------------|
| 3 | 0,89 | 0,83 | 2,60411E-06 | 0,02326525 |
| 3 | 0,83 | 0,77 | 3,51193E-06 | 0,02501173 |
| 5 | 0,77 | 0,75 | 3,83014E-06 | 0,00526346 |
| 12 | 0,75 | 0,71 | 4,49262E-06 | 0,00456735 |
| | | | 3,6097E-06 | 0,01452695 |
| | | | ζ | 0,002 |

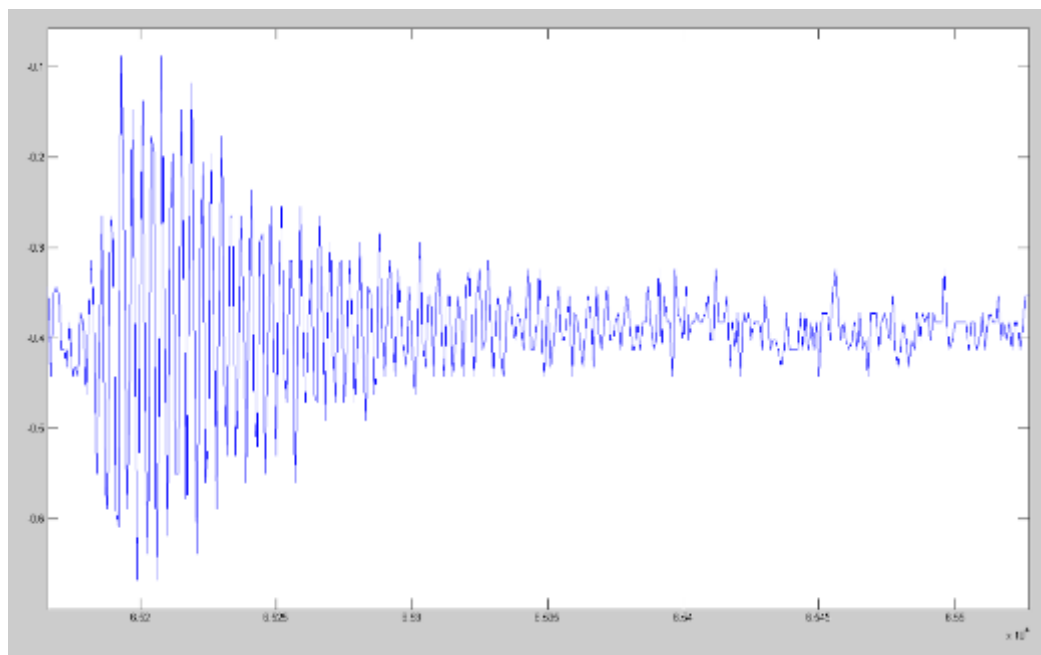


Figura 194. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV7 en vano 4 al paso de una circulación real tipo. Febrero 2013.

mar-13

| m | x_n | x_{n+m} | $DL_{(0 - (n+m))}$ | DL |
|---|--------|-----------|--------------------|------------|
| 4 | 0,8535 | 0,628 | 3,98463E-06 | 0,07670134 |
| 6 | 0,628 | 0,48 | 6,1517E-06 | 0,04479234 |
| 8 | 0,48 | 0,35 | 8,69822E-06 | 0,03948162 |
| | | | 6,27818E-06 | 0,05365844 |
| | | | ζ | 0,009 |

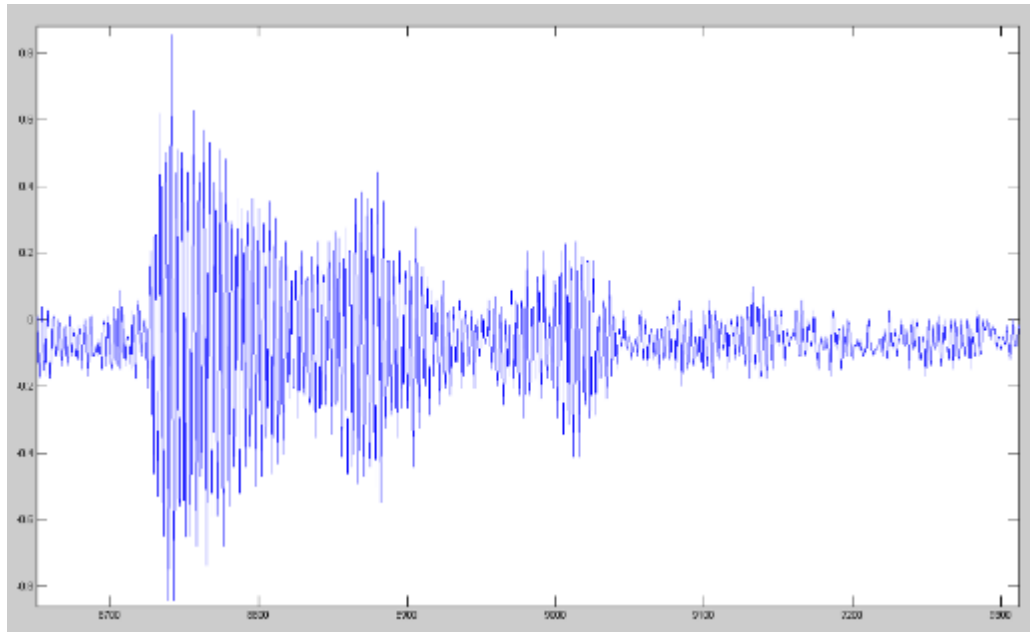


Figura 195. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV7 en vano 4 al paso de una circulación real tipo. Marzo 2013.

abr-13

| m | X_n | X_{n+m} | $DL_{(0 - (n+m))}$ | DL |
|----|-------|-----------|--------------------|------------|
| 6 | 1,001 | 0,85 | 1,15729E-06 | 0,02725307 |
| 6 | 0,85 | 0,79 | 1,59985E-06 | 0,01220057 |
| 12 | 0,79 | 0,63 | 2,96799E-06 | 0,01885943 |
| | | | 1,90838E-06 | 0,01943769 |
| | | | ζ | 0,003 |

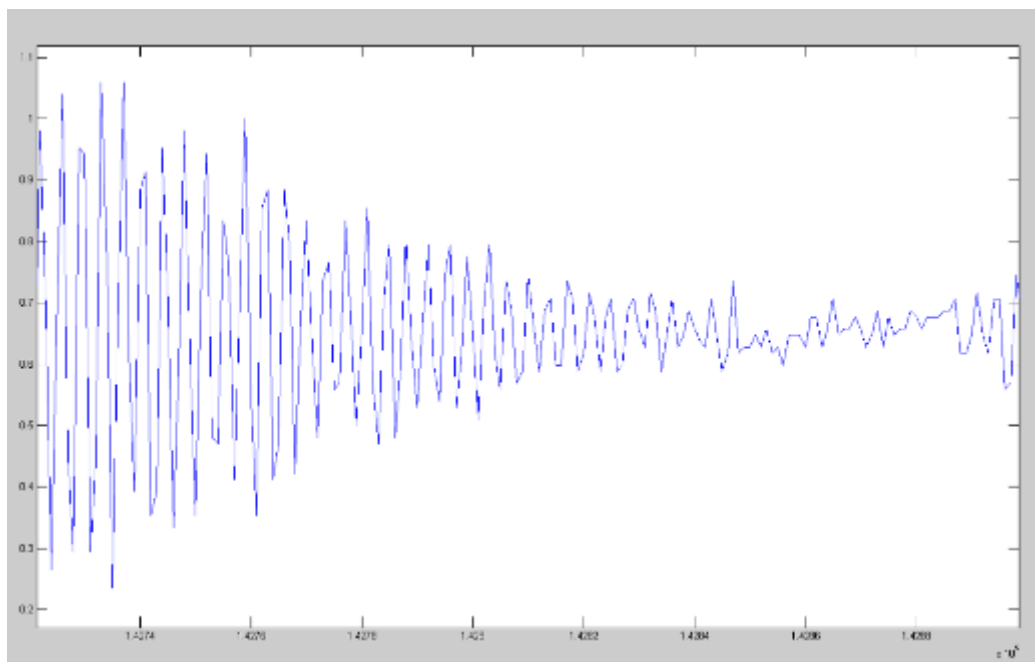


Figura 196. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV7 en vano 4 al paso de una circulación real tipo. Abril 2013.

may-13

| m | X_n | X_{n+m} | $DL_{(0 - (n+m))}$ | DL |
|----|-------|-----------|--------------------|------------|
| 6 | 1,472 | 1,14 | -4,93943E-07 | 0,04259896 |
| 9 | 1,14 | 1,059 | -1,37545E-07 | 0,00818924 |
| 18 | 1,059 | 0,9 | 6,4903E-07 | 0,00903809 |
| | | | 5,84737E-09 | 0,0199421 |
| | | | ζ | 0,003 |

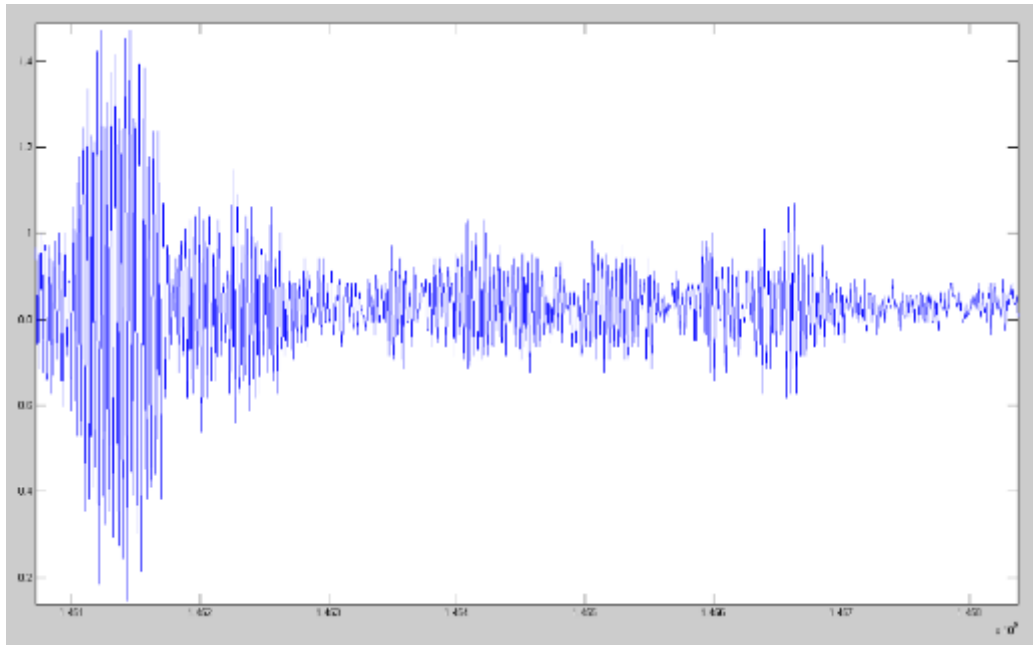


Figura 197. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV7 en vano 4 al paso de una circulación real tipo. Mayo 2013.

jun-13

| m | X_n | X_{n+m} | $DL_{(0 - (n+m))}$ | DL |
|----|-------|-----------|--------------------|------------|
| 7 | 1,589 | 1,413 | -1,27621E-06 | 0,01676997 |
| 5 | 1,413 | 1,354 | -1,10438E-06 | 0,00853039 |
| 11 | 1,354 | 1,305 | -9,55873E-07 | 0,00335092 |
| | | | -1,11215E-06 | 0,00955043 |
| | | | ζ | 0,002 |

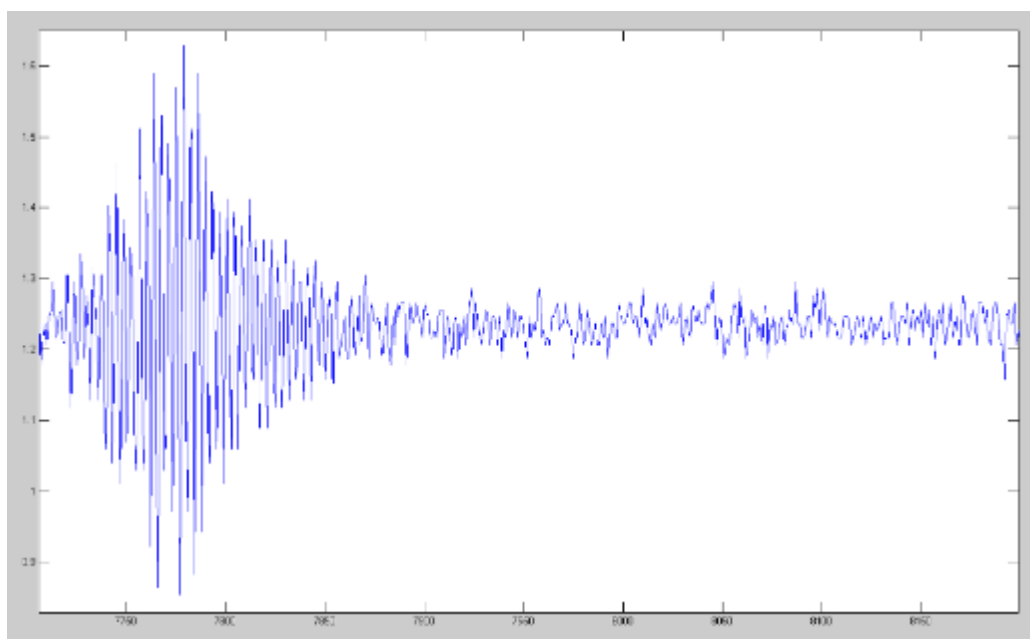


Figura 198. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV7 en vano 4 al paso de una circulación real tipo. Junio 2013.

jul-13

| m | X_n | X_{n+m} | $DL_{(0 - (n+m))}$ | DL |
|---|-------|-----------|--------------------|------------|
| 3 | 1,295 | 1,03 | -2,3464E-09 | 0,0763173 |
| 5 | 1,03 | 0,83 | 7,42754E-07 | 0,04317768 |
| 9 | 0,83 | 0,76 | 1,04681E-06 | 0,0097897 |
| | | | 5,95739E-07 | 0,04309489 |
| | | | ζ | 0,007 |

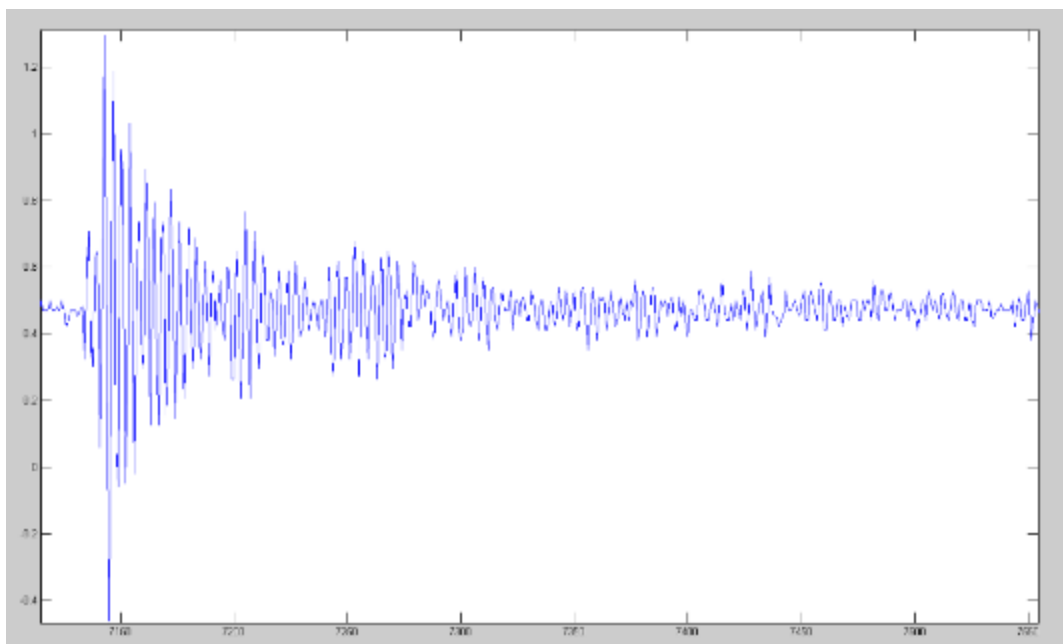


Figura 199. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV7 en vano 4 al paso de una circulación real tipo. Julio 2013.

ANEXO VI

**CONTROL ESTADÍSTICO APLICADO A LAS
ACELERACIONES EN EL DOMINIO DEL TIEMPO DEL
PUENTE INFIERNILLO 0**

A continuación se incluyen los Diagramas de Control de los valores máximos y mínimos diarios de las aceleraciones verticales en los vanos centrales del puente Infiernillo 0. Sirvan de ejemplo como aplicación de los Diagramas de Control para variables dinámicas en puentes.

6.1. Aceleración AV21

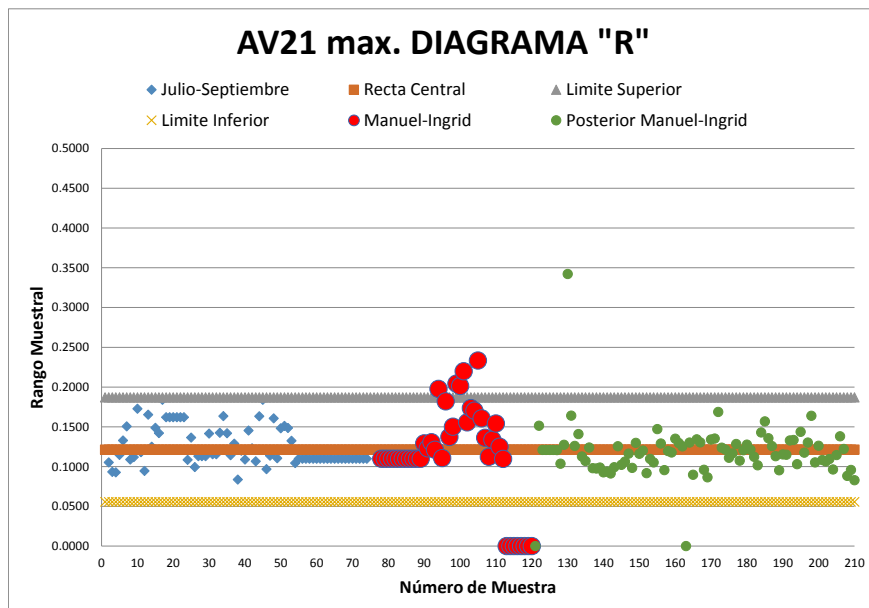


Figura 200. Diagrama de Control del Rango de las aceleraciones máximas verticales en vano 4. Lado derecho.

