

Sistemas De Gestión De Puentes , situación actual y futuro: conexión con Br.I.M., Gemelos Digitales, Monitorización, S.H.M. E Inteligencia Artificial

Bridge Management Systems, Current Situation and Future: Connection with Br.I.M., Digital Twins, Monitoring S.H.M., And Artificial Intelligence

Jorge Ley Urzaiz ^a, Víctor García Martín ^b, Alvaro Navareño ^c, Emilio Criado ^d, Raúl Rodríguez Escribano ^e y David Perosanz Cilleruelo ^f

^a Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. INTEMAC. Director General. jley@intemac.es

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. TEKNES. Director General. vgarcia@teknes.es

^c Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. MTMS. Director Técnico D.G.C. anavareno@transportes.gob.es

^d Ingeniero Civil. MTMS. Jefe Sección Conservación y Gestion de Activos D.G.C. jecriado@transportes.gob.es

^e Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. INTEMAC. Director División Estudios. rrodriguez@intemac.es

^f Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. GESTIOMA. Director General. dperosanz@gestioma.com

^a PhD. Civil Engineer. INTEMAC. Managing Director. jley@intemac.es

^b MSc. Civil Engineer. TEKNES. Managing Director. vgarcia@teknes.es

^c PhD. Civil Engineer. MTMS. Technical Director D.G.C. anavareno@transportes.gob.es

^d Civil Engineer. MTMS. Operation and Assets Management D.G.C. jecriado@transportes.gob.es

^e PhD. Civil Engineer. INTEMAC. Technical Director. rrodriguez@intemac.es

^f MSc. Civil Engineer. GESTIOMA. Managing Director. dperosanz@gestioma.com

RESUMEN

Los Sistemas de Gestión de Puentes (S.G.P.) son utilizados por numerosas administraciones y concesionarios de autopistas para conocer el estado de sus puentes y gestionar eficazmente sus operaciones de explotación y mantenimiento. En el desarrollo inicial de los S.G.P. se buscó maximizar las posibilidades de las bases de datos para obtener la información para la correcta gestión. Más tarde se usaron tabletas digitales y drones para facilitar la introducción de datos, hoy se busca la conexión entre los S.G.P. , la monitorización (S.H.M.) , los datos obtenidos de modelos B.I.M. , su implementación en Gemelos Digitales y el uso de Inteligencia Artificial y Realidad Virtual para mejorar la gestión de la red.

ABSTRACT

Bridge Management Systems (B.M.S.) are used by various administrations and highway concessionaires to know the condition of their bridges and effectively manage their operation and maintenance activities. In the initial development of B.M.S., the aim was to maximize the capabilities of databases to obtain information for proper management. Later, digital tablets and drones were used to facilitate data entry. Today, the goal is to connect B.M.S. with monitoring (S.H.M.), data obtained from B.I.M. models, their implementation in Digital Twins, and the use of Artificial Intelligence and Virtual Reality to improve network management.

PALABRAS CLAVE: S.G.P., Puente, Inspección, Conservación, Br.I.M., Monitorización, G.D.,I.A.

KEYWORDS: B.M.S., Bridge, Inspection, Operation, Br.I.M., S.H.M., Digital Twin, I.A.

1.Introducción

El fuerte desarrollo de la red de carreteras en el mundo, el incremento del tráfico por ellas, el notable incremento también del peso de los vehículos que circulan por los puentes que conforman esas redes y el significativo número de puentes colapsados, a consecuencia del deterioro de esas infraestructuras, también provocado por la aparición cada vez más frecuente de fenómenos meteorológicos más extremos relacionados con el cambio climático ha inducido el interés por la mejora de los Sistemas de Gestión de Puentes , (abreviado como BMS en inglés por “Bridge Management System” o SGP por su acrónimo en castellano) Un SGP es un conjunto de herramientas, metodologías y procesos utilizados para gestionar de manera efectiva y eficiente el mantenimiento y la gestión de puentes. Su objetivo principal es mejorar la seguridad de los puentes e infraestructuras, permitiendo identificar problemas , priorizar actuaciones de reparación/refuerzo y actuar rápidamente para prevenir accidentes o colapsos.