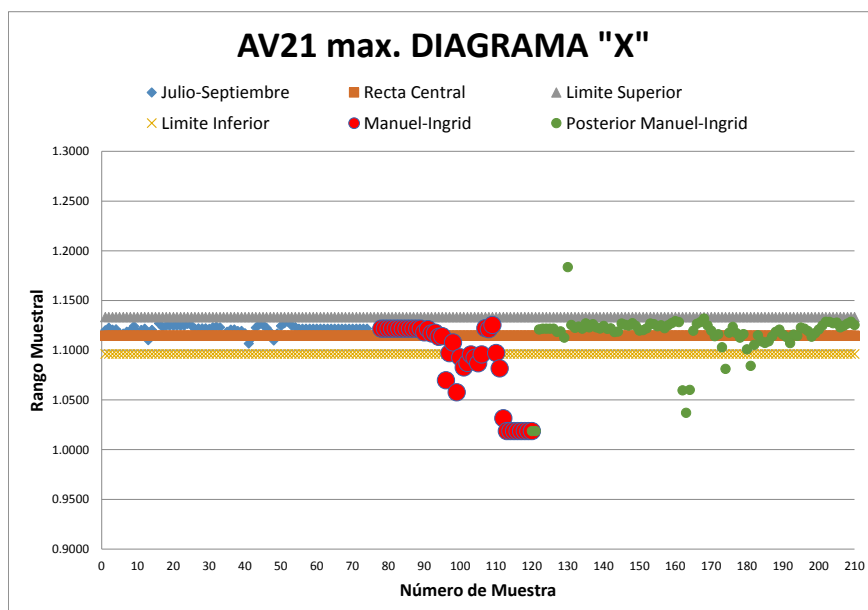


Figura 201. Diagrama de Control del Valor Medio de las aceleraciones máximas verticales en vano 4. Lado derecho.

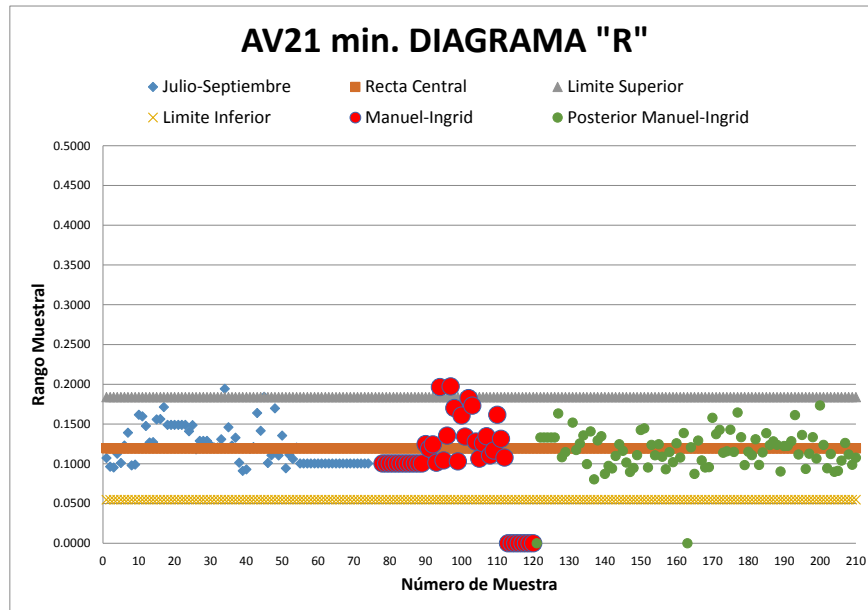


Figura 202. Diagrama de Control del Rango de las aceleraciones verticales mínimas en vano 4. Lado derecho.

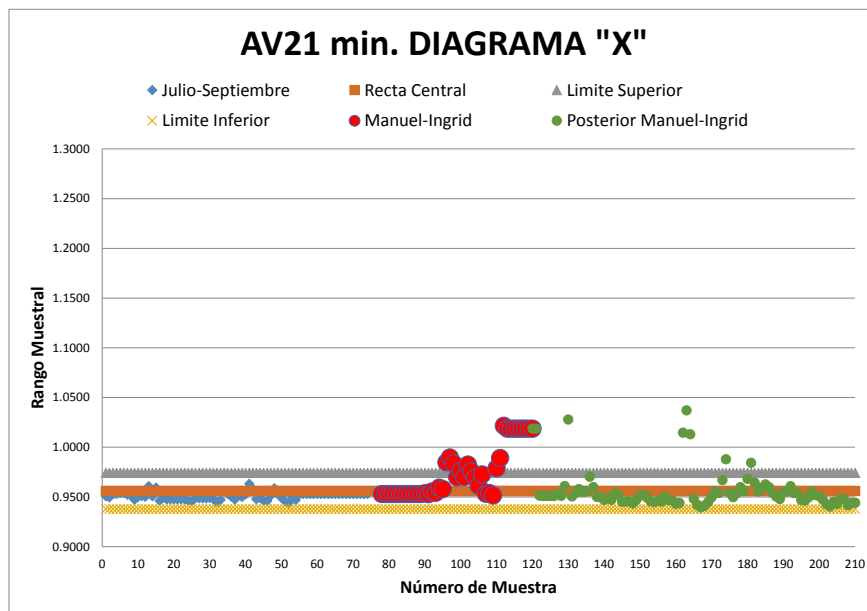


Figura 203. Diagrama de Control del Valor Medio de las aceleraciones verticales mínimas en vano 4. Lado derecho.

6.2. Aceleración AV22

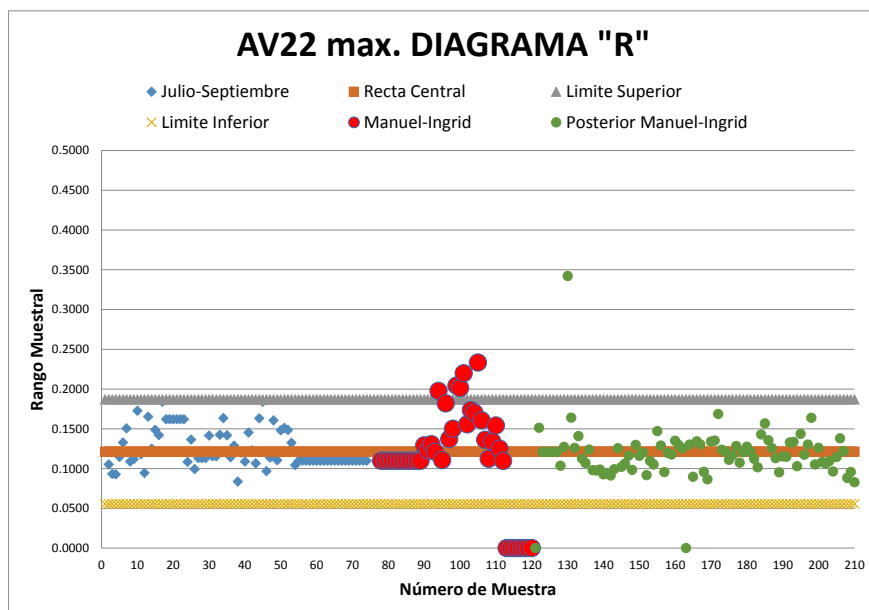


Figura 204. Diagrama de Control del Rango de las aceleraciones máximas verticales en vano 4. Lado izquierdo.

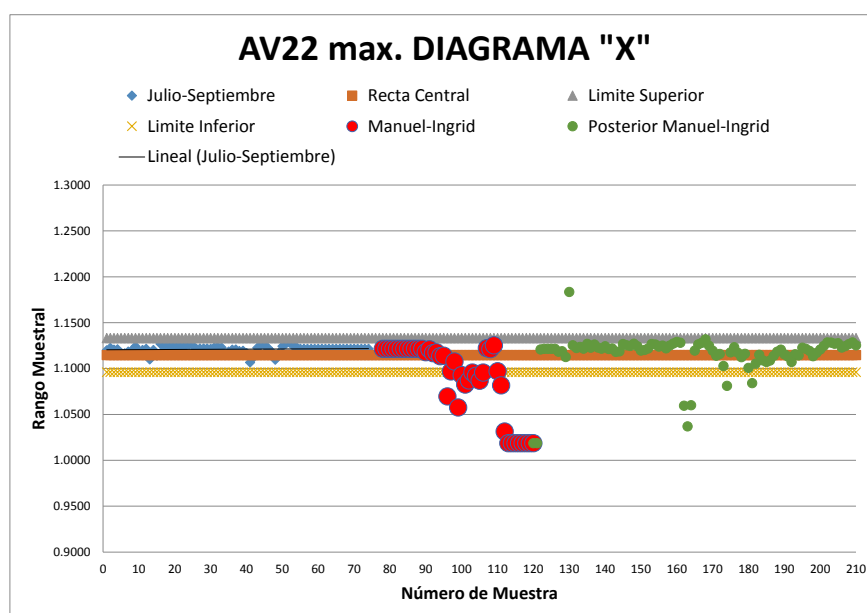


Figura 205. Diagrama de Control del Valor Medio de las aceleraciones máximas verticales en vano 4. Lado izquierdo.

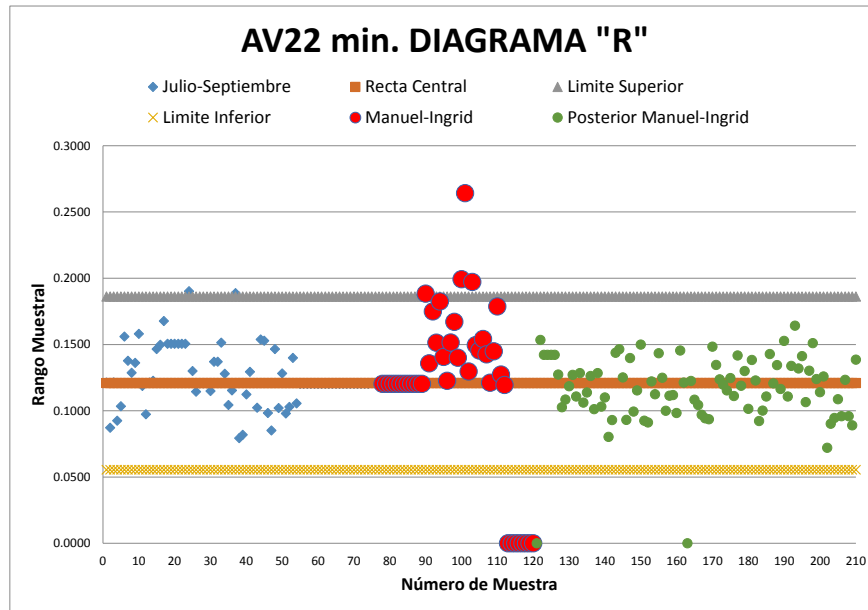


Figura 206. Diagrama de Control del Rango de las aceleraciones mínimas verticales en vano 4. Lado izquierdo.

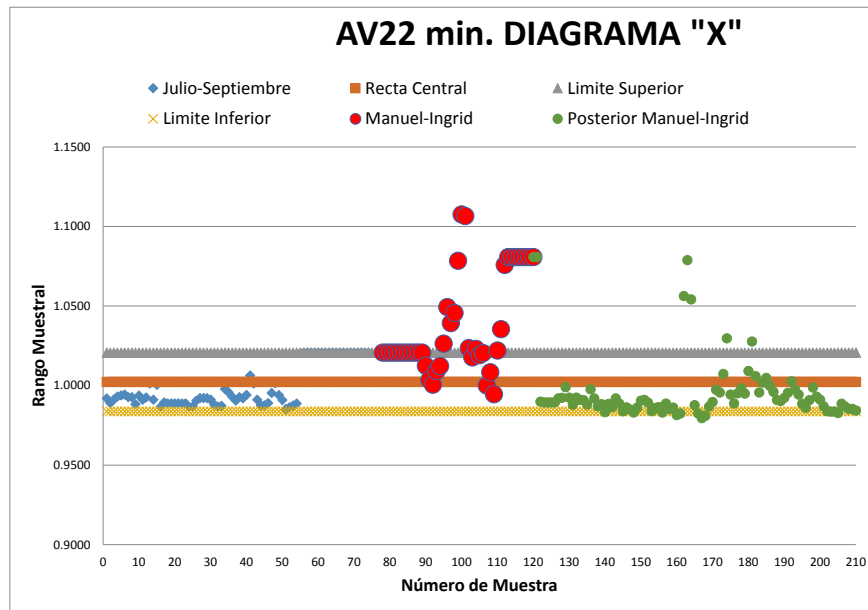


Figura 207. Diagrama de Control del Valor Medio de las aceleraciones mínimas verticales en vano 4. Lado derecho.

6.3. Aceleración AV41

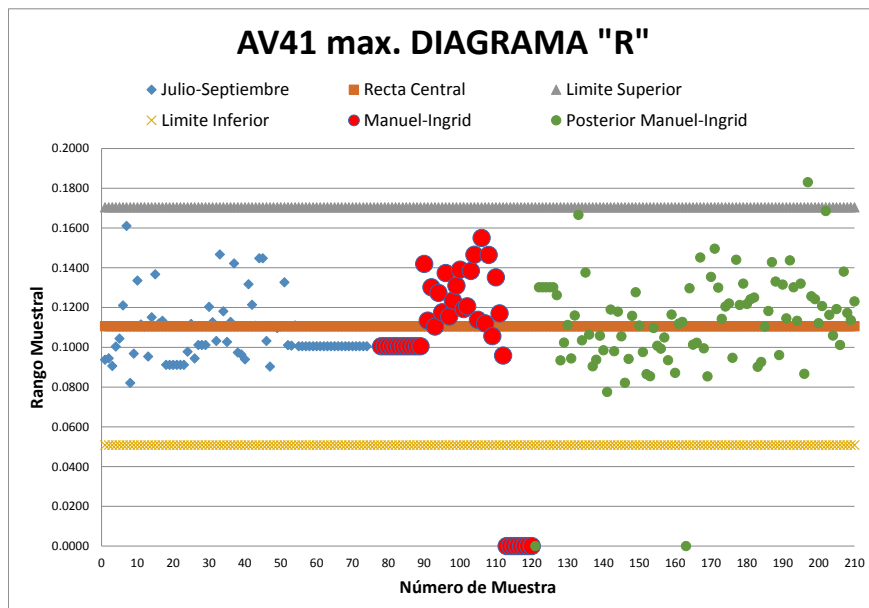


Figura 208. Diagrama de Control del Rango de las aceleraciones máximas verticales en vano 5. Lado izquierdo.

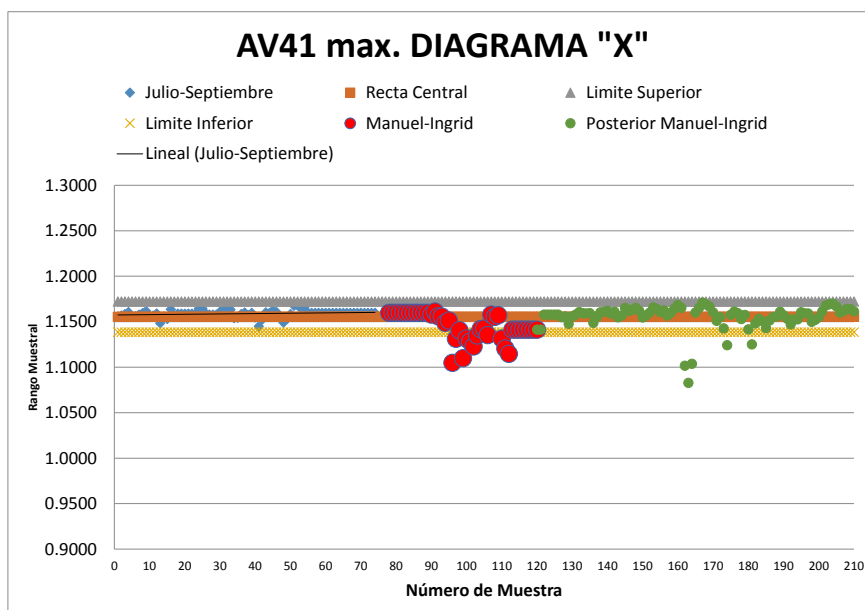


Figura 209. Diagrama de Control del Valor Medio de las aceleraciones máximas verticales en vano 5. Lado izquierdo.

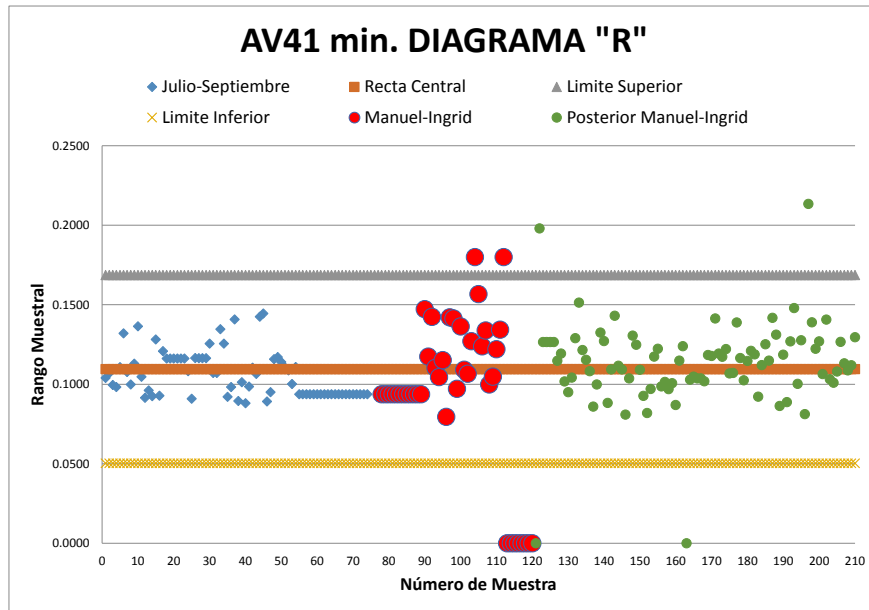


Figura 210. Diagrama de Control del Rango de las aceleraciones mínimas verticales en vano 5. Lado izquierdo.

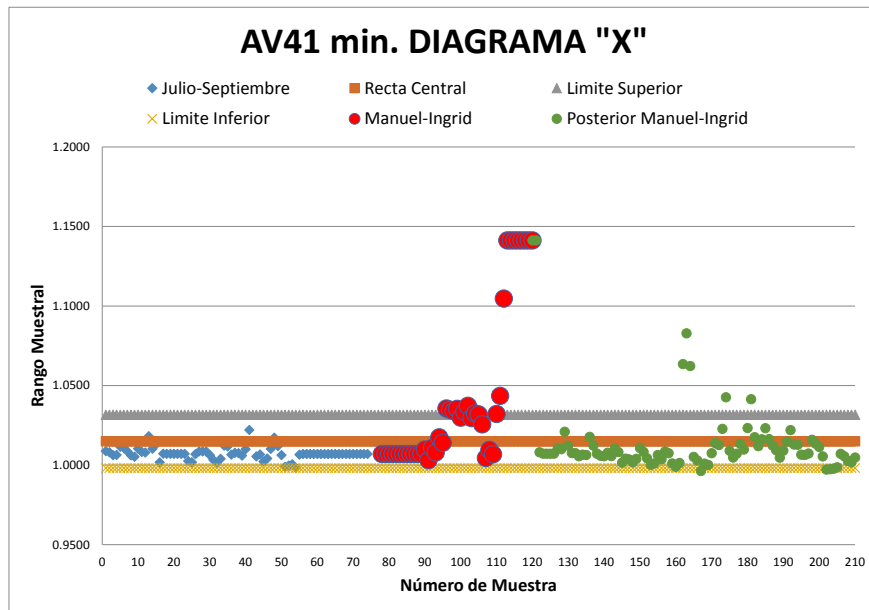


Figura 211. Diagrama de Control del Valor Medio de las aceleraciones mínimas verticales en vano 5. Lado izquierdo.