Estos sistemas han evolucionado significativamente desde su fecha de creación (en 1968 , la Federal Highway Administration (FHWA) en los Estados Unidos de América con su sistema NBI , fueron los primeros en imponer su uso, aunque en Suecia en 1944 ya existía una reglamentación para archivar convenientemente las inspecciones realizadas sistemáticamente a algunos puentes) y si inicialmente tenían prácticamente la estructura de una sencilla base de datos donde se recogían los datos administrativos de los puentes , algunos parámetros sobre su tipología estructural y los datos recogidos en las inspecciones periódicas que se realizaban , en la actualidad son mucho más que eso ya que en algunos casos incorporan modelos predictivos sobre el deterioro

registrado en elementos estructurales y módulos para priorizar las actuaciones de mantenimiento en función de la disponibilidad de fondos y de la trascendencia de los daños registrados. Es interesante señalar que el origen de esta herramienta fue el colapso del Silver Bridge en West Virginia (Ohio, Usa) en 1967 ,accidente que conllevó la muerte de 47 personas . Ese siniestro llevó a la FHWA a intentar sistematizar y periodificar las actividades de inspección de puentes. En Europa fue la administración danesa quien desarrolló la versión inicial del DANBRO BMS implantado por primera vez en 1975. En España a finales de los años 90 la Oficina de Ingeniería de Jose Antonio Torroja fue quien, a partir del sistema DANBRO pilotó el desarrollo del primer Sistema de Gestión de Puentes que se implantó para la gestión de puentes en la Dirección General de Carreteras . Pues bien, solo en estos últimos 5 años han colapsado más de una veintena de grandes puentes en Europa , América y Asia; por ello parece necesario reflexionar sobre si el uso de estas herramientas está ayudando a minimizar los enormes daños que originan estos colapsos y si se están priorizando correctamente las actuaciones a desarrollar.

Por otra parte, en los últimos años el desarrollo de la informática , las telecomunicaciones y la inteligencia artificial ha originado que se implementen algunas herramientas basadas en estas técnicas en los más modernos Sistemas de Gestión . En lo que sigue mostraremos como el BIM (o BRIM), la monitorización de los puentes, los gemelos digitales y la inteligencia artificial están siendo empleados para optimizar los Sistemas de Gestión de Puentes.

2.Los Sistemas de Gestión de Puentes

Los Sistemas de Gestión de Puentes (SGP) bien diseñados son una herramienta crucial para garantizar la seguridad, la funcionalidad y la correcta gestión de activos de infraestructuras vitales, inicialmente incorporaban únicamente a los puentes , pero los más avanzados incorporan también los túneles ,muros y obras de tierra (terraplenes , desmontes) , sistemas de señalización, etc. representando por ello un completo sistema de gestión de activos .[1,2,3,4]

Si bien las configuraciones específicas de los SGP pueden variar , generalmente los más modernos (o los que han seguido evolucionado) incluyen módulos relacionados con:

INVENTARIO : este módulo fundamental contiene un registro completo de todos los puentes que va a gestionar el sistema. Incluye información geográfica y administrativa además de la puramente ingenieril: Esta base de datos debe estar perfectamente actualizada y contener los datos necesarios para identificar cada uno de los elementos estructurales y funcionales de los puentes. Obviamente el estructurar correctamente la información contenida en este módulo incorporando en él la documentación de proyecto y construcción facilita enormemente el posterior desarrollo correcto del tratamiento de la información obtenida durante la vida del puente. Contar con croquis claros de la estructura y fotografías que la identifiquen unívocamente facilita enormemente los trabajos posteriores. Este módulo actualmente está conectado con sistemas de información geográfico (GIS) que permiten fácilmente conocer donde se encuentra el puente y como acceder a él. No debe confundirse el tener muchos datos con lo que es realmente útil que es manejar los datos necesarios , actualizados y fiables.

INSPECCIÓN: En estos módulos y submódulos se detallan cada uno de los

deterioros que se han detectado en las inspecciones realizadas.

- Inspecciones básicas, efectuadas, cada dieciocho meses como máximo y siempre después de algún fenómeno meteorológico extremo ,normalmente por personal de conservación de la infraestructura que recogen información que puede condicionar el plazo en el que se realizan las inspecciones principales efectuadas.

- Inspecciones principales, efectuadas en periodos generalmente comprendidos entre los 2 y los 6 años y llevadas a cabo por técnicos experimentados y conocedores de las patologías más frecuentes que afectan a los puentes . Estas inspecciones deben realizarse siguiendo un detallado manual donde se clasifique el deterioro observado indicando su extensión y su intensidad. Si este módulo esta correctamente implementado puede obtenerse el “índice de estado” del puente y en muchos casos definir las inversiones necesarias en tareas de mantenimiento. Es fundamental el correcto uso de catálogos de daños y que la propiedad de los puentes sea conocedora de los pesos que se otorgan a los distintos tipos de daños y a la importancia del puente en la red de carreteras.