6.4. Aceleración AV42

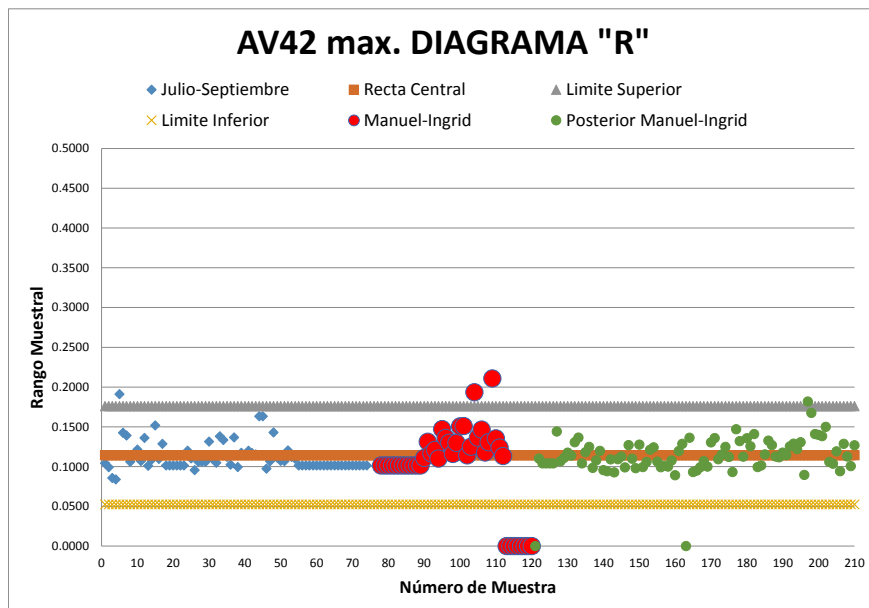


Figura 212. Diagrama de Control del Rango de las aceleraciones máximas verticales en vano 5. Lado derecho.

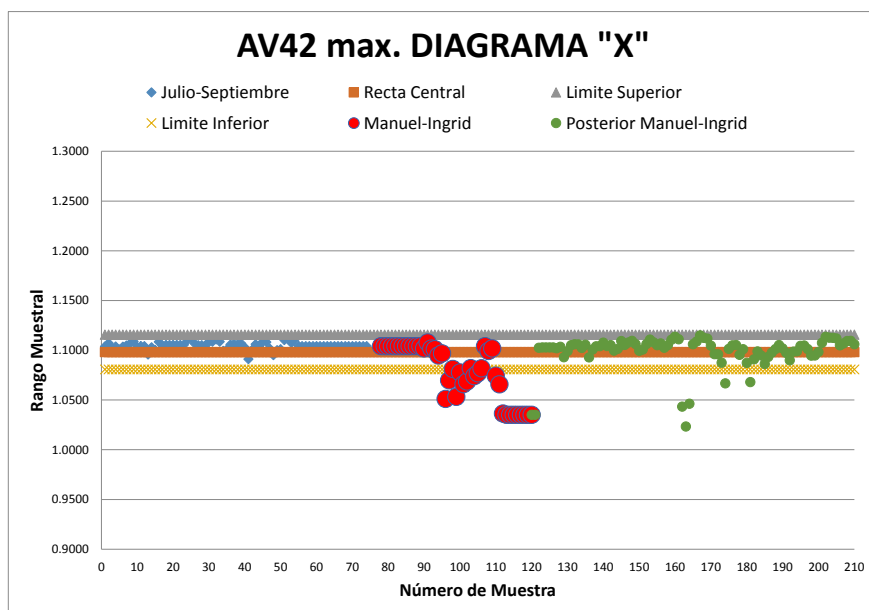


Figura 213. Diagrama de Control del Valor Medio de las aceleraciones máximas verticales en vano 5. Lado derecho.

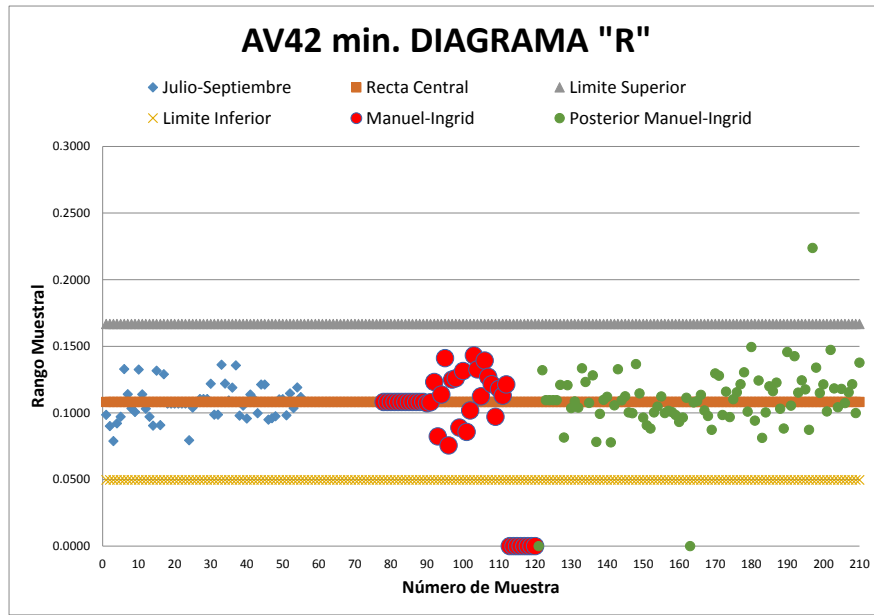


Figura 214. Diagrama de Control del Rango de las aceleraciones mínimas verticales en vano 5. Lado derecho.

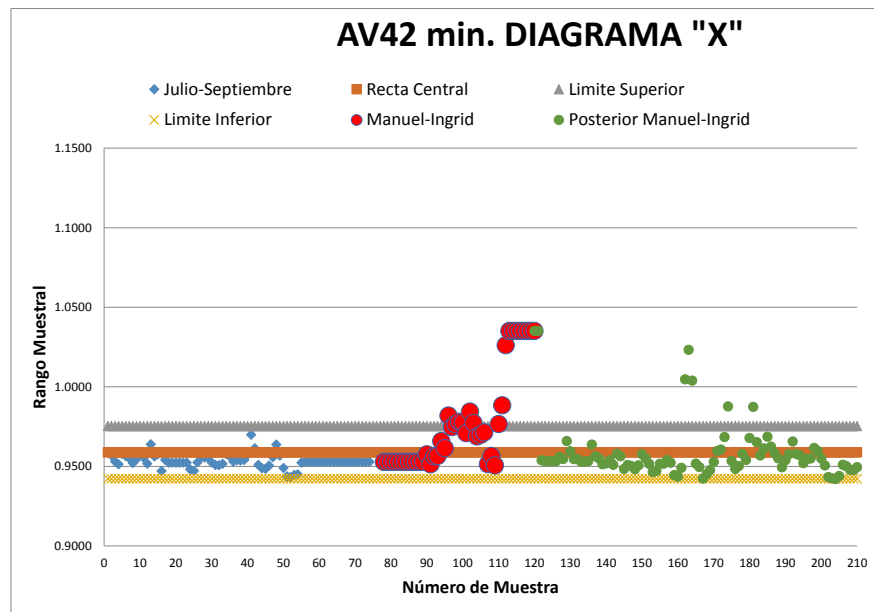


Figura 215. Diagrama de Control del Valor Medio de las aceleraciones mínimas verticales en vano 5. Lado derecho.

ANEXO VII

CADENAS DE MARKOV

7.1. Cadenas de Markov

Una vez creadas las herramientas adecuadas para valorar cuantitativamente el buen comportamiento del puente e integradas en el Sistema de Gestión llega el momento de aplicarlo a la optimización de los recursos económicos presupuestarios generalmente destinados al mantenimiento y conservación.

Una de las herramientas más comúnmente utilizadas e implementadas en los Sistemas de Gestión de Infraestructuras son las Cadenas de Markov.

Una Cadena de Markov es un sistema aplicable a la gestión de puentes que ayuda a predecir las condiciones futuras de los puentes pertenecientes a una red bajo distintas hipótesis de gestión.

7.2. Sucesiones de variables discretas. Cadenas de Markov

7.2.1. Planteamiento

Como se acaba de indicar, el primero de los cuatro casos en que se ha estructurado el estudio de sucesiones de variables aleatorias no independientes corresponde a las sucesiones de variables discretas.

Un ejemplo de este tipo lo constituye la sucesión de variables binomiales

$$B(0, p), B(1, p), \dots, B(n, p), \dots$$

Donde $B(i, p)$ representa el número de éxitos obtenidos en la repetición i veces de un experimento dicotómico con probabilidad p de éxito en cada intento.

En este caso es discreta la evolución de la sucesión ($n=0, 1, \dots, n, \dots$) y es discreta la variable aleatoria, que adopta los valores $x=0, 1, \dots, n$.

Un caso particular de las sucesiones de variables aleatorias discretas son, precisamente, las cadenas de Markov, que se analizan a continuación.

7.2.2. Cadenas de Markov

7.2.2.1. Definición

Sea una sucesión de variables aleatorias $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n, \dots$. Se dice que existe dependencia de Markov entre ellas si:

$$P(\zeta_n = x_n / \zeta_{n-1} = x_{n-1}, \zeta_{n-2} = x_{n-2}, \dots, \zeta_1 = x_1) = P(\zeta_n = x_n / \zeta_{n-1} = x_{n-1})$$

Es decir, la probabilidad de la variable aleatoria n -ésima depende sólo del valor de la $n-1$ -ésima y no de las anteriores. Por ello se dice que es una sucesión desmemoriada, que solo recuerda la última concreción.

En caso de que la relación sea del tipo:

$$P(\zeta_n = x_n / \zeta_{n-1} = x_{n-1}, \zeta_{n-2} = x_{n-2}, \dots, \zeta_1 = x_1) = P(\zeta_n = x_n / \zeta_{n-1} = x_{n-1}, \zeta_{n-2} = x_{n-2}, \dots, \zeta_{n-r} = x_{n-r})$$

Se dice que la dependencia markoviana es de grado r .

De esta forma, las sucesiones de variables aleatorias discretas que tienen dependencia markoviana se llaman cadenas de Markov.

Se puede comprobar fácilmente que la sucesión de variables aleatorias binomiales $B(n, p)$ (con $n=1, 2, 3, \dots$) es una cadena de Markov de grado uno. Basta verificar:

$$P[B(n, p) = x] = P[B(n-1, p) = x] q + P[B(n-1, p) = x-1] p$$

Definida la dependencia markoviana o sucesión desmemoriada, se trata de investigar la existencia de límite de esa sucesión, lo que conduce a la obtención de la distribución estacionaria que resulta ser un vector propio de la unidad.

7.2.2.2. Estados de la cadena

En una cadena de Markov se llaman estados de cadena a los valores que pueden adoptar las variables aleatorias de la sucesión. Al ser estos valores discretos se pueden poner en correspondencia biunívoca con la serie de números naturales, lo que permite hablar de estado $0, 1, 2, \dots, n$. En el caso de la cadena de Markov $B(n, p)$ anteriormente considerada, los estados son $0, 1, 2, \dots, n$ (los valores que pueden adoptar cada una de las variables binomiales de la cadena).

En lo sucesivo se denominará a cada estado E_i o simplemente i .

7.2.3. Matriz de transición

Llamaremos matriz de transición a

$$M = \|p_{ij}(n)\|$$

Donde

$$p_{ij}(n) = P(\zeta_{n=1} / \zeta_{n-1=j})$$

si las probabilidades $p_{ij}(n)$ no dependen de n se dice que la cadena es homogénea. En lo sucesivo nos limitaremos a las cadenas de Markov homogéneas de primer grado.

Definida así la matriz de transición, por el teorema de la probabilidad total se tiene que

$$P(\zeta_{n=0}) = P[\zeta_{n=0} / \zeta_{n-1=0}] P(\zeta_{n-1=0}) + P[\zeta_{n=0} / \zeta_{n-1=1}] P(\zeta_{n-1=1}) + \dots + P[\zeta_{n=0} / \zeta_{n-1=n-1}] P(\zeta_{n-1=n-1})$$

Lo mismo se puede plantear para $\zeta_{n=1}, \zeta_{n=2}, \dots, \zeta_{n=n}$, de forma que

$$\zeta_n = M \zeta_{n-1}$$

es decir, la matriz de transición nos permite obtener las probabilidades de la variable ζ_n (su función de cuantía) a partir de las probabilidades de la variable ζ_{n-1} (su función de cuantía).

7.2.3.1. Matriz estocástica

Se denomina matriz estocástica a aquella cuyas columnas suman la unidad. Es el caso de la matriz de transición que acaba de definirse, ya que los valores de la columna j representan las probabilidades de los estados posibles de la variable ζ_n cuando ζ_{n-1} adopta el valor j .

Por teoría general del algebra lineal se sabe que toda matriz estocástica tiene como autovalor la unidad, lo que implica que la ecuación siguiente

$$|M - \lambda I| = 0$$

Se satisface para $\lambda=1$ (basta comprobar que restando en M el valor uno de la diagonal, la suma de columnas es cero y la matriz resultante es singular).

Ello quiere decir, por definición de autovalor, que existe una matriz columna X tal que $MX=X$.

7.2.3.2. Situación estacionaria

Cuando la cadena alcanza una situación tal que las probabilidades de cada estado coinciden con el vector X , entonces dichas probabilidades no varían a partir de ese momento y la situación se denomina estacionaria.

Cabe preguntarse ahora si es posible que siendo cualquiera la distribución inicial de probabilidades ξ_0 la sucesión generada por la recurrencia

$$\xi_n = M \xi_{n-1} = M(M \xi_{n-2}) = \dots = M^n \xi_0$$

tenga límite y alcance una situación estacionaria.

7.2.3.3. Cadena de Markov irreductible

Una cadena de Markov es irreductible si todo estado es alcanzable desde cualquier otro estado.

A su vez, se dice que un estado i es alcanzable desde otro estado j si existe un número n de pasos finito y mayor que cero, al cabo de los cuales es posible llegar a i desde j . dicho de otra manera, llamando:

$$P_{ij,n} = \|M\|^n$$

El estado i es alcanzable desde el estado j si

$$P_{ij,n} > 0 \text{ con } 0 < n < \infty$$

7.2.3.4. Periodo de recurrencia

Se denomina periodo de recurrencia o de retorno de un estado i al número medio t_i de pasos que hay que dar para alcanzar el estado i partiendo de ese mismo estado i , siempre y cuando sea seguro que se pueda regresar al estado i . Ello implica que la probabilidad de alcanzar un cierto estado i partiendo desde ese mismo estado i debe ser 1. Dicha probabilidad se calcula en la forma siguiente

$$q_i = \sum q_{i,k}$$

en donde $q_{i,k}$ es la probabilidad de que partiendo del estado i se alcance de nuevo el estado i por primera vez al cabo de k pasos

Es decir, la probabilidad q_i es igual a la probabilidad de la unión de una sucesión infinita de sucesos disjuntos

$$a_i, i = \text{que se alcance de nuevo el estado } i \text{ al cabo de un paso}$$

$a_{i, 2}$ = que se alcance de nuevo el estado i al cabo de dos pasos

$a_{i, 3}$ = que se alcance de nuevo el estado i al cabo de tres pasos

...

Al ser los sucesos $a_{i, k}$ disjuntos, la probabilidad de su unión es la suma de las probabilidades $q_{i, k}$ de cada uno de ellos.

Entonces, si $q_i = 1$, se puede definir el periodo de recurrencia o de retorno en la forma siguiente (valor esperado del número de pasos que hay que dar para retornar al estado i desde el estado i)

$$t_i = \sum k q_{i, k}$$

Cuando la probabilidad q_i es menor que uno el regreso no es seguro y el periodo de recurrencia es infinito

$$q_i < 1 \rightarrow t_i = \infty$$

Una propiedad muy importante es que si existe una distribución estacionaria, entonces sus elementos son $1/t_i$.

El cálculo de la probabilidad q_i y del periodo de recurrencia t_i y, por tanto, el de los valores $1/t_i$ de la distribución estacionaria si esta existe (es decir, si $q_i = 1$) dependen de las probabilidades $q_{i, k}$. Su obtención es posible relacionándolas con las probabilidades $p_{ii, n}$ de la matriz M_n . En efecto, el teorema de la probabilidad total permite establecer la ecuación siguiente

$$P_{ii, n} = p_{ii, n-1} q_{i, 1} + p_{ii, n-2} q_{i, 2} + \dots + p_{ii, 0} q_{i, n} = \sum p_{ii, n-k} q_{i, k}$$

Es decir, la probabilidad $P(\xi_n = i / \xi_{n-1} = i)$ en el paso n es igual a la probabilidad en el paso $n-1$ por la probabilidad de pasar de i a i en un paso, más la probabilidad en el paso $n-2$ por la probabilidad de pasar de i a i en dos pasos, ..., más la probabilidad en el paso cero (posición de partida) por la probabilidad de pasar de i a i en n pasos.

La expresión anterior representa un sistema de ecuaciones recurrentes (con i de 1 a n y n de 1 a n) que permite el cálculo de las probabilidades $q_{i, k}$.

7.2.3.5. Clasificación de estados

A partir de las definiciones anteriores podemos clasificar los estados de la cadena de Markov:

- Recurrente/transitorio: se dice que un estado i es recurrente si la probabilidad de que, partiendo de i , se vuelva al menos una vez a i es uno, es decir,

$$q_i = 1$$

si $q_i < 1$ se dice que el estado i es transitorio

- Periódico/aperiódico: se dice que un estado i es periódico de periodo $k > 1$ si es posible volver a i partiendo de i solamente para los pasos $2k, 3k, \dots$, siendo k el mayor entero con esta propiedad. Entonces se cumple que n no divisible por $k \rightarrow p_{ii}^n = 0$ cuando $k=1$ se dice que el estado es aperiódico.
- Estado nulo/no nulo: un estado recurrente ($q_i = 1$) es nulo si el periodo de retorno es infinito. Cuando el periodo de retorno es finito, el estado es no nulo.
- Estado ergódico: un estado es ergódico si es recurrente, no nulo y aperiódico. Es decir:

$$q_i = 1,$$

$$t_i < \infty$$

$$k = 1$$

entonces i es ergódico

7.2.3.6. Estados de una cadena irreductible

Todos los estados de una cadena irreductible son de la misma clase:

- Periódicos con periodo k constante o
- Recurrentes nulos ($q_i = 1$ y periodo de retorno t_i infinito) o
- Recurrentes no nulos ($q_i = 1$ y periodo de retorno t_i finito) o
- Ergódicos (recurrentes, no nulos y aperiódicos)
- Por ello, las cadenas de Markov irreductibles se denominan en cada caso periódicas, recurrentes nulas, recurrentes no nulas o ergódicas.

7.2.3.7. Teorema de ergodicidad

Si una cadena de Markov es ergódica, es decir:

$$q_i = 1$$

$$t_i < \infty$$

$$k = 1$$

entonces la sucesión de variables aleatorias tiene límite y éste es único, coincidiendo con la distribución estacionaria asociada al autovalor uno de la matriz de transición M .

El periodo de retorno de un estado i es igual al inverso del elemento i de la matriz columna X que define las probabilidades de la situación estacionaria $MX=X$.

7.3. Ejemplo

Supongamos un grupo de puentes clasificados según su estado de conservación en tres grandes grupos e inventariados en el año 2010 obteniéndose la siguiente proporción de cada uno de ellos:

Del 1º, 30%

Del 2º 20%

Del 3º 50%

Llamando calidad media de los puentes al cociente entre 1º y 2º entre 3º se obtiene una calidad de 50/50, es decir, $K_m=1.0$ que se considera insuficiente.

El grupo 1º está en perfecto estado. El 2º grupo, algo deteriorado pero solo superficialmente. El 3º tiene un deterioro generalizado pero no afecta a la seguridad estructural.

Para reparar un puente del grupo 2 es suficiente con unas operaciones que suponen 70 euros/m². Las reparaciones de un puente del grupo 3 requieren de 300 euros/m².

El paso del tiempo va deteriorando la estructura que al cabo de 2 años puede asegurarse, con la experiencia disponible que el 12% de los puentes que estaban en el grupo 1 decaen al grupo 2, y el 18% de los que estaban en el grupo 2 decae al grupo 3.

Se proponen distintas actuaciones para realizar de manera inmediata:

- Reparar el 26% de los puentes que estaban en el grupo 2 para que pasen al grupo 1.
- Reparar el 18% de los del grupo 3 para que pasen al grupo 1.

¿Cuál será el coste medio por metro cuadrado por puente durante el primer año y el coste límite cuando se alcance la situación estacionaria al cabo de los años?

¿Cuál será calidad media de los puentes en la situación estacionaria, con el paso de los años, siguiendo la política de inversiones descrita?

$$X_0 = \begin{pmatrix} 0.30 \\ 0.20 \\ 0.50 \end{pmatrix}$$

La matriz de transición por causas del deterioro natural (cuyas columnas nos indican las probabilidades que tiene cada estado de evolucionar) es la siguiente

$$M = \begin{pmatrix} 0.88 & 0 & 0 \\ 0.12 & 0.82 & 0 \\ 0 & 0.18 & 1 \end{pmatrix}$$

Considerando las actuaciones de mejora programadas se obtiene la matriz de transición siguiente:

$$M = \begin{pmatrix} 0.88 & 0.26 & 0.18 \\ 0.12 & 0.82 - 0.26 & 0 \\ 0 & 0.18 & 1 - 0.18 \end{pmatrix}$$

De acuerdo con el plan de conservación, el coste medio el primer año será:

$$C_m = 0.26 \times 0.20 \times 70 + 0.18 \times 0.50 \times 300 = 30.64 \text{ €/m}^2$$

El estado estacionario responde a la condición siguiente:

$$MX = X$$

$$\begin{pmatrix} 0.88 & 0.26 & 0.18 \\ 0.12 & 0.56 & 0 \\ 0 & 0.18 & 0.82 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{pmatrix}$$

O lo que es lo mismo:

$$-0.12X_1 + 0.26X_2 + 0.18X_3 = 0$$

$$0.12X_1 - 0.44X_2 = 0$$

$$0.18X_2 - 0.18X_3 = 0$$

Con la condición adicional por ser M una matriz estocástica:

$$X_1 + X_2 + X_3 = 1$$

Así se obtiene la siguiente distribución de estados:

$$X_1 = 0.650 = 13/20$$

$$X_2=0.175=3.5/20$$

$$X_3=0.175=3.5/20$$

Estas serían, por tanto, las proporciones de cada estado en la situación límite a la que llegaría el sistema teniendo en cuenta el deterioro natural y las inversiones de mejora programadas.

El coste medio sería:

$$C_m=0.26*0.175*70+0.18*0.175*300=12.63 \text{ €/m}^2$$

Es decir, la situación estacionaria presenta un coste medio de conservación por metro cuadrado un 41% inferior a la del estado inicial.

$$\text{Calidad media: } K_m= (13+3.5)/(3.5)= 4.71$$

Este valor es superior a la calidad media del estado inicial.

7.4.Otros usos actuales de las Cadenas de Markov

En el mundo del diseño de aerogeneradores, se utilizan las matrices de Markov para varias cosas, por ejemplo, el diseño a fatiga de los distintos componentes. Se trata de una matriz de dos dimensiones donde las columnas son rangos (amplitudes de cargas) y las filas valores medios; y dentro se almacena la cantidad tiempo (horas, minutos o segundos).

En la primera estimación que se hace se tiene en cuenta únicamente los rangos y el número de ciclos calculados mediante un proceso de Rainflow Cycle Counting habitual (el valor medio no se tiene en cuenta puesto que las correcciones de Goodman son difíciles de aplicar ya que se trabaja con fuerzas y momentos, pero no con tensiones). Para un cálculo más fino ya no se usa esta matriz de Markov sino que se trabaja directamente con las series temporales de los datos. Mediante un código tipo BLADED (software de simulación mediante aplicación de series temporales) se evalúan todas las situaciones más representativas del molino y, si ahora queremos estudiar solamente la torre, se hace un modelo de la torre y se aplican las fuerzas que se han calculado sobre la misma con BLADED.

FIGURAS

A continuación se indican todas las figuras por orden de aparición:

| | |
|--|----|
| <i>Figura 1. Superposición de la Pirámide del conocimiento de Ackoff.</i> | 6 |
| <i>Figura 2. Modelos reducidos pedagógicos (1950-1960) de Eduardo Torroja. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales. CEDEX.</i> | 11 |
| <i>Figura 3. Analogía entre control médico y control estructural.</i> | 12 |
| <i>Figura 4. Acelerómetro en losa inferior de tablero. Viaducto Arroyo Las Piedras (LAV Córdoba-Málaga).</i> | 18 |
| <i>Figura 5. Extensometría en pilote. Viaducto de Pujayo (APIA XXI, S.A.).</i> | 18 |
| <i>Figura 6. Medida del movimiento relativo tablero-estribo. (APIA XXI, S.A.)</i> | 19 |
| <i>Figura 7. Medida del movimiento relativo tablero-pila. (APIA XXI, S.A.)</i> | 19 |
| <i>Figura 8. Sistemas de Instrumentación SHM y MHM en algunos de los grandes puentes destacados a Nivel mundial.</i> | 27 |
| <i>Figura 9. Tipología de sensores.</i> | 28 |
| <i>Figura 10. Extracto de plano de Instrumentación del viaducto sobre el arroyo de las Piedras. Cortesía de Ineco-Tifsa.</i> | 42 |
| <i>Figura 11. Extracto de plano de Instrumentación del viaducto sobre el arroyo del Valle. Cortesía de Ineco-Tifsa.</i> | 43 |
| <i>Figura 12. Plano de Instrumentación del viaducto de Sanboi (mixto). Cortesía del CEDEX.</i> | 44 |
| <i>Figura 13. Plano de Instrumentación del viaducto de Sanboi (hormigón). Cortesía del CEDEX.</i> | 45 |
| <i>Figura 14. Vista aérea del viaducto, con el pueblo de Pujayo al fondo.</i> | 49 |
| <i>Figura 15. Esquema de Instrumentación.</i> | 50 |
| <i>Figura 16. Montaje de carros de avance sobre dovela 0.</i> | 51 |
| <i>Figura 17. Construcción de la T de la pila 2.</i> | 52 |
| <i>Figura 18. Clinómetros.</i> | 54 |
| <i>Figura 19. Giros en cabeza de pila 4 durante el hormigonado de la dovela 4 de la T de pila 4.</i> | 54 |
| <i>Figura 20. Construcción mediante avance en voladizo sobre Pila 12. Junio 2014.</i> | 56 |

| | |
|---|----|
| <i>Figura 21. Carro de izado. Izado de dovela 11 derecha sobre pila 13. Cortesía UTE Bahía de Cádiz y Kinesia Ingeniería.</i> | 59 |
| <i>Figura 22. Esquema de Instrumentación del carro de avance mediante células de carga. Cortesía UTE Bahía de Cádiz y Kinesia Ingeniería.</i> | 59 |
| <i>Figura 23. Inicio de montaje de dovela. Izado dovela 11 derecha sobre pila 13. Cortesía UTE Bahía de Cádiz y Kinesia Ingeniería.</i> | 60 |
| <i>Figura 24. Toma de carga 25%. Izado dovela 11 derecha sobre pila 13. Cortesía UTE Bahía de Cádiz y Kinesia Ingeniería.</i> | 60 |
| <i>Figura 25. Toma de carga 50%. Izado dovela 11 derecha sobre pila 13. Cortesía UTE Bahía de Cádiz y Kinesia Ingeniería.</i> | 61 |
| <i>Figura 26. Toma de carga 75%. Izado dovela 11 derecha sobre pila 13. Cortesía UTE Bahía de Cádiz y Kinesia Ingeniería.</i> | 61 |
| <i>Figura 27. Toma de carga 100%. Izado dovela 11 derecha sobre pila 13. Cortesía UTE Bahía de Cádiz y Kinesia Ingeniería.</i> | 62 |
| <i>Figura 28. Ripado a 1.57 m. Izado dovela 11 derecha sobre pila 13. Cortesía UTE Bahía de Cádiz y Kinesia Ingeniería.</i> | 62 |
| <i>Figura 29. Inicio ripado y colocación. Izado dovela 11 derecha sobre pila 13. Cortesía UTE Bahía de Cádiz y Kinesia Ingeniería.</i> | 63 |
| <i>Figura 30. Fin ripado y colocación. Izado dovela 11 derecha sobre pila 13. Cortesía UTE Bahía de Cádiz y Kinesia Ingeniería.</i> | 63 |
| <i>Figura 31. Selección de 100 viaductos pertenecientes a ADIF para seguimiento discontinuo (APIA XXI, S.A.)</i> | 65 |
| <i>Figura 32. Monitor de fisuras en pila 4 del Viaducto Barranco del Chaparral (LAV Madrid-Zaragoza).</i> | 66 |
| <i>Figura 33. Medida del movimiento tablero-estribo en Viaducto Anchuelo II (LAV Madrid-Zaragoza).</i> | 67 |
| <i>Figura 34. Medida de la temperatura en alma de sección cajón del Viaducto río Huerva (LAV Madrid-Zaragoza).</i> | 68 |
| <i>Figura 35. Monitor para el control del movimiento tablero-pila en Viaducto río Huerva (LAV Madrid-Zaragoza).</i> | 69 |
| <i>Figura 36. Control de la verticalidad de las pilas mediante topografía en Viaducto de Anchuelo I (LAV Madrid-Zaragoza).</i> | 70 |

| | |
|---|-----|
| <i>Figura 37. Referencias para el control geométrico de la aguja y contraguja en el aparato de dilatación de vía del Viaducto río Huerva (LAV Madrid-Zaragoza).</i> | 71 |
| <i>Figura 38. Aparato de dilatación de vía en estado de máxima capacidad. Viaducto río Guadalquivir (LAV Córdoba-Málaga).</i> | 71 |
| <i>Figura 39. Procesos.</i> | 78 |
| <i>Figura 40. Aspecto general de un Diagrama de Control.</i> | 81 |
| <i>Figura 41. Capacidad y centrado. LCL, Límite Inferior; UCL, Límite Superior.</i> | 81 |
| <i>Figura 42. Vista de la pila inclinada desde el Estribo 1.</i> | 97 |
| <i>Figura 43. Croquis de la pila inclinada desde el Estribo 1. Cortesía de Ineco.</i> | 97 |
| <i>Figura 44. Esquema de Instrumentación. Cortesía de Ineco.</i> | 98 |
| <i>Figura 45. Localización de Instrumentación. Cortesía de Ineco.</i> | 99 |
| <i>Figura 46. Aspecto del cauce aguas arriba del puente. Foto tomada por Apia XXI IMC 17/05/2013.</i> | 100 |
| <i>Figura 47. Aspecto del cauce aguas arriba del puente. Foto tomada por Apia XXI IMC el 21/09/2013.</i> | 100 |
| <i>Figura 48. Nivel aproximado mínimo y máximo. Foto tomada por Apia XXI IMC los días 17/05/2013 y 21/09/2013.</i> | 101 |
| <i>Figura 49. Flujo del río aguas abajo de la pila nº5. Foto tomada por Apia XXI IMC el 17/05/2013.</i> | 102 |
| <i>Figura 50. Turbulencias desarrolladas aguas abajo de la pila nº5. Foto tomada por Apia XXI IMC el 21/09/2013.</i> | 102 |
| <i>Figura 51. Giro longitudinal aguas abajo.</i> | 103 |
| <i>Figura 52. Giro transversal aguas abajo.</i> | 104 |
| <i>Figura 53. Giro longitudinal aguas arriba.</i> | 105 |
| <i>Figura 54. Giro transversal aguas arriba.</i> | 106 |
| <i>Figura 55. Registros CC31_max, CC31_mean, CC31_min.</i> | 107 |
| <i>Figura 56. Diagrama X. CC31_max. Capacidad del Proceso (C)=1.</i> | 108 |
| <i>Figura 57. Diagrama R. CC31_max. Capacidad del Proceso (C)=1.</i> | 108 |
| <i>Figura 58. Diagrama X. CC31_min. Capacidad del Proceso (C)=1.</i> | 109 |
| <i>Figura 59. Diagrama R. CC31_min. Capacidad del Proceso (C)=1.</i> | 109 |
| <i>Figura 60. Registros CC32_max, CC32_mean, CC32_min.</i> | 110 |
| <i>Figura 61. Diagrama X. CC32_max. Capacidad del Proceso (C)=1.</i> | 110 |
| <i>Figura 62. Diagrama R. CC32_max. Capacidad del Proceso (C)=1.</i> | 111 |

| | |
|--|-----|
| <i>Figura 63. Diagrama X. CC32_min. Capacidad del Proceso (C)=1.</i> | 111 |
| <i>Figura 64. Diagrama R. CC32_min. Capacidad del Proceso (C)=1.</i> | 112 |
| <i>Figura 65. Registros CC33_max, CC33_mean, CC33_min.</i> | 113 |
| <i>Figura 66. Diagrama X. CC33_max. Capacidad del Proceso (C)=1.</i> | 113 |
| <i>Figura 67. Diagrama R. CC33_max. Capacidad del Proceso (C)=1.</i> | 114 |
| <i>Figura 68. Diagrama X. CC31_min. Capacidad del Proceso (C)=1.</i> | 114 |
| <i>Figura 69. Diagrama X. CC33_min. Capacidad del Proceso (C)=1.</i> | 115 |
| <i>Figura 70. Registros CC34_max, CC34_mean, CC34_min.</i> | 116 |
| <i>Figura 71. Diagrama X. CC34_max. Capacidad del Proceso (C)=1.</i> | 116 |
| <i>Figura 72. Diagrama R. CC34_max. Capacidad del Proceso (C)=1.</i> | 117 |
| <i>Figura 73. Diagrama X. CC34_min. Capacidad del Proceso (C)=1.</i> | 117 |
| <i>Figura 74. Diagrama R. CC34_min. Capacidad del Proceso (C)=1.</i> | 118 |
| <i>Figura 75. Diagrama X. CC32_mean. Capacidad del Proceso (C)=1.</i> | 118 |
| <i>Figura 76. Diagrama X. CC32_mean. Capacidad del Proceso (C)=1.</i> | 119 |
| <i>Figura 77. Intervalo de predicción CC32_mean.</i> | 119 |
| <i>Figura 78. Diagrama R. CC34_mean. Capacidad del Proceso (C)=1.</i> | 120 |
| <i>Figura 79. Diagrama X. CC34_mean. Capacidad del Proceso (C)=1.</i> | 120 |
| <i>Figura 80. Intervalo de predicción CC34_mean.</i> | 121 |
| <i>Figura 81. Aspecto del vano central y pila 4 del Puente Beltrán. Foto tomada por Apia XXI IMC.</i> | 124 |
| <i>Figura 82. Detalle de anclaje de fibra óptica y caja de conexiones en tablero. Cortesía de Ineco.</i> | 127 |
| <i>Figura 83. Detalle de acelerómetros. Cortesía de Ineco.</i> | 127 |
| <i>Figura 84. Esquema de Instrumentación Puente Beltrán. Cortesía de Ineco.</i> | 128 |
| <i>Figura 85. Aspecto general del modelo de cálculo 3D realizado del Puente Beltrán.</i> | 129 |
| <i>Figura 86. Modelización de los aparatos de apoyo tipo POT en pilas 2 y 3.</i> | 130 |
| <i>Figura 87. Modelización del cajón del tablero y estribo 1.</i> | 131 |
| <i>Figura 88. Modelización del tablero y pila 4 de sección variable. Empotramiento tablero-pila 4.</i> | 131 |
| <i>Figura 89. Momentos flectores teóricos según eje Y por peso propio y cargas muertas.</i> | 132 |
| <i>Figura 90. Evolución de los momentos flectores longitudinales en las secciones 2, 5 y 7 desde agosto de 2012 a agosto de 2013 para la calibración del modelo.</i> | 133 |