- Inspecciones especiales, efectuadas siempre que a partir de que en una Inspección principal se haya observado un daño que exija la realización de un análisis sobre la seguridad , funcionalidad o durabilidad del puente mediante comprobaciones de cálculo , ensayos no destructivos , toma de muestras para la realización de ensayos en laboratorio ,etc, etc. En este caso es fundamental la elaboración de un plan de actuación detallado y económicamente valorado donde se objetive que en función del resultado obtenido se tomaran unas decisiones u otras . Tan malo es realizar ensayos que no sirvan para nada como no realizar ensayos y entonces adoptar medidas que no estén del todo justificadas.

Es imprescindible que en el sistema de gestión se archiven las distintas actividades realizadas en el puente a lo largo de su vida ya que en ocasiones nuevas campañas de ensayos pueden cuestionar la evolución de procesos de degradación que anteriormente se hubieren detectado. En la actualidad, en algunos países se están realizando sistemáticamente campañas de ensayos dinámicos de puentes como una metodología para detectar procesos de deterioro no fácilmente detectables por simple inspección ocular (puentes afectados por reacción árido/álcali).

Si bien antes se han señalado los plazos en los que se desarrollan habitualmente las respectivas inspecciones, en los últimos años se están fijando plazos temporales distintos en función del tipo de puente, de su índice de estado y de los efectos que produciría que el puente inspeccionado quedara parcial o totalmente fuera de servicio. Abdallah, Atadero y Ozbek en [5] establecen una metodología muy interesante para fijar el periodo de inspección de las inspecciones principales en función de diversos parámetros para puentes cuyo deterioro fundamental sean los procesos de corrosión.

MODELOS DE DECISIÓN: Ayudan a determinar prioridades y estrategias de mantenimiento. Estos módulos a su vez pueden clasificarse dentro de dos grandes grupos, dentro del primero (Nivel PUENTE) estarían aquellos que a nivel estructural intentan identificar la evolución de los problemas detectados, en un puente con elementos estructurales de hormigón donde se detectan deterioros por procesos de corrosión, existen sistemas de gestión de puentes que tienen módulos que en función del ambiente (clima) donde se encuentra el puente (determinado por su localización geográfica, datos termohigrológicos, etc), el microclima donde está el elemento afectado, de las eventuales

operaciones de vialidad invernal para mantener en uso el puente en condiciones ambientales adversas, etc., realizan la prognosis de como evolucionaran los daños si no se actúa, o si se actúa. De forma semejante en puentes metálicos se llevan a cabo estudios sobre evolución de daños por fatiga. Esto se realiza habitualmente mediante teorías basadas en la cadena de Markov. Dentro del segundo (nivel RED) existen modelos que estudian la influencia que en el tráfico de la red tiene el posible corte del tráfico por el puente para realizar operaciones de mantenimiento, reparación, refuerzo o demolición y sustitución.

Estos modelos sirven para priorizar la actuación en determinados puentes, planificar mejor las inversiones en mantenimiento y/o reparación y para conocer la vida útil de cada uno de los elementos de la red todo ello cuantificar mucho mejor el valor real de nuestros activos.

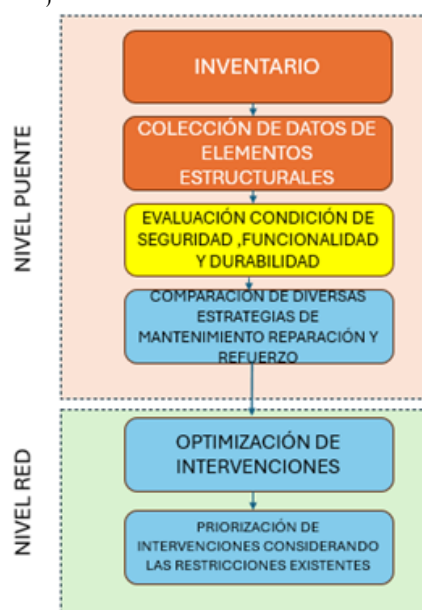


Figura 1. Módulos de los Sistema de Gestión de Puentes más convencionales

En la tabla nº 1 se detallan algunas características de los sistemas de gestión de Puentes donde puede observarse que en general las inspecciones principales suelen realizarse cada 5 años