| | |
|--|-----|
| <i>Figura 91. Registro mensual de valores diezminutales del giro en cabeza de pila 4 durante el mes de agosto de 2012. Valores máximos (negro), medios (rojo) y mínimos (verde).</i> | 136 |
| <i>Figura 92. Análisis diario (18 de junio 2013) de valores diezminutales del giro en cabeza de pila 4. Valores máximos (negro), medios (rojo) y mínimos (verde).</i> | 137 |
| <i>Figura 93. Análisis diario (18 de junio 2013) de valores diezminutales del giro en cabeza de pila 4. Función de Autocorrelación.</i> | 137 |
| <i>Figura 94. Estimación de la evolución del punto fijo real. THL1 y THL8 desde agosto de 2012 a agosto de 2013.</i> | 139 |
| <i>Figura 95. Estimación de la evolución del punto fijo real. THL3 y THL8 desde agosto de 2012 a agosto de 2013.</i> | 140 |
| <i>Figura 96. Estimación de la evolución del punto fijo real del puente en función de THL4 y THL8 desde agosto de 2012 a agosto de 2013.</i> | 141 |
| <i>Figura 97. Diagrama de funcionamiento de un aparato de apoyo deslizante sometido a un ciclo térmico de tipo diario. (Fuerza-Deslizamiento).</i> | 144 |
| <i>Figura 98. Estimación del coeficiente de deslizamiento (<5%). Aparato de apoyo sobre pila 2 desde agosto de 2012 a agosto de 2013.</i> | 147 |
| <i>Figura 99. Estimación del coeficiente de deslizamiento (<5%). Aparato de apoyo sobre pila 3 desde agosto de 2012 a agosto de 2013.</i> | 148 |
| <i>Figura 100. Cálculo del Diagrama de Control estadístico “R” y “X” de los movimientos relativos longitudinales tablero-estribo1. Análisis Mensual.</i> | 150 |
| <i>Figura 101. Diagrama de Control estadístico “X” de los movimientos relativos longitudinales máximos tablero-estribo1. Análisis Mensual.</i> | 150 |
| <i>Figura 102. Valores del movimiento relativo tablero-estribo 1 y superposición de la tendencia de periodo anual debida a temperatura.</i> | 151 |
| <i>Figura 103. Valores del movimiento relativo tablero-estribo 1 filtrados descontando el efecto de la oscilación de la temperatura de periodo anual.</i> | 152 |
| <i>Figura 104. Diagramas de Control estadístico de calidad del Rango de los movimientos relativos longitudinales tablero-estribo1. C=1.</i> | 152 |
| <i>Figura 105. Diagramas de Control estadístico de calidad del Valor Medio de los movimientos relativos longitudinales tablero-estribo1. C=1.</i> | 153 |
| <i>Figura 106. Valores del movimiento relativo tablero-pila 2 y superposición de la tendencia de periodo anual debida a temperatura.</i> | 154 |

| | |
|---|-----|
| <i>Figura 107. Valores del movimiento relativo tablero-pila 2 filtrados descontando el efecto de la oscilación de la temperatura de periodo anual.</i> | 155 |
| <i>Figura 108. Diagramas de Control estadístico de calidad del Rango de los movimientos relativos longitudinales tablero-pila 2. C=1.....</i> | 155 |
| <i>Figura 109. Diagramas de Control estadístico de calidad del Valor Medio de los movimientos relativos longitudinales (mm) tablero-pila 2. C=1.....</i> | 156 |
| <i>Figura 110. Valores del movimiento relativo tablero-pila 3 y superposición de la tendencia de periodo anual debida a temperatura.</i> | 157 |
| <i>Figura 111. Valores del movimiento relativo tablero-pila 3 filtrados descontando el efecto de la oscilación de la temperatura de periodo anual.</i> | 158 |
| <i>Figura 112. Diagramas de Control estadístico de calidad del Rango de los movimientos relativos longitudinales tablero-pila 3. C=1.....</i> | 158 |
| <i>Figura 113. Diagramas de Control estadístico de calidad del Valor Medio de los movimientos relativos longitudinales (mm) tablero-pila 3. C=1.....</i> | 159 |
| <i>Figura 114. Valores del movimiento relativo tablero-estribo 2 y superposición de la tendencia de periodo anual debida a temperatura.</i> | 160 |
| <i>Figura 115. Valores del movimiento relativo tablero-estribo 2 filtrados descontando el efecto de la oscilación de la temperatura de periodo anual.</i> | 161 |
| <i>Figura 116. Diagramas de Control estadístico de calidad del Rango de los movimientos relativos longitudinales (mm) tablero-estribo 2. C=1.....</i> | 161 |
| <i>Figura 117. Diagramas de Control estadístico de calidad del Valor Medio de los movimientos relativos longitudinales (mm) tablero-estribo 2. C=1.....</i> | 162 |
| <i>Figura 118. Aspecto de la banda de predicción calculada para el caso de THL1 mean en función de THL3mean. $\alpha = 10\%$ $R > 85\%$.....</i> | 163 |
| <i>Figura 119. Aspecto de la banda de predicción calculada para el caso de THL1 mean en función de THL4mean. $\alpha = 10\%$ $R \approx 80\%$.....</i> | 164 |
| <i>Figura 120. Aspecto de la banda de predicción calculada para el caso de THL8 mean en función de THL4mean. $\alpha = 10\%$ $R < 80\%$.....</i> | 165 |
| <i>Figura 121. Aspecto de la banda de predicción calculada para el caso de THL3 mean en función de THL4mean. $\alpha = 10\%$ $R > 85\%$.</i> | 166 |
| <i>Figura 122. Aspecto de la banda de predicción calculada para el caso de THL1mean en función de THL8 mean. $\alpha = 90\%$ $R \approx 80\%$.</i> | 167 |

| | |
|---|-----|
| <i>Figura 123. Aspecto de la banda de predicción calculada para el caso de THL8mean en función de THL3 mean. $\alpha = 95\%$ $R < 80\%$.</i> | 168 |
| <i>Figura 124. Matriz de Coeficientes de Correlación en los transductores de desplazamiento.</i> | 168 |
| <i>Figura 125. Dianas para el control del movimiento relativo tablero-estribo.</i> | 171 |
| <i>Figura 126. Dianas para el control del movimiento relativo tablero-estribo. Viaducto Río Aguas. APIA XXI, S.A.</i> | 172 |
| <i>Figura 127. Regleta para el control del desplazamiento relativo tablero-pila.</i> | 173 |
| <i>Figura 128. Regleta para el control del desplazamiento relativo tablero-pila. Viaducto sobre río Huerva. APIA XXI, S.A.</i> | 174 |
| <i>Figura 129. Reporte tipo sobre el estado físico de una estructura. Dirección General Adjunta de Supervisión Física de Autopistas.</i> | 195 |
| <i>Figura 130. Apartado 1 de ficha F-003. Datos generales.</i> | 196 |
| <i>Figura 131. Apartado 2 de ficha F-003. Condición general del Puente.</i> | 197 |
| <i>Figura 132. Apartado 3 de ficha F-003. Superficie de rodamiento.</i> | 197 |
| <i>Figura 133. Apartado 4 de ficha F-003. Superestructura de hormigón (I de II)</i> | 198 |
| <i>Figura 134. Apartado 4 de ficha F-003. Superestructura de hormigón (II de II). En azul se ha remarcado la valoración realizada al estado de conservación de los aparatos de apoyo.</i> | 199 |
| <i>Figura 135. Apartado 5 de ficha F-003. Subestructura de hormigón.</i> | 200 |
| <i>Figura 136. Apartado 6 de ficha F-003. Puente de acero.</i> | 201 |
| <i>Figura 137. Apartado 7 de ficha F-003. Puentes de hormigón presforzado.</i> | 202 |
| <i>Figura 138. Apartado 8 de ficha F-001. Calificación general del Puente. En azul se ha remarcado la valoración realizada al estado de conservación de los aparatos de apoyo.</i> | 203 |
| <i>Figura 139. Apartado 9 de ficha F-003. Recomendaciones generales.</i> | 203 |
| <i>Figura 140. Apartado 10 de ficha F-003. Fotografías de inspección.</i> | 204 |
| <i>Figura 141. Tabla de índices de gravedad parciales.</i> | 206 |
| <i>Figura 142. Tabla de índices de pesos.</i> | 206 |
| <i>Figura 143. Ejemplo de ficha para control de movimientos en aparatos de apoyo incluyendo las Bandas de Predicción.</i> | 208 |
| <i>Figura 144. Niveles en un Sistema de Gestión de Infraestructuras.</i> | 211 |

| | |
|--|-----|
| <i>Figura 145. Procedimiento general para análisis de datos en un Sistema de Gestión de Puentes.</i> | 213 |
| <i>Figura 146. Gateway Bridge (Australia). Vano principal de 260 m.</i> | 249 |
| <i>Figura 147. Viaducto de Vilvoorde (Bélgica). Vano principal de 160 m.</i> | 249 |
| <i>Figura 148. Viaducto de Peace (Canada, 1927). Combinación de arcos inferiores y un vano tipo arco superior de sección metálica. Longitud total de 1768 m.</i> | 250 |
| <i>Figura 149. Puente de Champlain (Canada, 1962). Vanos principales metálicos tipo cantilever. Longitud total de 7412 m.</i> | 250 |
| <i>Figura 150. Great Belt East Bridge (Dinamarca). Vano colgante principal de 1624 m y sección de tablero tipo cajón metálico.</i> | 251 |
| <i>Figura 151. Millau Viaduct (Francia). Puente de vanos atirantados de 342 m de longitud máxima y sección de tablero tipo cajón metálico.</i> | 251 |
| <i>Figura 152. Harilaos-Trikoupis (Grecia). El puente principal tiene cinco vanos atirantados de 560 m de longitud máxima.</i> | 252 |
| <i>Figura 153. Akashi-Kaikyo (Japón). Puente metálico colgante de 3911 m con vano central de 1991 m y vanos laterales de 960 m.</i> | 252 |
| <i>Figura 154. Alvsborg Bron Bridge (Suecia). Puente colgante con vano principal de 417 m y tablero de sección celosía metálica. Construido en 1966.</i> | 253 |
| <i>Figura 155. Varina-Enon Bridge (EE.UU). Puente atirantado con tablero tipo cajón y 192 m de longitud de vano central.</i> | 253 |
| <i>Figura 156. Instrumentos de medición de desplazamientos colocados en vía de estrecho métrico en La Cavada (Cantabria).</i> | 258 |
| <i>Figura 157. Boya III. Final del proceso de izado. APIA XXI, S.A.</i> | 259 |
| <i>Figura 158. Boya III. Boya en posición abatida en dique. Anemómetros en distintas secciones. APIA XXI, S.A.</i> | 260 |
| <i>Figura 159. Mástiles de experimentación para el estudio de la influencia del movimiento en las lecturas de los anemómetros de cazoletas y ultrasónicos. APIA XXI, S.A.</i> | 261 |
| <i>Figura 160. Desarrollo de ensayos en tanque de olas. Control de tensiones con células de carga para el estudio de fuerzas en tirantes durante el proceso de transporte. APIA XXI, S.A.</i> | 262 |
| <i>Figura 161. Desarrollo de ensayos en túnel de viento ACLA-16 del IDR (Instituto Universitario de Microgravedad Ignacio da Riva, Madrid). APIA XXI, S.A.</i> | 263 |

| | |
|--|-----|
| <i>Figura 162. Modo 1: 0.13 Hz</i> | 266 |
| <i>Figura 163. Modo 2: 0.18 Hz</i> | 266 |
| <i>Figura 164. Modo 3: 0.56 Hz</i> | 266 |
| <i>Figura 165. Modo 4: 1.00 Hz</i> | 267 |
| <i>Figura 166. Modo 5: 1.17 Hz</i> | 267 |
| <i>Figura 167. Modo 6: 1.36 Hz</i> | 267 |
| <i>Figura 168. Modo 7: 1.45 Hz</i> | 268 |
| <i>Figura 169. Modo 10: 2.18 Hz</i> | 268 |
| <i>Figura 170. Modo 12: 2.40 Hz</i> | 268 |
| <i>Figura 171. Modo 27: 7.69 Hz</i> | 269 |
| <i>Figura 172. Registro de aceleraciones para un día tipo del mes de noviembre 2012.</i> | 270 |
| <i>Figura 173. Registro de aceleraciones para un día tipo del mes de enero 2013.</i> | 271 |
| <i>Figura 174. Registro de aceleraciones para un día tipo del mes de febrero 2013.</i> | 272 |
| <i>Figura 175. Registro de aceleraciones para un día tipo del mes de marzo 2013.</i> | 273 |
| <i>Figura 176. Registro de aceleraciones para un día tipo del mes de abril 2013.</i> | 274 |
| <i>Figura 177. Registro de aceleraciones para un día tipo del mes de mayo 2013.</i> | 275 |
| <i>Figura 178. Registro de aceleraciones para un día tipo del mes de junio 2013.</i> | 276 |
| <i>Figura 179. Registro de aceleraciones para un día tipo del mes de agosto 2013.</i> | 277 |
| <i>Figura 180. Registro de aceleraciones durante el mes de junio 2013.</i> | 279 |
| <i>Figura 181. Registro de aceleraciones durante el mes de junio 2013.</i> | 279 |
| <i>Figura 182. Evolución del coeficiente de amortiguamiento en los vanos 3 y 4.</i> | 281 |
| <i>Figura 183. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV6 en vano 3 al paso de una circulación real tipo. Noviembre 2012.</i> | 282 |
| <i>Figura 184. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV6 en vano 3 al paso de una circulación real tipo. Enero 2013.</i> | 283 |
| <i>Figura 185. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV6 en vano 3 al paso de una circulación real tipo. Febrero 2013.</i> | 284 |
| <i>Figura 186. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV6 en vano 3 al paso de una circulación real tipo. Marzo 2013.</i> | 285 |
| <i>Figura 187. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV6 en vano 3 al paso de una circulación real tipo. Abril 2013.</i> | 286 |
| <i>Figura 188. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV6 en vano 3 al paso de una circulación real tipo. Mayo 2013.</i> | 287 |

| | |
|--|-----|
| <i>Figura 189. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV6 en vano 3 al paso de una circulación real tipo. Junio 2013.</i> | 288 |
| <i>Figura 190. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV6 en vano 3 al paso de una circulación real tipo. Julio 2013.</i> | 289 |
| <i>Figura 191. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV6 en vano 3 al paso de una circulación real tipo. Agosto 2013.</i> | 290 |
| <i>Figura 192. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV7 en vano 4 al paso de una circulación real tipo. Noviembre 2012.</i> | 291 |
| <i>Figura 193. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV7 en vano 4 al paso de una circulación real tipo. Enero 2013.</i> | 292 |
| <i>Figura 194. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV7 en vano 4 al paso de una circulación real tipo. Febrero 2013.</i> | 293 |
| <i>Figura 195. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV7 en vano 4 al paso de una circulación real tipo. Marzo 2013.</i> | 294 |
| <i>Figura 196. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV7 en vano 4 al paso de una circulación real tipo. Abril 2013.</i> | 295 |
| <i>Figura 197. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV7 en vano 4 al paso de una circulación real tipo. Mayo 2013.</i> | 296 |
| <i>Figura 198. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV7 en vano 4 al paso de una circulación real tipo. Junio 2013.</i> | 297 |
| <i>Figura 199. Análisis de amortiguamiento para el registro del acelerómetro vertical AV7 en vano 4 al paso de una circulación real tipo. Julio 2013.</i> | 298 |
| <i>Figura 200. Diagrama de Control del Rango de las aceleraciones máximas verticales en vano 4. Lado derecho.</i> | 300 |
| <i>Figura 201. Diagrama de Control del Valor Medio de las aceleraciones máximas verticales en vano 4. Lado derecho.</i> | 300 |
| <i>Figura 202. Diagrama de Control del Rango de las aceleraciones verticales mínimas en vano 4. Lado derecho.</i> | 301 |
| <i>Figura 203. Diagrama de Control del Valor Medio de las aceleraciones verticales mínimas en vano 4. Lado derecho.</i> | 301 |
| <i>Figura 204. Diagrama de Control del Rango de las aceleraciones máximas verticales en vano 4. Lado izquierdo.</i> | 302 |

Figura 205. Diagrama de Control del Valor Medio de las aceleraciones máximas verticales en vano 4. Lado izquierdo. 302

Figura 206. Diagrama de Control del Rango de las aceleraciones mínimas verticales en vano 4. Lado izquierdo. 303

Figura 207. Diagrama de Control del Valor Medio de las aceleraciones mínimas verticales en vano 4. Lado derecho. 303

Figura 208. Diagrama de Control del Rango de las aceleraciones máximas verticales en vano 5. Lado izquierdo..... 304

Figura 209. Diagrama de Control del Valor Medio de las aceleraciones máximas verticales en vano 5. Lado izquierdo. 304

Figura 210. Diagrama de Control del Rango de las aceleraciones mínimas verticales en vano 5. Lado izquierdo. 305

Figura 211. Diagrama de Control del Valor Medio de las aceleraciones mínimas verticales en vano 5. Lado izquierdo. 305

Figura 212. Diagrama de Control del Rango de las aceleraciones máximas verticales en vano 5. Lado derecho..... 306

Figura 213. Diagrama de Control del Valor Medio de las aceleraciones máximas verticales en vano 5. Lado derecho. 306

Figura 214. Diagrama de Control del Rango de las aceleraciones mínimas verticales en vano 5. Lado derecho..... 307

Figura 215. Diagrama de Control del Valor Medio de las aceleraciones mínimas verticales en vano 5. Lado derecho. 307

REFERENCIAS

A continuación se indican todas las referencias por orden alfabético. La nomenclatura de las mismas se ha realizado con las iniciales de los apellidos de los autores entre []; si las iniciales se repiten se añade la inicial del nombre en el primero de ellos. En el caso de monografías editadas por organismos, las iniciales se corresponden con el título de la publicación, como si de un acrónimo se tratase.

[ACGP] **Aktan A.E., Catbas F.N., Grimmelman K.A., Pervizpour M.:** *Development of a health monitoring guide for major bridges*. Federal Highway Administration Research and Development. Drexel Intelligent Infrastructure and Transportation Safety Institute. July 2003.

[BP] **Bendat J., Piersol A.:** *Random Data. Analysis and Measurement Procedures*. John Wiley & Sons Ltd. ISBN: 0-471-04000-2. 1986.

[CDRGA] **Casas J.R., Diaz-Carrillo S., Ramos G., Guemes J.A., Aparicio A.C.:** *Instrumentación avanzada de estructuras reparadas con materiales compuestos*. Hormigón y acero Nº 227, pp 27-37. 1er Trimestre 2003.

[CFL] **Chang P., Flatau A., Liu S.C.:** *Health monitoring of civil infraestructura*. Structural Health Monitoring Sage Publications. Vol 2 (3), pp 257-267. 2003.

[CG] **Casas J.R., Gettu R.:** *Estudio experimental sobre la Instrumentación continua y a largo plazo de estructuras*. Hormigón y acero. Nº 233, pp 37-45. 3er Trimestre 2004.

[CQLBS] **Carrión F., Quintana J., López J., Balakin A., Samayoa D.:** *Metodologías de Inspección no destructiva aplicables a los Sistemas de Gestión de Puentes, México*. SCT 2006.

[DLC] **Dewolf J., Lauon R., Culmo M.:** *Monitoring bridge performance*. Structural Health Monitoring Sage Publications. Vol 1 (2), pp 129-138. 2002.

[F] **Farhey D.N.:** *Bridge Instrumentation and monitoring for structural diagnostics*. Structural Health Monitoring Sage Publications. Vol 4 (4), pp 301-318. 2005.