País	SGP utilizado	Índice de Estado	Frecuencia de Inspección Principal (años)	Módulo de predicción de evolución de daños
Alemania	SIB-Bauwerke	1-4	3	Si
Australia	MRWA	0-100	5-7	Si
Canadá (Ontario)	OBMS	0-100	2	Si
Canadá (Quebec)	Pontis	0-100	3-5	Si
Colombia	SIGP	0-100	5	Si
Dinamarca	DANBRO	0-5	6	Si
EEUU	Pontis /BrM	0-100	2	Si
Emiratos Arab. Unidos	ICARO	0-100 (5 intervalos)	2	Si
España	SGP	(5 intervalos)	5	No
Finlandia	HiBris,Hanke-Siha	0-4	5	Si
Francia	LAGORA	1-3	3	Si
Irlanda	Eirspan	0-100	5	No
Italia (Trento)	APTBMS	1-5	1	Si
Japón	RPIBMS	1-5	5	Si
Corea del Sur	KRMBS	1-5	5	Si
Noruega	Brutus	1-4	5	Si
Polonia	SZOK	0-5	5	Si
Portugal	GOA	1-5	5	No
Reino Unido	SMIS	1-5	2	No
Sudáfrica	STRUTMAN	1-4	3-5	No
Suecia	BatMan	1-3	3	Si
Suiza	KUBA , UplaNS	1-5	5	Si

Tab. 1 Frec. de inspección/Índ. de estado/Módulo de evol. de daños en diversos de SGP

El Sistema de Gestión de Puentes (SIGP) [6] utilizado en España recoge la documentación de los trabajos de inspección (rutinarias o básicas, principales y especiales) permite clasificar los puentes en función del daño que presentan y priorizar los trabajos de mantenimiento/ reparación /refuerzo, no obstante carece de módulos de evolución del deterioro y tampoco diferencia el plazo para inspeccionar las estructuras en función de su índice de estado. Mediante el SIGP en España se tienen controladas 27.152 estructuras. Las podemos clasificar en función del material constituyente:

Hormigón	87,98%
Fábrica	7,03%
Metálico	3,81%
Mixto	1,18%

Por su morfología:

Puente	43,95%
Pontón	43,19%
Estructura de grandes dimensiones	10,99%
Paso inferior peatonal	0,31%
Pasarela peatonal	1,52%

Por su tipología estructural:

Tablero losa/vigas/cajón	63,02%
Bóveda	16,72%
Marco-Tubo	19,75%
Arco	0,45%
Atirantado	0,07%

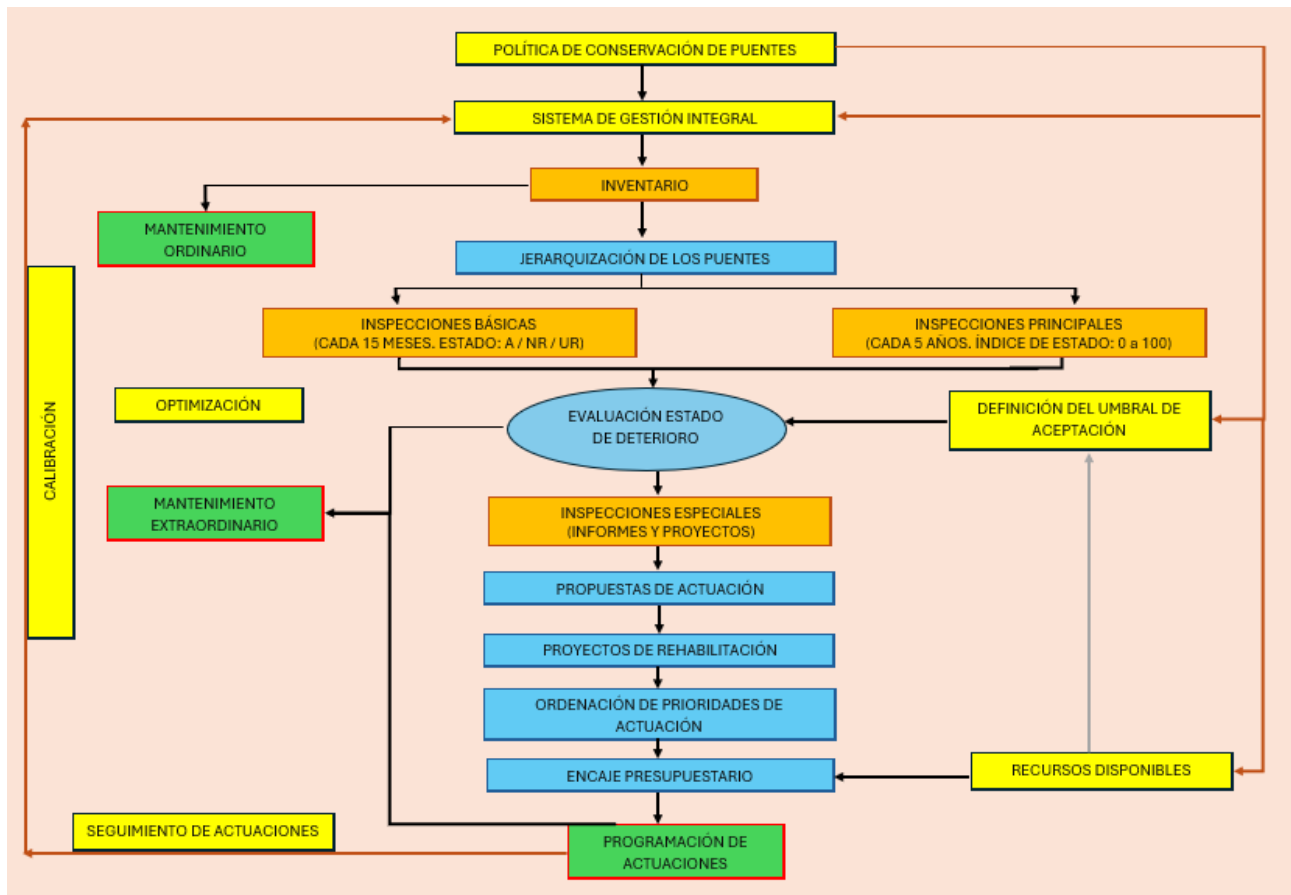


Fig.2 Gestión de Carreteras en España donde se integra el SIGP

Gran parte de lo antes citado se apuntaba ya en el informe final del proyecto **BRIME: Bridge Management Systems in Europe** financiado por la Unión Europea y publicado hace más de 20 años [7] , posteriormente el **IABMAS Bridge Management Committee** publicó en 2014 un muy interesante documento [8] donde se analizan 25 de los SGP usados en 25 países. El principal inconveniente actual de la realización de las inspecciones principales como en la práctica se realizan es que pese a contar con catálogos de daños y manuales (como el español[8] muy completos) , cursos de formación de los inspectores y en ocasiones cursos de capacitación estas inspecciones tienen un grado de subjetividad importante y su resultado depende en gran medida de la experiencia del inspector. Existen investigaciones en marcha para intentar

mediante drones e inteligencia artificial objetivizar esa clasificación [9].

Gran número de sistemas de gestión de última generación han incorporado también el módulo de transporte de cargas pesadas.

En los últimos años la evolución de las técnicas de ensayos no destructivos ,de la informática , de la telemática y de los sensores ha permitido avanzar e incorporar dentro de algunos sistemas de gestión otras técnicas y desarrollar ampliamente algunos de los modelos de predicción de evolución de los daños.

Pasemos a detallar aquellos desarrollos que más recientemente se han incorporado o se intentan incorporar a esta imprescindible herramienta.

3.Br.I.M. Modelado De Información De Puentes

El Br.I.M. es una representación digital de un puente que contiene la información geométrica y no geométrica del puente, lo que permite la gestión de todo el ciclo de vida del puente, incluyendo tanto los datos de la fabricación de algunos elementos (o materiales constituyentes), como los datos de la construcción, operación, inspección y mantenimiento. [10]

El Bridge Information Modeling (Br.I.M.) está evolucionando el desarrollo de los sistemas de gestión de puentes contribuyendo a mejorar significativamente la planificación del mantenimiento y explotación de los puentes ya que utiliza modelos digitales detallados de los puentes, lo que permite una visualización precisa y una mejor comprensión de la estructura, facilitando la identificación de problemas potenciales y la planificación de intervenciones.

El Br.I.M. puede integrar datos de diversas fuentes, los datos de diseño y construcción, los de las inspecciones, monitorizaciones de los sensores e incluso los análisis estructurales, en un único modelo digital. Esto proporciona una visión completa del estado del puente y ayuda a tomar decisiones informadas.

Los modelos Br.I.M. permiten realizar simulaciones y análisis avanzados, como la evaluación del comportamiento estructural bajo diferentes cargas y condiciones ambientales. Esto ayuda a prever problemas y planificar soluciones antes de que ocurran.