[GI] **Glisic B., Inaudi D.:** *Fiber optic methods for Structural Health Monitoring*. John Wiley & Sons Ltd. ISBN: 978-0-470-06142-8. October 2007.

[GIBS] **Del Grosso A., Inaudi D., Bergmeister K., Santa U.:** *Monitoring of Bridges and Concrete Structures with Fibre Optic Sensors in Europe*. IABSE Conference on Cable Supported Bridges. Seoul, June 2001.

[GIS] **Glisic B., Inaudi D., Casanova N.:** *SHM process-lessons learned in 250 SHM Projects*. 4th International Conference on Structural Health Monitoring on Intelligent Infrastructure (SHMII-4). Zurich 2009.

[HH] **Hashemian H.M.:** *Aging management of instrumentation & control sensors in nuclear power plants*. Nuclear Engineering and Design, Vol 240, pp 3781-3790. 2010.

[HHM] **Hashemian H.M.:** *On-line monitoring applications in nuclear power plants*. Progress in Nuclear Energy, Vol 53, pp 167-181. 2011.

[I] **Inaudi D.:** *Overview of 40 Bridge Structural Health Monitoring Projects*. International Bridge Conference, IBC 2010. Pittsburgh, USA 2010.

[IB] *Instrumentation of bridges. Application note*. Encardio Rite. July 2000.

[ICV] **Inaudi D., Casanova N, Vurpillot S.:** *Bridge deformation monitoring with fiber optic sensors*. IABSE Symposium. Rio de Janeiro, 1999.

[IPF] *Instrucción relativa a las acciones a considerar en el proyecto de puentes de ferrocarril*. MOPU. 1975.

[IPGMG] **Inaudi D., Posenato D., Glisic B., Miller J., Graver T.:** *Combined static and dynamic monitoring of civil structures with long-gauge fiber optic sensors*. 23rd International Modal Analysis Conference (IMAC XXIII). Orlando, Florida, USA, 2005.

[KKY] **Kim D., Kim J., Yoon J.G.:** *The Han-Online Bridge Safety monitoring system and an approach to better bridge maintenance*. Proceedings of the 3rd International Conference on Structural Health Monitoring & Intelligent Infrastructure: Structural Health Monitoring & Intelligent Infrastructure 2007.

[KR] **Keller E., Ray A.:** *Real time health monitoring of mechanical structures*. Structural Health Monitoring Sage Publications. Vol 2 (3), pp 191-203. 2003.

[LG] **Leon J.:** *Reflexiones en torno a la inspección de puentes*. Jornadas sobre la vida de los puentes. pp 679-708. San Sebastián 2005.

[LR] **Lopez L.:** *La gestión del mantenimiento de puentes en la red convencional de ADIF*. Jornadas sobre la vida de los puentes. pp 619-646. San Sebastián 2005.

[LRQC] **Lopez-Higuera J.M., Rodriguez L., Quintela A., Cobo A.:** *Fiber Optic Sensors in Structural Health Monitoring*. Journal of Lightwave Technology, Vol 29, N° 4, pp 587-611. February 2011.

[M] **Mufti A.:** *Structural health monitoring of innovative Canadian civil engineering structures*. Structural Health Monitoring Sage Publications. Vol 1 (1), pp 89-103. 2005.

[MBE] **AASHTO:** *The Manual for Bridge Evaluation*. Washington 2011.

[ML] **Moreno V.:** *El Sistema de Gestión de Puentes de Sevilla*. Jornadas sobre la vida de los puentes. pp 665-677. San Sebastián 2005.

[MUB] **Matthews S.L., Ueda T., Bigaj-van Vliet A.J.:** *fib Model Code 2010-Chapter 9: Conservation of Concrete Structures*. 3rd fib International Congress. Washington 2010.

[MW] **Marianos W.N.:** *George Shattuck Morison and the development of Bridge Engineering*. Journal of Bridge Engineering, pp 291-298. May-June 2008.

[NMACR] **Navareno A., Menendez A.B., Arias G., Criado E., Ramirez M.L.:** *Compendio de las actuaciones de la Gestión de estructuras en el Ministerio de Fomento (2006-2010)*. V Congreso de ACHE. Barcelona 2011.

[OF] **Ortega L.M., Floriano M.:** *Monitorizaciones estructurales: Un traje a medida*. III Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras. Las estructuras del siglo XXI: Sostenibilidad, innovación y retos del futuro. Vol II, pp 781-793. Zaragoza 2005.

[PL] **Pardo J.E.:** *Ejemplos de intervención en puentes existentes en la red autonómica de Galicia*. Jornadas sobre la vida de los puentes. pp 709-728. San Sebastián 2005.

[PROCN] **Pantaleon M.J., Revilla R., Olazabal P., Cembrero P.:** *Viaducto de Las Navas*. II Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras. Vol 3, pp 1483-1491. Madrid 2002.

[RAB] **Roberts C.L., Arrellaga J.A., Breen J.E.:** *Instrumentation of segmental box girder bridges and multipiece winged boxes. Preliminary instrumentation plan*. Center

for transportation research bureau of engineering research. University of Texas. Austin. 1991.

[RG] **Rodríguez, F.:** *Problemas de vibraciones en estructuras*. Monografía de Estructuras y Edificación (E-8). ACHE. Madrid 2001.

[RGM] **Ripoll J.:** *Anclajes al terreno instrumentados*. V Congreso de ACHE. Barcelona 2011.

[RP] **Ray A., Patankar, R.:** *Fatigue crack growth under variable amplitude loading: parts I and II*. Applied Mathematical Modelling. pp 979-1013. 2001.

[SM] *Dutch high-speed railway line track monitoring awarded to SMARTEC SA*. The Monitor. March 2008.

[SMA] *Tanker ship hull structural monitoring with SMARTEC'S fiber optic solution*. The Monitor. March 2008.

[SMKOF] **Sumitro S., Matsui Y., Kono M., Okamoto T., Fujii K.:** *Long span bridge health monitoring system in Japan*. Health monitoring and management of civil Infraestructure systems 2001.

[SRS] **Stratt R. S.:** *Bridge Management. A System Approach for Decision Making*. Belgium 2010.

[ST] **Simon-Talero J.M.:** *Los Sistemas de Gestión de Puentes ¿Una necesidad?, ¿Una ayuda? o ... ¿Una moda?*. II Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras. Vol 2, pp 1077-1090. Madrid 2002.

[T] **Takeda, N.:** *Structural health monitoring towards development of smart materials and structures*. Japan Society of Mechanical Engineering, 101 (959), pp 26-29. 1998.

[TM] **Torroja E.:** *Razón y ser de los tipos estructurales*. Textos Universitarios. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja". Madrid 1998.

[TPBSCL] **Torres B., Paya I., Bueno A., Sales S., Calderon P., Lopez-Tola R.M.:** *Aplicaciones de sensores de fibra óptica desarrollados por la U.P.V. para la medida de deformaciones y temperaturas en estructuras*. V Congreso de ACHE. Barcelona 2011.

[Z] **Zwicky D.:** *SIA 269/2 – A new Swiss Code for the Conservation of Concrete Structures*. 3rd fib International Congress. Washington 2010.

[ZZ] **Zufiria I.:** *La gestión de las obras de fábrica en la red foral de la Diputación foral de Guipúzcoa*. Jornadas sobre la vida de los puentes. pp 648-663. San Sebastián 2005.

BIBLIOGRAFÍA

A continuación se indica la bibliografía consultada por orden alfabético del autor:

[A] **Ayala J.:** *Instrumentación total del Puente Ting Kau (Hong Kong)*. Obras Públicas OP N° 44, pp 76-81. 1998.

[AB] **Adao-da-Fonseca A., Bastos R.:** *The Infante Dom Henrique Bridge over the river Douro: Construction method, monitoring equipment and structural control*. pp 25-60.

[ACAA] **Akyilmaz O., Celik R.N., Apaydm N., Ayan T.:** *GPS monitoring of the Fatih Sultan Mehmet suspension bridge by using assessment methods of neural networks*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 34.

[ACS] **Arenas J.J., Capellan G., Sacristan M.:** *Puente atirantado de acceso al Parque Científico y Tecnológico de Cantabria, Santander*. IV Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras. Valencia 2008.

[AF] **Andreu F.J.:** *Los sensores de fibra óptica y la medida de deformaciones*. Operatividad de la Instrumentación en aguas subterráneas, suelos contaminados y riesgos geológicos, pp 255- 258. IGME. Madrid 2003

[AG] **Arenas G.F.:** *Desarrollo de sensores de fibra óptica: aplicación de un interferómetro Fizeau al estudio de polímeros*. Tesis Doctoral. Universidad Nacional del Mar de Plata. Facultad de Ingeniería. Mar de Plata, Argentina 2009.

[AGCS] **Arenas J.J, Garcia P., Capellan G., Sacristan M.:** *Puente atirantado Puerta de las Rozas sobre la A-6, Madrid*. IV Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras. Valencia 2008.

[AHB] **Arias G., de Balanzo F.:** *Consecuencias de la realización de inspecciones ordinarias en las estructuras del Ayuntamiento de Barcelona*. V Congreso de ACHE. Barcelona 2011.

[ALE] **Avendano L.E.:** *Fundamentos de Instrumentación*. Universidad Tecnológica de Pereira.

[ALML] **Alvarez J.J., Lorente G., Martinez J., Ladron De Guevara G.:** *Empuje del Viaducto del Estrecho de Paredes*. V Congreso de ACHE. Barcelona 2011.

[AMMSBF] **Astiz M.A., Manterola J., Munoz-Rojas J., Santos A., Blanco L., Fernandez S.:** *Cable-stayed bridge across the river Suir in Waterford (Ireland)*. 3rd fib International Congress. Washington 2010.

[AMOR] **Aguilo M., Manterola J., Onzain M., Rui-Wamba J.:** *Javier Manterola Armisen Pensamiento y Obra*. Fundación ESTEYCO. I.S.B.N.: 84-921092-7-0. Diciembre 2004.

[AMP] **Ariker, M., Mc Guire, T., Perry, J.:** *Five Roles you need on your Big Data Team*. Harvard Business Review. 2013.

[AP] **Arrieta J.M., del Pozo F.J.:** *Experiencias en reparación de tableros*. Curso de Conservación y gestión de puentes de hormigón. Intevía. Noviembre 2001.

[AS] **Astiz M.A.:** *El sistema de auscultación del Puente de Waterford en Irlanda*. V Congreso de ACHE. Barcelona 2011.

[B] **Brenner B.:** *Structural modeling, analysis and instrumentation of the Maurice Tobin Memorial Bridge*. Conference at Structural Congress. 2010.

[BD] *Broad Guidelines for Instrumentation of bridges for running higher axle loads*. Report N° BS-106. Bridge & Structures directorate. Research designs and standards organization. Lucknow-226011. Government of India. Ministry of Railways. April 2010.

[BGLA] **Box G., Luceño A.:** *Statistical Control by Monitoring and Feedback adjustment* Wiley and Sons. 1998.

[BGOK] **Bosma C.F., Galenkamp H.F., Obladen B., Koenders E.A.B.:** *Bridge Management by Modelling, Monitoring and Experimental Research*. IABSE Symposium on Large structures and Infrastructures for environmentally constrained and urbanized areas. A-736. Venice 2010.

[BJPW] **Bendat J.S., Piersol A.G.:** *Random Data. Analysis and Measurement procedures* Wiley and Sons. 1986.

[BL] **Burdet O.L.:** *Experience in the long-term monitoring of bridges*. 3rd fib International Congress. Washington 2010.

- [BM] **Brownjohn J.M.W., Moyo P.:** *Monitoring of Singapore-Malaysia Second Link during Construction*. Proceedings of SPIE 4317, 2nd International Conference on Experimental Mechanics, pp 528-533. 2000.
- [BO] **Burdet O.L.:** *Thermal effects in the long-term monitoring bridges*. IABSE Symposium on Large structures and Infrastructures for environmentally constrained and urbanized areas. A- 755. Venice 2010.
- [BOL] **Burdet O.L.:** *Load testing and monitoring of swiss bridges*. CEB Bulletin d'Information, Safety and Performance Concepts, 219, Lausanne, Switzerland, 1993.
- [BOPB] **De Backer H., Outtier A., De Pauw B., Van Bogaert P.:** *Long-term monitoring of temperatures in steel box girders*. IABSE Symposium on Large structures and Infrastructures for environmentally constrained and urbanized areas. A-530. Venice 2010.
- [BP] **Billings I.J., Powel A.J.:** *Thorndon overbridge seismic retrofit*. Eleventh World Conference on Earthquake Engineering. Paper N° 1477. 1996.
- [BR] **Bleiziffer J., Radic J.:** *Monitoring performance of large Croatian bridges*. ARCH'10-6th International Conference on Arch Bridges, pp 875-882. 2010.
- [BSS] **Bergmeister K., Santa U., Strauss A.:** *Structural monitoring and identification approaches*. Structural Health Monitoring & Intelligent Infrastructure. Vols 1 and 2, pp 1613- 1619. 2006.
- [BSVCF] **Buonomo M., Servant C., Virlogeux M., Cremer J.M., Ville V., Forno J.Y.:** *The design and the construction of the Millau Viaduct*. Steel bridges extend structural limits: Millau. Steelbridge. 2004.
- [BU] **Burdet O.L.:** *Automatic deflection and temperature monitoring of a balanced cantilever concrete bridge*. 5th International Conference of Short and Medium Span Bridges, Calgary, Canada, 1998.
- [BVRROC] **Barcena M., Villegas R., Revilla R., Ramos O.R., Olazabal P., Crespo M.:** *Un Camino de Horizonte. Molledo-Pesquera. Último eslabón en las Comunicaciones con la Meseta*. Ferroviario y Apia XXI. 2008.
- [BWS] **Berger D., Waimberg M., Stucchi F. R.:** *Design and executive control of three curved box girder bridges in São Paulo*. 3rd fib International Congress. Washington 2010.

[BZ] **Burdet O.L., Zanella J.L.:** *Automatic monitoring of bridges using electronic inclinometers.* 16th Congress of IABSE. Lucerne 2000.

[BZR] **Burdet O.L., Zanella J.L.:** *Automatic monitoring of The Riddes Bridges using electronic inclinometers.* First International Conference in Bridge Maintenance, Safety and Management. IABMAS. Barcelona 2002.

[C] **Crespo P.:** *Contraste experimental de las variaciones térmicas en puentes.* III Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras. Las estructuras del siglo XXI: Sostenibilidad, innovación y retos del futuro. Vol I, pp 371-385. Zaragoza 2005.

[CCMGFB] **Cunha A., Caetano E., Magalhaes F., Grillaud G., Flamand O., Brownjohn J.:** *Recent Advances in Dynamic Testing and Continuous Dynamic Monitoring of Large Bridges.* IABSE Symposium on Large structures and Infrastructures for environmentally constrained and urbanized areas. A-611. Venice 2010.

[CDEGHLSVV] **Calamoneri C., Duclos T., Ello P., Gausset B., Hajar Z., LY P.K., Simon A., Vassord J., Virlogeux M.:** *Millau Viaduct: Detailed design of Concrete Piers.* Concrete Structures: The Challenge of Creativity. fib/CEB-FIP. 2004.

[CH] **Chajes M.:** *University of Delaware Bridge Center to Conduct Long-Term Monitoring Program on Signature Bridge.* The Monitor. November 2005.

[CIV] **Casanova N., Inaudi D., Vurpillot S.:** *Fiber optic deformation sensors for bridges monitoring.* International Conference on New Technologies in Structural Engineering. Lisboa 1997.

[CKKCK] **Chin W.J., Kim Y.J., Kang J.Y., Choi E.S., Kim B.S.:** *A Study on Integrated Geometry Management and Wireless Control System for the Construction of Concrete Pylon of CableStayed Bridges.* IABSE Symposium on Large structures and Infrastructures for environmentally constrained and urbanized areas. A-496. Venice 2010.

[CMCBI] **Crotti G., Manzoni S., Cigada A., Ballio F., Inzoli F.:** *An Application of Bragg grating array to measure real-time scour depth at river bridges.* IABSE Symposium on Large structures and Infrastructures for environmentally constrained and urbanized areas. A-513. Venice 2010.

[CP] **Crespo P.:** *Red de puentes monitorizados de la Dirección General de Carreteras.* Ministerio de Fomento. 2010.

- [CRP] **Castillo E., Pruneda E.:** *Estadística Aplicada*. Editorial Moralea. 2001.
- [CPTPE] **Corres H., Perez A., Torrico J., Perez J., Estevez R.:** *Medida experimental de las deformaciones y las temperaturas en el Viaducto sobre el río Manzanares y la carretera del Pardo de la M-40*. Hormigón y acero N° 210, pp 51-59. 1er Trimestre 1999.
- [CRPCT] **Corres H., Romo J., Perez A., Calvo J., Torrico J.:** *El enlace de la Zarzuela de la M-40 en Madrid*. Hormigón y acero N° 212, pp 25-30. 2° Trimestre 1999.
- [CRPRS] **Corres H., Romo J., Perez A., Ruiz A., Sanchez J.:** *Puente arco sobre el embalse de El Burguillo (Ávila). Diseño y control de la ejecución*. Hormigón y acero N° 220, pp 3-17. 2° Trimestre 2001.
- [CSWS] **Chen S., Su M., Wang X., Sun B.:** *Stress Safety Monitoring in Construction Stage of Wuzhong Yellow River Bridge*. pp 2251-2256.
- [CTBDGL] **Cheung M.S., Tadros G.S., Brown T., Dilger W.H., Ghali A., Lau D.T.:** *Field monitoring and research on performance of the Confederation Bridge*. Canadian Journal of Civil Engineering, 24 (6), pp 951-962. December 2007.
- [D] **Duan X.:** *Design of main bridge of Chaotianmen Yangtze River Bridge*. Chinese Croatian Joint Colloquium: Long Arch Bridges, pp 409-416. Brijuni Islands 2008.
- [DCA] **Danna S., Ciccone T., Averardi F.:** *Incoronata Viaduct: Salerno-Reggio Calabria highway lane north" strengthening of existing structures with external post-tensioning*. 3rd fib International Congress. Washington 2010.
- [DF] **Diana G., Fiammenghi G.:** *The Messina Strait Bridge: Major Problems Affecting the Design*. IABSE Symposium on Large structures and Infrastructures for environmentally constrained and urbanized areas. A-1. Venice 2010.
- [DGIV] **Del Grosso A., Inaudi D., Vurpillot S.:** *Load-displacement correlation from continuous monitoring systems*. First International Conference in Bridge Maintenance, Safety and Management. IABMAS. Barcelona 2002.
- [DMP] **Dall'aglio F., Manni A., Piacentini L.:** *Fondovalle Dolo Road: Viaduct on the Landslide of Boschi di Valoria*. IABSE Symposium on Large structures and Infrastructures for environmentally constrained and urbanized areas. A-340. Venice 2010.

[E] **Enckell M.:** *Structural Health Monitoring of bridges in Sweeden*. The 3rd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure. Vancouver, British Columbia, Canada. November 2007.