El Br.I.M. unido a la monitorización facilita el mantenimiento predictivo al utilizar datos en tiempo real y análisis avanzados para prever cuándo y dónde se necesitarán intervenciones. Esto reduce el tiempo de inactividad y los costos de reparación. Al proporcionar una visión detallada del estado de los puentes, Br.I.M. ayuda a priorizar las intervenciones de mantenimiento, asegurando que los recursos se utilicen de manera eficiente y

efectiva. Permitiendo archivar la documentación precisa y poder efectuar un seguimiento continuo del estado de los puentes, lo que facilita la planificación a largo plazo y la gestión de estos activos proporcionando al combinarse con los sistemas de gestión una herramienta avanzada que ayuda a mejorar la seguridad, eficiencia y sostenibilidad de estas infraestructuras críticas.

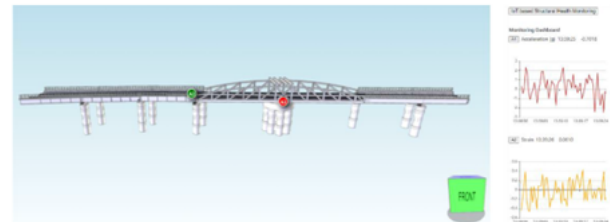


Fig.3 Monitorización integrada en un modelo Br.I.M. tomada de Gao,Y; et al. “Bridge Digital Twin for Practical Bridge Operation and Maintenance by integrating GIS and BIM “ Building 2024 14.

No obstante, como es fácil de entender, no será lo mismo entonces realizar un sistema de gestión para manejar un conjunto de puentes nuevos, que han sido ya proyectados recientemente utilizando la tecnología Br.I.M. en su diseño, que intentar utilizar esta tecnología y aplicarla en sistemas de gestión de puentes proyectados y construidos hace ya años cuando esta tecnología no estaba disponible.

Hay también que extremar el cuidado al utilizar software de código “abierto” en estos desarrollos porque de lo contrario el cliente se encuentra atado a tecnologías ligadas a un desarrollador específico y puede convertirse en “esclavo” de ellas.

En España, para la Diputación Foral de Vizcaya, **GESTIOMA** ha incorporado a través de una plataforma digital accesible vía web, modelos digitales de puentes ya construidos y en dicha plataforma se integra no solo la información “estructural” de los puentes si no toda la información de mantenimiento y explotación que se lleva a cabo. Esta plataforma es capaz también de comunicarse con otras plataformas donde se recogen datos de

monitorización de puentes y taludes , por lo que resulta de suma utilidad al gestor.

4. Monitorización de Puentes (S.H:M.) y Gemelos Digitales

Aunque la monitorización de puentes (SHM , por las siglas en ingles de Structural Health Monitoring) lleva decenas de años en funcionamiento, ofreciendo datos muy valiosos para aquellos gestores que la usan correctamente, es cierto que el enorme avance en los últimos años de las tecnologías TIC , el desarrollo de sensores inalámbricos , la mejora y abaratamiento de los equipos acondicionadores de los sensores y de los equipos que controlan los sensores y por último la mejora en las tecnologías de almacenamiento de energía y transmisión de datos han conllevado que se popularice más esta actividad .

Por ello algunos de los gestores de puentes han optado , desde nuestro punto de vista acertadamente , por intentar recopilar en su sistema de gestión si no toda la información de estas monitorizaciones , al menos la información que a juicio del gestor sea imprescindible conocer. Ello es especialmente útil para por ejemplo retroalimentar con la información obtenida en tiempo real los modelos predictivos de deterioro bien sea por procesos de degradación de los materiales (corrosión ataque por sulfatos , reacción Árido/álcali , etc) o por fatiga . Estas tecnologías sirven también para calibrar los modelos de predicción de evolución de los deterioros. En ese sentido el esfuerzo realizado por INVIAS el gestor de la red de carreteras de Colombia que ha evolucionado de un sistema de gestión de puentes el SipulCol

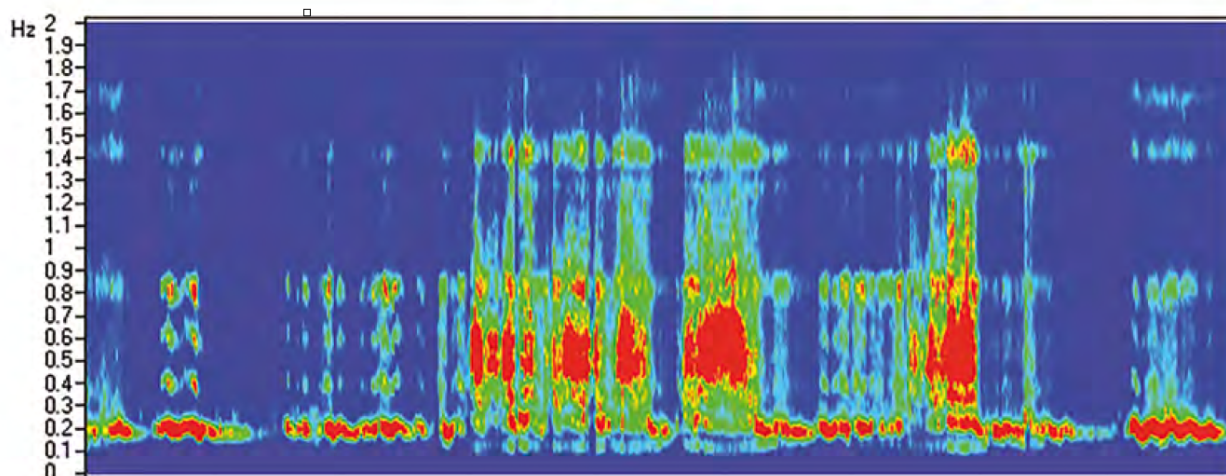
semejante al español, ambos en su origen desarrollados siguiendo la estela de DANBRO, hacia un nuevo sistema que realimenta los datos de las inspecciones con los datos de las monitorizaciones en aquellos puentes que se están auscultando , que también tiene un módulo específico para transportes pesados , un módulo para clasificar los puentes según su vulnerabilidad frente a riesgos varios (climáticos , terremotos) y por último tiene un módulo de toma de decisiones y priorización de actuaciones basado en múltiples criterios. [11]. En otros países como en Turquía la monitorización realizada a los puentes “singulares” se integra también en su sistema de gestión.

En algunos países como Corea donde recientemente han habido colapsos muy graves de importantes puentes construidos hace menos de 30 años se han realizado investigaciones muy interesantes sobre cómo interpretar la ingente cantidad de datos generados por la monitorización de estas estructuras .En general tanto estas investigaciones lideradas Jaewan Kim en el **Institute of Civil Engineering and Building Technology** como las llevadas a cabo por Helmut Wenzel que lideró el proyecto europeo **RISKMAN** apuestan por utilizar los datos obtenidos en el cambio en la tendencia de algunos de los parámetros dinámicos (frecuencias , amortiguamiento , variación en la amplitud de las aceleraciones , energía de transferencia) que se obtienen en estas monitorizaciones.

En este caso además algunas tecnologías disruptivas como la Inteligencia Artificial ,y el Machine Learning se han sumado a otras herramientas ya conocidas para poder manejar la ingente cantidad de datos que se obtienen mediante estas monitorizaciones.

Position Axis G1, Top Deck: Trendcard x-Direction:

g 0 5 10 15 20 25 30 35 44.039994 - 269.330826



Typical trend card with change in performance after damage as used for reporting

**Fig.4 Tomada de Wentzel Helmut (2021) “Permanent Structural Health Check of Signature Bridges”
Hormigón y Acero. 2021**

Es necesario hacer notar en relación con la monitorización que países como España, Alemania o Italia están legislando o lo han hecho recientemente cómo llevar a cabo estas monitorizaciones de forma tal que cuando se lleven a cabo haya un obligado protocolo de comunicaciones de forma tal que esta información sea aprovechada de la mejor forma posible. En particular el documento italiano, describe un enfoque multinivel para evaluar el riesgo, la seguridad la monitorización de los puentes existentes en Italia. Detalla un proceso de seis niveles, comenzando con un inventario de puentes en el Nivel 0 y culminando en verificaciones exhaustivas de seguridad en el Nivel 4 utilizando los códigos de construcción actuales. El núcleo de la metodología implica asignar una "Clase de Atención" (CdA) a cada puente en función de factores de peligro, vulnerabilidad y exposición, determinando el nivel necesario de investigación y análisis subsiguientes. Las directrices tienen como objetivo estandarizar las prácticas de evaluación de puentes, asegurando una aplicación consistente en todo el país al aclarar las ambigüedades en las regulaciones existentes.

En general las monitorizaciones en continuo se emplean en lo que en terminología inglesa se denominan “Special Bridges” y en los “Specific Signature Bridges” dentro de los primeros estarán aquellos puentes que por alguna especial circunstancia precisan ser monitorizados para determinar si realmente puede seguir en servicio sin llevar a cabo operaciones de reparación o refuerzo o para auscultar que el comportamiento del puente reforzado efectivamente es el esperado después de algún tipo de reparación/refuerzo. Dentro de los segundos están los singulares por su diseño o materiales novedosos, etc.