[EAT] *Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-5: Acciones generales. Acciones térmicas. UNE-EN 1991-1-5*. AENOR. Noviembre 2003.

[EE] *Eurocódigo: Base de Cálculo de Estructuras. UNE-UNE-EN 1990. pp-67-82*. AENOR. Abril 2002.

[EH] *Eurocódigo 2: Proyecto de Estructuras de Hormigón. Parte I-I: Reglas generales y Reglas para Edificación. UNE-ENV 1992-I-I*. AENOR. Noviembre 1993.

[EHE] *Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08*. Centro de Publicaciones. Secretaria General Técnica. Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras. Septiembre 2008.

[EMCCOJ] **Escamilla M., Martín M., Cayetano J., Castillo A., Osborne G., Jiménez V.:** *Second Bay of Cadiz Bridge-Latest Construction Challenges*. IABSE Symposium on Large structures and Infrastructures for environmentally constrained and urbanized areas. A-446. Venice 2010.

[EO] **Eliasson O.:** *Los Modelos son Reales*. Editorial Gustavo Gili. Barcelona 2009.

[FC] **Fernandez C.:** *Los puentes de fábrica durante el año 1962*. Revista de Obras Públicas Nº 2973. 1962.

[FEHC] **Fraser M., Elgamal A., He X., Conte J.P.:** *Sensor network for Structural health Monitoring of a Highway Bridge*. Journal of Computing in Civil Engineering, pp 11-24. January- February 2010.

[FHKMOU] **Fujino Y., Hara T., Kubota K., Miyamoto N., Okamoto T., Umemoto S.:** *Verification of a high-accuracy and noncontact measurement system FSF laser optical coordinates*. The Monitor. March 2008.

[FJC] **Fabo P., Jarosevic A., Chandoga M.:** *Measurement of Forces in the Cable Stays of the Apollo Bridge*. Proceedings of the 2nd fib International Congress. Naples, Italy 2006.

[FM] **Feng M.:** *China's major bridges*. IABSE Reports, Vol 95. 2009.

[FMF] **Fernandez C., Manterola J., Fernandez L.:** *Construcción de Puentes por voladizos sucesivos mediante dovelas prefabricadas*. Revista de Obras Públicas N° 3063. 1970.

[FS] **Fujino Y., Siringoringo D.M.:** *Structural health monitoring of bridges in Japan: an overview of the current trend*. Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering(CICE2008). Zurich, Switzerland 2008.

[FSNS] **Fujino Y., Siringoringo D.M., Nagayama T., Su D.:** *Control, simulation and monitoring of bridge vibration-Japan's recent development and practice*. IABSE-JSCE Joint Conference on Advances in Bridge Engineering-II. Dhaka, Bangladesh. 2010.

[FSSHJ] **French C., Shield C., Stolarski H., Hedegaard B., Jilk B.:** *Instrumentation and monitoring of I35w St. Anthony falls bridge*. 3rd fib Congress. Washington 2010.

[FT] **Fernandez L.:** *Tierra sobre el agua*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Colección de Ciencias, Humanidades e Ingeniería N° 55. 1999.

[FV] **Furtner P., Veit-Egerer R.:** *Approach for the life-cycle management of structures including durability analysis, shm and maintenance planning*. IABSE Symposium on Large structures and Infrastructures for environmentally constrained and urbanized areas. A-415. Venice 2010.

[FYMY] **Fumoto K., Yamada I., Moriyama A., Yokoi Y.:** *Fatigue design, evaluation and inspection for orthotropic steel decks on long-span bridges*.

[G] **Garcia N.:** *Construcción del Viaducto Almonte*. III Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras. Las estructuras del siglo XXI: Sostenibilidad, innovación y retos del futuro. Vol 5, pp 2795-2807. Zaragoza 2005.

[GC] **Gentile C.:** *Dynamic measurement on stay-cables using microwave interferometry*. IABSE Symposium on Large structures and Infrastructures for environmentally constrained and urbanized areas. A-422. Venice 2010.

[GEMT] **Glisic B., Enckell M., Myrvoll F., Tuvvert J.:** *Distributed sensors for damage detection and localization*. 4th International Conference on Structural Health Monitoring on Intelligent Infrastructure (SHMII-4). Zurich 2009.

[GG] **Gentile C., Gentile R.:** *Construction phases and reception tests of the new cable-stayed bridge over the Adda river (Northern Italy)*. IABSE Symposium on Large

structures and Infrastructures for environmentally constrained and urbanized areas. A-599. Venice 2010.

[GIP] **Del Grosso A., Inaudi D., Pardi L.:** *Overview of the European activities in the health monitoring of bridges.* First International Conference in Bridge Maintenance, Safety and Management. IABMAS. Barcelona 2002.

[GJA] **Gonzalez J.I., Jimenez R., Arribas D.:** *Viaducto de Navia (1) Proyecto.* IV Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras. Valencia 2008.

[GJAN] **Gonzalez J.I., Jimenez R., Arribas D.:** *Viaducto de Navia (2) Construcción.* IV Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras. Valencia 2008.

[GM] **Garcia M.:** *Viaducto de Tablate II.* II Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras. Vol 3, pp 1927-1933. Madrid 2002.

[GMR] **Garcia A., Ripoll J.:** *Proceso constructivo de la Pasarela peatonal tipo "spand band" Doctor Pedro Gómez Bosque (Valladolid). Lanzamiento y tesado de pletina de acero.* V Congreso de ACHE. Barcelona 2011.

[GP] **Grattasat G.:** *Concepción de Puentes. Tratado General.* Editores técnicos asociados S.A. Barcelona 1981.

[GPCJ] **Gil H., Park J., Cho J., Jung G.:** *Renovation of Structural Health Monitoring System for Seohae Bridge, Seoul, South Korea.* Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2201, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, pp. 131–138. 2010.

[GR] **Geier R.:** *Monitoring of the Vienna Erdberger Bridge.* IABSE Symposium on Large structures and Infrastructures for environmentally constrained and urbanized areas. A-412. Venice 2010.

[GMSERM] **Gomez R., Muria-Vila D., Sanchez-Ramirez R., Escobar J.A., Rodriguez-Gutierrez G., Mendoza-Garcia M.A.:** *An account of Structural Health Monitoring and Related problems of bridge structures in Mexico: Case studies.* The Monitor. March 2008.

[H] **Huang J.:** *System engineering and data management for Structural Health Monitoring.* The Monitor. March 2008.

- [HC] **Hawkins N.M., Clark J.H.:** *Investigation of thermal and live load stresses in Deny Creek Viaduct.* Department of Civil Engineering. University of Washington. 1983.
- [HFHM] **Hoult N.A., Filder P.R.A., Hill P.G., Middleton C.R.:** *Long-Term wireless Structural Health Monitoring of the Ferriby Road Bridge.* Journal of Bridge Engineering pp 153-159. March-April 2010.
- [HFSSJ] **Hedegaard B.D., French C.E.W., Shield C.K., Stolarski H.K., Jilk B.:** *Instrumentation and monitoring of I35W St. Anthony falls bridge.* 3rd fib International Congress. Washington 2010.
- [HFWM] **Hoult N.A., Filder P.R.A., Wassell I.J., Middleton C.R.:** *Wireless structural health monitoring at the Humber Bridge.* Proceedings ICE-Bridge Engineering, 161 (4), pp 189-195. 2008.
- [HSJX] **Hui P., Shouping S., Jianren Z., Xianfeng H.:** *40-Year-old Bridge strengthened with Prestressed CFRP Laminates and Monitored by FBG Gauge.* IABSE Symposium on Large structures and Infrastructures for environmentally constrained and urbanized areas. A-332. Venice 2010.
- [IA] **Itani R., Al-Assaf A.:** *Frequency Analysis of the Existing Tacoma Narrows Bridge.* Research Report. Washington State University. June 2006.
- [IAP] *Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera IAP-98.* Centro de Publicaciones. Secretaria General Técnica. Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras. 1998.
- [IAPN] *Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera IAP- 11.* Centro de Publicaciones. Secretaria General Técnica. Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras. 2012.
- [IBDFPSW] **Inaudi D., Bolster M., Deblois R., French C., Phipps A., Sebasky J., Western K.:** *Structural Health Monitoring System for the new I-35W St Anthony Falls Bridge.* 4th International Conference on Structural Health Monitoring on Intelligent Infrastructure (SHMII-4). Zurich 2009.
- [ID] **Inaudi D.:** *Distributed fibre-optic sensing for long-range monitoring of pipelines.* The Monitor. March 2008.

[IDV] **Inaudi D.:** *SOFO System application in Venice lagoon area.* The Monitor. November 2005.

[IG] **Inaudi D., Glisic B.:** *Continuous monitoring of concrete bridges during construction and service as a tool for data-driven Bridge Health Monitoring.* IABMAS'06 The Third International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management. Porto, Portugal 2006.

[IM] **Inaudi D.:** *Application of SOFO System in the city of Moscow.* The Monitor. November 2004.

[IPS] **Infanti S., Papanikolas P., Stathopoulos-Vlami A.:** *The Behavior of Rion Antirion Bridge Seismic Protection System during The Earthquake of "Achaia-Ilia" on June 8, 2008.* IABSE Symposium on Large structures and Infrastructures for environmentally constrained and urbanised area. A-507. Venice 2010.

[IRAVNG] **Inaudi D., Rufenacht A., von Arx B., Vurpillot S., Noher H. P., Glisic B.:** *Surveillance par capteurs à fibre optique d'un pont à arc enbéton pendant la construction. Monitoring a concrete arch bridge during construction using fiber optic sensors.* 3rd International conference on arch bridges, Paris, France. 2001.

[IV] **Inaudi D.:** *Versoix Bridge-Switzerland.* F04 Case Studies. SAMCO Final Report 2006.

[J] **Jinquan H.Y.Z.:** *Dynamic Loading Test for Humen Suspension Bridge.* Journal of Highway and Transportation Research and Development. Vol 2. 1999.

[JL] **Jun L.:** *FBG application in bridge health monitoring system of Wuhan Tangtze River 2nd Bridge.* 20th International Optical Fibre Sensors. 2009.

[KCWBLCW] **Koo K.Y., Cross E.J., Worden K., Brownjohn J.M.W., List D.I., Cole R., Wood T.:** *Long-term Structural Health Monitoring for Tamar Suspension Bridge.*

[KG] **Knight C., Glasser J.:** *Diagramas.* Gustavo Gili. 2009.

[KN] **Ko J.M., Ni Y.Q.:** *Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges.* Engineering Structures 27, pp 1715-1725. 2005.

- [KNZWZ] **Ko J.M., Ni Y.Q., Zhou H.F., Wang J.Y., Zhou X.T.:** *Instrumentation concerning structural health monitoring of an instrumented cable-stayed bridge.* Structure and Infrastructure Engineering, 5 (6), pp 497-513. 2009.
- [KP] **Kerokoski O., Petursson H.:** *Integral bridge abutment-approach embankment interaction.* IABSE Symposium on Large structures and Infrastructures for environmentally constrained and urbanized areas. A-414. Venice 2010.
- [KPCDFGT] **Kim S., Pakzad S., Culler D., Demmel J., Fenves G., Glaser S., Turon M.:** *Health Monitoring of Civil Infrastructures Using Wireless Sensor Networks.* IPSN'07. Cambridge, Massachusetts, USA. 2007.
- [L] **Larsson O.:** *Estimation of Extreme Climatic Thermal Actions in Concrete Structures.* IABSE Symposium on Large structures and Infrastructures for environmentally constrained and urbanized areas. A-488. Venice 2010.
- [LB] **Lienhart W., Brunner F.:** *Monitoring of bridge deformations using embedded fiber optical sensors.* 11th International Symposium on Deformation Measurements, pp 555-561. Santorini, Greece 2003.
- [LBS] **Loreti S., Bontempi E., Senaud G.:** *A conceptual framework for the design of the health and behavior of the monitoring system for the Messina Strait Crossing Bridge.* Structural Health Monitoring & Intelligent Infrastructure. 2003.
- [LF] **Leonhardt F.:** *Puentes Estética y Diseño.* Presses Polytechniques Romandes. 1982.
- [LFHA] **Leonhardt F.:** *Estructuras de Hormigón Armado. Tomos I, II, III, IV, V y VI.* Librería "El Ateneo". 1980. [LFHP] **Leonhardt F.:** *Hormigón pretensado.* Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento. Madrid 1967.
- [LFL] **Liang Z., Feng L., Li N.:** *Test of Wind Parameters and Cable Vibration of Shenzhen Bay Bridge.* IABSE Symposium on Large structures and Infrastructures for environmentally constrained and urbanized areas. A-269. Venice 2010.
- [LGCRLRG] **Leon J., Garcia E., Corres H., Rodriguez F., Ley J., Rodriguez J., Garcia F.J.:** *Resultados parciales del Proyecto de I+D+I para la supresión de juntas en puentes existentes.* V Congreso de ACHE. Barcelona 2011.

[LHH] **Lenet M.S., Hunt V.J., Helmicki A.J.:** *Health monitoring of Ironton-Russel bridge for rating purposes*. Design of Structures 2001: Bridges, other structures, and hydraulics and hydrology, Issue 1779, pp 67-75. 2001.

[LK] **Laaksonen A., Kerokoski O.:** *Long-term Monitoring of Haavistonjoki Bridge*. IABSE Symposium 2007. Vol 6, pp. 25-30. Weimar 2007.

[LLGGO] **Li H., Li N., Guo Z., Guo Z., Ou J.:** *Case Study: Application of SHM Technology in Civil Structures in Mainland China*. The Monitor. July 2011.

[LLS] **Li H., Li D., Song G.:** *Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering*. Engineering Structures 26, pp 1647–1657. 2006.

[LLWY] **Liu X., Liu A., Wei S., Yang Z.:** *Construction of the main spans of the Chongqing Caiyuanba Yangtze River Bridge*. ARCH'10-6th International Conference on Arch Bridges, pp 782-787. 2010.

[LP] **Lenkei P.:** *Could we have unified codes on future meteorologic actions for concrete structures?.* 3rd fib International Congress. Washington 2010.

[LRC] **Llombart J.A., Revoltos J., Couto S.:** *Puente sobre el río Tajo, en el embalse de Alcántara (“Arcos de Alconétar”)*. Hormigón y acero. Nº 242, pp 5-37. 4º Trimestre 2006.

[LS] **Lipschutz S.:** *Probabilidad*. Mc Graw-Hill. 1994.

[LSSL] **Larocca A.P.C., Schaal R.E., Santos M.C., Langley R.B.:** *Monitoring the Deflection of the Pierre-Laporte Suspension Bridge with the Phase Residual Method*. ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division. Long Beach 2005.

[LSZYHW] **Lu W., Sun Y., Zhang Z., Yu Z., He L., Wang M.:** *A key technique of construction for Wuxia Yangtze River Bridge*. ARCH'07-5th International Conference on Arch Bridges, pp 839- 847. 2007.

[LV] **Luceño A.:** *Métodos de Estadística Aplicada*. Universidad de Cantabria. 1998

[LZHY] **Li, Zhang, Huang, Yan:** *Design and construction of a rigid-frame steel truss arch bridge*. Chinese Croatian Joint Colloquium: Long Arch Bridges, pp 439-446. Brijuni Islands 2008.

[MA] **Mathivat, J.** *Construcción de puentes de hormigón pretensado por voladizos sucesivos*. Editores Técnicos Asociados, S.A. Barcelona 1980.

[MAMB] **Millanes F., Adao da Fonseca A., Matute L., Bastos R.**: *Nuevo Puente arco Infante D. Henrique sobre el río Duero en Oporto, de 280 m de luz*. II Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras. Vol 3, pp 1901-1915. Madrid 2002.

[MASHN] **Matsumoto M., Ahlstrom L., Sugimoto M., Hashimoto K., Nagao Y.**: *Introduction of Non-Destructive Highway Inspection Methods using High Definition Video and Infrared Imaging Technology*. IABSE Symposium on Large structures and Infrastructures for environmentally constrained and urbanized areas. A-261. Venice 2010.

[MC] **Mulkeen C.**: *A critical analysis of Santiago Calatrava's James Joyce Bridge, Dublin, Ireland*. Proceedings of Bridge Engineering 2 Conference. Bath 2009.

[MCESVP] **Martin M., Cayetano J., Escamilla M., Sacaluga M., Vega V., Perez J.**: *Second Bay of Cadiz Bridge. Quality Control and Monitoring*. IABSE Symposium on Large structures and Infrastructures for environmentally constrained and urbanized areas. A-447. Venice 2010.

[MDH] **Mieres J.M., Dalhuizen G., De las Heras J.J.**: *Desarrollo de dos nuevos equipos de medición e inspección para mejorar la calidad y el mantenimiento de estructuras grandes de hormigón - SGIM 2001*. III Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras. Las estructuras del sigloXXI: Sostenibilidad, innovación y retos del futuro. Vol 1, pp 347-358. Zaragoza 2005.

[ME] **Mirambell E.**: *Criterios de diseño en puentes de hormigón frente a la acción térmica ambiental*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. ETSICCP. Barcelona 1987.

[MEA] **Mirambell E., Aguado A.**: *Modelo de obtención de distribuciones de temperaturas y de tensiones longitudinales autoequilibradas en puentes de hormigón*. Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería. Vol. 3, 2, pp 205-230. 1987.

[MFZZX] **Mu T., Fan B., Zheng X., Zheng Y., Xie B.**: *Wuxia Yangtze River Bridge in Wushan, China*. ARCH'07-5th International Conference on Arch Bridges, pp 911-918. 2007.

[MJ] **Manterola J.:** *Elementos de Estadística Aplicada* Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid. 2000.

[MJJ] **Muruzábal J.J.:** *Curso de Puentes de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid.* Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid. 2008.

[MOMG] **Millanes M., Ortega M., Matute L., Gordo C.:** *El Viaducto sobre el río Ulla en el eje atlántico de Alta Velocidad: Una celosía mixta de 240 m de luz.* V Congreso de ACHE. Barcelona 2011.

[MMNFM] **Manterola J., Martínez A., Navarro J.A., Fuente S., Martín B.:** *Puente de ferrocarril de Alta Velocidad sobre el embalse de Contreras.* IV Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras. Valencia 2008.

[MN] **Mufti A.A., Neale K.W.:** *State-of-the-Art of FRP and SHM Applications in Bridge Structures in Canada.* Composites Research Journal. Volume 2, Issue 2, pp 60-69. Spring 2008.

[MPO] **Millanes F., Pascual J., Ortega M.:** *Arroyo Las Piedras Viaduct: The first composite steelconcrete high speed railway bridge in Spain.* Structural Engineering International, IABSE. Vol17, Nº 4, pp 292-297. 2007.

[MPR] **Millanes F., Pascual J., Ripa T.:** *La Pasarela de Acero Inoxidable de Abandoibarra, frente al Museo Guggenheim en Bilbao.* II Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras. Vol 3, pp 1873-1884. Madrid 2002.

[MPSR] **Matute, L., Pulido, I., Sánchez, V., Redero, A.:** *Las Patologías más frecuentes detectadas en las Inspecciones de Puentes de la Red de Carreteras del Estado.* Madrid 2006.

[MSW] **Mavar K., Sekulić D., Wurth D.:** *Monitoring of Krk bridge columns with interferometric fibre optic sensors.* fib Symposium. Dubrovnik 2007.

[MVC] **Mayer-Schönberger V., Curier K.:** *Big Data. La revolución de los datos masivos.* Turner Publicaciones. Madrid, 2013.

- [MVK] **Morisseau V., Vlamis-Stathopoulos A., Kroely B.:** *Example of bridge maintenance program applied by toll bridges agencies in Europe*. 3rd fib International Congress. Washington 2010.
- [MX] **Meng X.:** *Real-time Deformation Monitoring of Bridges Using GPS/Accelerometers*. The University of Nottingham. Doctoral Thesis. 2002.
- [NEJC] **Nilsson M., Eriksson K., James G., Collin P.:** *The Instrumentation and monitoring of the Vårby Bridge*. IABSE Symposium on Large structures and Infrastructures for environmentally constrained and urbanized areas. A-452. Venice 2010.
- [NJSJMCUYAF] **Nagayama T., Jung H.J., Spencer B.F., Jang S., Mechitov K.A., Cho S., Ushita M., Yun C.B., Agha G.A., Fujino Y.:** *International collaboration to develop a structural health monitoring system utilizing wireless smart sensor network and its deployment on a cable stayed bridge*. 5th World Conference on Structural Control and Monitoring. Tokyo, July 2010.
- [N] **Navidi, W:** *Estadística para Ingenieros y Científicos*. Mc Graw-Hill. México 2006.
- [NZK] **Ni Y.Q., Zhou H.F., Ko J.M.:** *Generalization capability of neural network model for temperature-frequency correlation using monitoring data*. Journal of Structural Engineering, pp 1290-1300. October 2009.
- [OBM] **Omenzetter P., Brownjohn J.M.W., Moyo P.:** *Identification of unusual events in multichannel bridge monitoring data*. Mechanical systems and signal processing. pp 409-430. 2004.
- [OL] **Otero F., Lozano J.:** *Alta tecnología en cimbras autolanzables. Instrumentación*. V Congreso de ACHE. Barcelona 2011.
- [OMLTA] **Ortega A., Menendez-Pidal G., Lopez S., Tarquis F., Arenas J.J.:** *Apertura en clave del arco. Puente tercer milenio*. Zaragoza 2008.
- [OMM] **Ortega M., Millanes F., Mansilla J.L.:** *Thermal actions on composite concrete-steel bridges. Comparison between Eurocode and the results obtained on monitored bridges*. IABSEfib Conference. Vol I, pp 465-472. Dubrovnik 2010.
- [OMMA] **Ortega M., Millanes F., Mansilla J.L.:** *Contraste normativo y experimental de los efectos térmicos en puentes de hormigón, metálicos y mixtos*. V Congreso de ACHE. Barcelona 2011.

[OMME] **Ortega M., Millanes F., Mansilla J.L.:** *Análisis de la Instrumentación de temperaturas del viaducto mixto de Alta Velocidad “Arroyo Las Piedras”*. Hormigón y acero. Nº 258, pp 81-97. 4º Trimestre 2010.

[P] **Puchol V.:** *Análisis experimental de las vibraciones causadas por el viento en el puente sobre el río Tajo (“Arcos de Alconétar”)*. Hormigón y acero. Nº 243, pp 51-66. 1er Trimestre 2007.

[PACG] **Del Pozo F., Arrieta J.M., Cerezo J.A., Gomez M.:** *Rehabilitación del Puente colgante de Amposta. Sustitución del sistema de cables*. IV Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras. Valencia 2008.

[PACGHV] **Del Pozo F., Arrieta J.M., Cerezo J.A., Gomez M.:** *Obras de rehabilitación del puente colgante de Amposta*. Hormigón y acero Nº 253. pp 7-42. 3er Trimestre 2009.

[PACV] **Del Pozo F., Arrieta J.M., Cerezo J.A., Velando C.:** *Proyecto de rehabilitación del Puente de Amposta*. Hormigón y acero Nº 241, pp 5-41. 3er Trimestre 2006.

[PC] **Puchol V.:** *Instrumentación de un Puente durante su lanzamiento*. Obras Públicas OP Nº 44, pp 62-67. 1998.

[PCRKVR] **Peeters B., Couvreur G., Razinkov O., Kuendig C., Van der Auweraer H., De Roeck G.:** *Continuous monitoring of the Oresund Bridge: system and data analysis*. Structure and Infrastructure Engineering 2009.

[PFH] **Perez-Fadon S., Herrero J.E.:** *Proyecto y Construcción del Arco de Ricobayo*. Hormigón y acero Nº 212, pp 5-24. 2º Trimestre 1999.

[PH] **Paris J., Hovhanessian G.:** *Sistemas Acústicos de Instrumentación Continua de Estructuras*. II Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras. Vol 2, pp 1101-1108. Madrid 2002.

[PHJ] **Paris J., Hovhanessian G.:** *Sistemas Inteligentes para la Gestión de Estructuras*. II Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras. Vol 2, pp 1109-1118. Madrid 2002.

[PHJS] **Perez-Fadon S., Herrero J.E., Sanchez J.J., Sanchez M.:** *El Arco de los Tilos en la isla de la Palma (Canarias)*. Hormigón y acero Nº 236, pp 5-34. 2º Trimestre 2005.

[PPROM] **Pardo I., Pantaleon M.J., Ramos O.R., Ortega G., Martinez J.M.:** *Viaductos sobre río Deza y Anzo 2*. Hormigón y Acero N° 259, pp 61-74. 1er Trimestre 2011.

[PRO] **Pantaleon M.J., Revilla R., Olazabal P.:** *Montabliz Viaduct, Cantabria (Spain)*. Structural Engineering International 3/2008, pp 222-226. Journal of the International Association for Bridge Engineering IABSE. 2008.

[PROA] **Pantaleon M.J., Revilla R., Olazabal P., Aguado C.:** *Viaducto de Montabliz*. III Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras. Las estructuras del siglo XXI: Sostenibilidad, innovación y retos del futuro. Vol 3, pp 1663-1674. Zaragoza 2005.

[PROC] **Pantaleon M.J., Revilla R., Olazabal P.:** *Viaducto de Montabliz*. CAUCE N° 140, pp 42- 47. 2008.

[PROS] **Pantaleon M.J., Revilla R., Olazabal P., San Vicente J.L.:** *Estudio de la acción del viento en el Viaducto de Montabliz*. IX Reunión de Usuarios de ABAQUS. Madrid, Noviembre de 2004.

[PROV] **Pantaleon M.J., Revilla R., Olazabal P.:** *Viaducto de Montabliz*. IV Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras. Valencia 2008.

[PROW] **Pantaleon M.J., Revilla R., Olazabal P.:** *Montabliz Viaduct*. 3rd fib International Congress. Washington 2010.

[PROP] **Pantaleon M.J., Ramos O.R., Ortega G.:** *Viaducto de Pujayo*. Hormigón y acero N° 252, pp 37-52. 2° Trimestre 2009.

[PS] **Palacios da Silva C.M.:** *Air influence on the temperatures inside a concrete bridge box section*. Dissertation to obtain the Master Degree in Civil Engineering. Instituto Superior Técnico. Universidad Técnica de Lisboa. 2010.

[PSV] **Papanikolas P., Stathopoulos-Vlavis A.:** *The Rion-Antirion bridge: design and construction*. 3rd fib International Congress. Washington 2010.

[PVTIB] **Perregaux N., Vurpillot S., Tosco J.S., Inaudi D., Burdet O.:** *Vertical Displacement of Bridges using the SOFO System: a Fiber Optic Monitoring Method for Structures*. 12th Engineering Mechanical Conference “A Force for the 21st Century”. California, USA 1998.

[PWS] **Pezeshk S., Withers M., Steiner G.:** *Seismic Instrumentation at the I-40 Hernando Desoto Bridge in Memphis, Tennessee.* Proceedings of the 2006 Structures Congress. ASCE Conference: Structural Engineering and Public Safety. 2006.

[R] **Robertson I.N.:** *Prediction of vertical deflections for a long-span prestressed concrete bridge structure.* Engineering Structures 27, pp 1820-1827. 2005.

[RB] **Roberts G.W., Brown C.J.:** *Monitoring the Severn Suspension Bridge by GNSS.* FIG Working Week 2011. Bridging the Gap between Cultures. Marrakech 2011.

[RC] **Rodriguez J., Campos-Costa A.:** *Experimental modal analysis of bridge structures: Case studies.* 11th European Conference on Earthquake Engineering. ISBN 90 5410 982 3. 1998 Rotterdam.

[RG] **Ripoll J.:** *Lanzamiento de una pasarela.* V Congreso de ACHE. Barcelona 2011.

[RJW] **Robertson I.N., Johnson G.P., Wang S.J.:** *Instrumentation performance during long-term bridge monitoring.* Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring, pp 331-340. 2005.

[RK] **Reddy M.R., Kanwar B.R.:** *Instrumentation of plate girder & Open web girder bridges. Theory and case studies.*

[RLR] **Richart J., Ladysz A., Rucabado R.:** *New river Suir bridge, cable-stayed landmark along N25 Waterford byass (Ireland), stay system elaboration in terms of design, execution and dynamic behavior.* 3rd fib International Congress. Washington 2010.

[RPR] **Rodriguez J., Pantaleon M.J., Ramos O.R.:** *Viaducto sobre rego das Lamas en la línea de Alta Velocidad Orense-Santiago de Compostela. Montaje singular.* Cauce Nº 153, pp 30-37. 2010.

[RRV] **Rey J., Ruiz J., Vegas P.:** *Edificio enterrado de usos múltiples en la Plaza Domingo Gascón de Teruel.* V Congreso de ACHE. Barcelona 2011.

[RSC] **Richli T., Sowa J., Chang C.C.:** *Balanced Cantilever Construction.* 3rd fib International Congress. Washington 2010.

[RT] **Ripoll J., Tua J.:** *Micropilotes y pilotes instrumentados en profundidad.* V Congreso de ACHE. Barcelona 2011.

- [S] **Serrano P.**: *Simulación del comportamiento térmico de tableros de puente y su influencia en el estado tensional*. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria. Santander. Junio 1985.
- [SB] **Sanchez de Leon R., Bernal C.**: *Puente atirantado "Arriaca" en Guadalajara*. IV Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras. Valencia 2008.
- [SBB] **Sanayei M., Bell E.S., Brenner B.**: *Bridge Instrumentation and Nondestructive Load Testing for Long Term Structural Health Monitoring NSF-PFI Grant: Whatever Happen to Long- Term Bridge Design? A case study: Vernon Avenue Bridge*. Conference at Northeastern University. October 2010.
- [SG] **Sauvageot G.**: *Segmental Concrete Bridges*. *Bridge Engineering Handbook*. Wai-Fah Chen and Lian Duan. 2000.
- [SO] **Santos, Oliveira L.**: *Upgrading of São João Bridge Structural Health Monitoring System*. IABSE Symposium Report. IABSE Symposium: Sustainable Infrastructure-Environment Friendly, Safe and Resource Efficient. pp. 105-112(8). Bangkok 2009.
- [SORTHP] **Serrano G., Obregon J., Rodriguez J., Trigo P., Hue F., Peset L.**: *Fabricación de tableros para el puente de Öresund entre Dinamarca y Suecia*. Hormigón y acero N° 230, pp 3- 42. 4° Trimestre 2003.
- [SPLYH] **Shao X., Peng J., Li L., Yan B., Hu J.**: *Time-Dependent Behavior of Concrete-Filled Steel Tubular Arch Bridge*. *Journal of Bridge Engineering*, pp 98-107. ASCE. January-February 2010.
- [SMAV] **Sopena L., Merino R.M., Alvarez J.J., Del Valle J.A.**: *Viaducto sobre el río Porcía*. V Congreso de ACHE. Barcelona 2011.
- [SMB] **Spuler T., Moor G., Berger R.**: *Structural health monitoring-saving disruptive works on urban bridges*. IABSE Symposium on Large structures and Infrastructures for environmentally constrained and urbanized areas. A-703. Venice 2010.
- [SMBW] **Spuler T., Moor G., Berger R.**: *Automated Structural Health Monitoring—filling a knowledge gap*. 3rd fib International Congress. Washington 2010.
- [SMNT] **Strasky J., Matascik M., Novak R., Taborska K.**: *Multi-span extradosed Viaduct in Povazska Bystrica, Slovakia*. 3rd fib International Congress. Washington 2010.

[SRRM] **Serrano A., Rodriguez D., Ruperez M., Martinez J.:** *Viaducto ferroviario en celosía sobre la Calle Comercio de Madrid*. V Congreso de ACHE. Barcelona 2011.

[SRT] **Semir A., Rucabado R., Torvinen J.:** *Crusell Bridge, cable-stayed in the West Harbor of Helsinki (Finland), stay system elaboration in terms of design, execution and dynamic behavior*. 3rd fib International Congress. Washington 2010.

[SS] **Schlaich J., Scheef H.:** *Concrete Box-Girder Bridges*. International Association for Bridge and Structural Engineering. 1982.

[SSM] **Simon-Talero J.M., Sanchez P.P., Millan C.:** *Implantación de un Sistema de Gestión de Puentes en la red de gestión directa de Abertis Autopistas España*. V Congreso de ACHE. Barcelona 2011.

[TBR] **Tozser O., Barker K.J., Rowcroft C.:** *Using Acoustic Monitoring to Extend the Life of Post-Tensioned Cable Supported Bridges*. IABSE Symposium on Large structures and Infrastructures for environmentally constrained and urbanized areas. A-234. Venice 2010.

[TK] **Tamura K.:** *Instrument Systems of Major Bridges in Japan*. Instrumental Systems for Diagnostics of Seismic Response of Bridges and Dams. Available Instrumental Systems. pp 10- 20.

[TMC] **Tsiatas G., McEwen E.E., Chen H.:** *Monitoring of long-term creep and temperature behavior of the Jamestown-Verrazzano Bridge*. University of Rhode Island. June 2002.

[TMHMMMM] **Tarquis F., Martin de la Vega A., Hue P., Mansilla J.L., Millanes F., Martin J., Morejon J.M.:** *Construcción del Viaducto de Archidona L.A.V. Antequera-Granada*. V Congreso de ACHE. Barcelona 2011.

[TO] *Puente sobre el río Clariano-Onteniente (España)*-. Revista de Obras Públicas Nº 3387, pp 43-47. Mayo 1999.

[TSH] **Torroja J.A., Simon-Talero J.M., Hernandez A.:** *Doubling the width of the platform of the San Pedro bridge (Spain)*. 3rd fib International Congress. Washington 2010.

- [TSHN] **Torroja J.A., Simon-Talero J.M., Hernandez A., Navarro A.:** *Ampliación del Viaducto de San Pedro de la Ribera*. Hormigón y acero N° 260, pp 11-45. 2° Trimestre 2011.
- [TP] **Takacs P.:** *Deformations in concrete cantilever bridges. Observations and theoretical modeling*. Doctoral Thesis. Department of Structural Engineering. The Norwegian University of Science and Technology. Trondheim, Norway. March 2002.
- [TY] **Takatoku Y.:** *Construction of the Hoover dam bypass arch bridge*. 3rd fib International Congress. Washington 2010.
- [UHBM] **Ubertini F., Hong A.L., Betti R., Materazzi A.L.:** *Identification of Wind-Excited Suspension Bridges for SHM: a Feasibility Study*. IABSE Symposium on Large structures and Infrastructures for environmentally constrained and urbanized areas. A-406. Venice 2010.
- [V] **Vazquez D.:** *Sistema "Crackview" de análisis de grandes estructuras a distancia*. *Aplicaciones prácticas*. II Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras. Vol 2, pp 1119-1127. Madrid 2002.
- [VAPP] **del Valle J.A., Aja C., Puchol V., Peset L.:** *Instrumentación del Viaducto sobre el río Ulla*. V Congreso de ACHE. Barcelona 2011.
- [VCSC] **del Valle J.A., Carriazo A., Simon-Talero J.M., Chico P.:** *Viaducto sobre el río Ulla*. Hormigón y acero N° 258, pp 7-23. 4° trimestre 2010.
- [VGH] **Vazquez A., Gonzalez M., Hue A.:** *Rehabilitación del Puente colgante de Amposta: Ejecución de la instalación del nuevo sistema de cables*. IV Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras. Valencia 2005.
- [VHC] **Villalba V., Casas J.R.:** *Instrumentación continua-Gestión estructural. Instrumentación del Viaducto de la carretera BP-1413 (Cerdanyola del Vallés)*. V Congreso de ACHE. Barcelona 2011.
- [VID] **Vurpillot S., Inaudi D., Ducret J.M.:** *Bridge monitoring by fiber optic deformation sensors: design, emplacement and results*. SPIE, Smart Structures and Materials, San Diego, USA. 1996.

[VIS] **Vurpillot S., Inaudi D., Scano A.:** *Mathematical model for the determination of the vertical displacement from internal horizontal measurements of a bridge.* SPIE Smart Structures and Materials. San Diego, USA 1996.

[VKBCI] **Vurpillot S., Krueger G., Benouaich D., Clement D., Inaudi D.:** *Vertical deflection of a pre-stressed concrete bridge obtained using deformation sensors and inclinometer measurements.* ACI Structural Journal. Vol 95, N° 5, pp 518-526. September-October 1998.

[VKI] **Vurpillot S., Kronenberg P., Inaudi D.:** *Bridge Spatial Displacement Monitoring with Fiber Optic Deformations Sensors.* ACI/KCI 2000 International Conference “Repair, Rehabilitation and Maintenance of Concrete”. Seúl, Corea 2000.

[YM] **Yun C., Min Y.:** *Smart Sensing, Monitoring, and Damage Detection for Civil Infrastructures.* KSCE Journal of Civil Engineering. Vol. 15, N° 1, pp 1-14. January 2011.

[ZFCBH] **Zhua Y., Fua Y., Chena W., Huanga S., Bennettb K.D.:** *Health monitoring system for Dafosi cable-stayed bridge.* Smart Structures and Materials 2003: Smart Systems and Nondestructive Evaluation for Civil Infrastructures. Proceedings of SPIE Vol 5057. 2003.

[ZLZYT] **Zhao C., Li C., Zeng M., Yang W., Tan L.:** *Performance analysis of a cable-hoisting erection system in Nanning Yonghe Bridge.* ARCH'10-6th International Conference on ArchBridges, pp 753-760. 2010.

[ZSXX] **Zong Z., Sun J., Xu L., Xia Z.:** *Design and Study of Structural Health Monitoring System of Xiabaishi Bridge.* Journal of the China Railway Society. Vol 5. 2009.