Los gemelos digitales de los puentes tienen un gran potencial para optimizar las operaciones de mantenimiento y explotación, pero quizá sería interesante definir con mayor especificidad que es un gemelo digital de un puente ya que si bien para algunos es simplemente un modelo Br.I.M. o incluso un modelado digital del puente otros entienden que es el modelo de elementos finitos utilizado para su proyecto o evaluación. En nuestra opinión un gemelo digital combina el modelo utilizado para su cálculo, el modelo Br.I.M. donde se recoge la documentación de su

proyecto y fabricación o construcción y un repositorio donde se recogen también los datos tomados por los sensores que monitorizan el puente, la importancia del gemelo digital es que además de permitir fácilmente el acceso a toda la información sobre el puente debe retroalimentar los modelos de predicción de daño que se hayan establecido para así recalibrarlos.

5. CONCLUSIONES:

Las ventajas de usar SGP en la gestión de puentes son claras:

Mayor seguridad: Al proporcionar un marco sistemático para la inspección, la evaluación de condiciones y planificación del mantenimiento los SGP ayudan a prevenir fallos en los puentes y garantizar la seguridad de los usuarios.

Mantenimiento optimizado: los SGP permiten una asignación más eficiente de los recursos de mantenimiento al priorizar las intervenciones basadas en el estado real de los puentes asegurando que los recursos se dirijan a aquellos que necesitan atención inmediata.

Centralización y acceso a los datos: un sistema de gestión de datos proporciona un repositorio centralizado y actualizado de toda la información de los puentes haciéndola fácilmente accesible los distintos departamentos que intervienen tanto en la explotación como en su gestión. La integración de los datos de los puentes monitorizados permite recalibrar los modelos de predicción del deterioro y ajustar mejor los plazos en los que actuar.

Prolongación de la vida útil: de los puentes ya que el mantenimiento proactivo impulsado por los SGP extiende la vida útil de los puentes reduciendo la necesidad de operaciones de reemplazo costosas o trabajos de rehabilitación muy importantes (importante contribución a la SOSTENIBILIDAD del planeta).

El futuro de los SGP parece encaminarse a integrar los datos de los sistemas de gestión con

los de la monitorización (SHM) para mediante el estudio de la respuesta dinámica de las estructuras evaluar su respuesta y realimentar el sistema. La Inteligencia Artificial generativa será una gran ayuda para realizar estas tareas que conllevan el manejo de millones de datos. El gran reto seguirá siendo que los datos introducidos en los SGP sean lo más fiables y objetivos posibles.

Referencias

- [1] Casas J.R. & Sobrino J.A. "La evaluación y gestión de estructuras en servicio: ¿Un arte o una técnica?" *Hormigón y Acero*. 43 v 184 (1992). 41–50.
- [2] Brighenti, F.; Caspani, V.F.; Costa G.; Giordano P.F.; Limongelli M.P.; Zonta "Bridge management systems : A review on current practice in a digitizing world" (2024) *Engineering Structures* 321
- [3] Tyvoniuk, V.; Trach, R.; Wierzbivski T. Bridge "Management Systems: an Overview and Comparison" (2024) *Acta Sci. Pol. Architectura*
- [4] Samec, V.; Coelho M.; Morgenthal, G.; Shim, C. (2014) "Bridge Management Systems- a crucial link to BIM", *LABSE Congress Nanjing 2022*
- [5] Abdallah, A.M.; Atadero, R.; Ozbek, M.E. "A Comprehensive Uncertainty-Based Framework for Inspection Planning of Highway Bridges." *Infrastructures* 2021, 2, 27
- [6] "Guía para la Realización de Inspección. Principales de Obras de Paso en la Red de Carreteras del Estado" 2013.D. General Carreteras. Min Fomento. España
- [7] Woodward, R.J (Coordinador) "Bridge management in Europe" (2001), *BRIME European Project*.
- [8] Mirzaei, Z.; Adey, B.T.; Klatter et al. "Overview of existing Management Systems." *THE LABMAS BRIDGE MANAGEMENT COMMITTEE* 2014
- [9] Wang, J.; Houcheng L., et al. "Automatic identification method of bridge structure damage area based on digital image." (2023) Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences
- [10] PIARC TECHNICAL COMMITTEE 3.3 ASSET MANAGEMENT "Bim And Digitalization In Road Asset Management" 2024.
- [11] Correal, J.F. Muñoz, E. Toro, et al. "Development of a new bridge management system for Colombia" *Proceedings of the 11 International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS 2022)*