UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS**

DEPARTAMENTO MECÁNICA DE MEDIOS CONTINUOS Y TEORÍA DE ESTRUCTURAS

Tesis Doctoral

Sistemas de Gestión de Puentes

**Optimización de estrategias de
mantenimiento**

**Implementación en redes locales
de carreteras**

Realizada por:

Javier Martínez Cañamares

Ing. de Caminos, Canales y Puertos

Director de tesis:

Miguel Ángel Astiz Suárez

Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos

Tribunal nombrado por el Mgfco. y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día de de 20....

Presidente D.

Vocal D.

Vocal D.

Vocal D.

Secretario D.

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día

de de 20....

en

Calificación

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

A mis padres, Alfonso y Encarnación,
por inculcarme conceptos de constancia, esfuerzo y fe

A mis hermanos, Alfonso, Encarnación y Francisco,
por ofrecerme siempre su apoyo, en momentos importantes

A mi mujer, Patricia,
por aguantar tantas horas de convivencia entregadas al conocimiento

A mis hijos, Arturo y Camino,
por desprender siempre alegría, imaginación y cariño

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo del presente trabajo se ha llevado a cabo en uno de los peores momentos en el contexto socioeconómico de la historia reciente de España.

«En los momentos de crisis, solo la imaginación es más importante que el conocimiento». Así planteaba Albert Einstein la manera de actuar en situaciones de adversidad.

De la misma manera, afirmaba: «no podemos resolver problemas pensando de la misma manera que cuando los creamos».

Por tanto, debemos revisar los conceptos que, válidos e interesantes en un determinado contexto histórico, hoy puedan empezar a quedar fuera del marco de las necesidades y exigencias que la sociedad nos pide a los responsables de la gestión de las obras civiles creadas en el transcurso del tiempo.

En consecuencia, adaptémonos, cambiemos la mentalidad, revisemos los conceptos y conocimientos que se imparten en las distintas escuelas de ingeniería, y sobre todo, como se destacaba en la frase anteriormente mencionada “utilicemos la imaginación” por encima de todo.

La realidad no es inerte. Vive, cambia y exige que quien quiera subirse a ella, se adapte. En países como España, con un desarrollo en infraestructuras más que destacado, que nos ha llevado a ser referentes mundiales en diversos ámbitos de la ingeniería civil, tenemos un claro ejemplo de la necesidad de evolución de los esfuerzos que a partir de ahora tendremos que hacer en el campo de la formación, conocimiento y desarrollo de la profesión ingenieril.

¿Acaso en las escuelas no tendrán que comenzar a plantearse temarios que incluyan gran parte de la carga lectiva referida a materias de gestión, mantenimiento y conservación de la vasta cantidad de infraestructuras que los alumnos encontrarán en su posterior actividad profesional?

¿Acaso la terrible crisis económica soportada no nos ha enseñado a exigir a nuestra clase política que se realice una gestión adecuada de los recursos, evitando actuaciones de obra pública innecesarias, que han dejado gran parte de la importante e ingente tarea de conservación del patrimonio sin hacer?

¿No habrá llegado el momento de comenzar a plantear otro enfoque para la profesión del ingeniero de caminos, que integre además de las indudables dotes de capacidad de cálculo y resolución de actuaciones de obra nueva (necesaria para el desarrollo de actuaciones pendientes en nuestro país y la internacionalización de nuestras empresas del sector) otras directrices en el marco de la gestión?

Por ello, sin lugar a dudas, ha llegado el momento de reinventarse, adaptarse al nuevo escenario económico-social, y comenzar a distribuir nuestros esfuerzos en este campo de la gestión, mantenimiento, conservación y rehabilitación.

Este camino, no se andará solo. Será un trabajo del conjunto de la sociedad.

De la misma manera, la presente tesis doctoral, ha sido posible gracias a la contribución de muchas personas que han compartido su tiempo, conocimientos, ilusión, inquietudes y vivencias conmigo.

Gracias al Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid, en especial a D. Javier León González, por su crítica constructiva y apoyo en la fase final de la revisión del documento.

Gracias a mi tutor y director de tesis, el Dr. Miguel Ángel Astiz Suárez, por guiarme adecuadamente en la investigación, y aconsejarme en cada momento la mejor opción de trabajo. Comparto totalmente el comentario que en una de las reuniones con expertos en la materia objeto de la tesis, el Dr. Javier León González me realizó acerca de D. Miguel Ángel: “es muy difícil encontrar una persona que consiga congeniar la capacidad, conocimientos y experiencia que posee con la humildad, compañerismo y honestidad que muestra con todo el mundo”.

Gracias a los profesores, compañeros y amigos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid, tanto en la fase inicial de formación como en la etapa del periodo de docencia. Francisco Díaz, Francisco Ponce, Pedro Gutiérrez, Francisco Galayo, José Manuel Horcajo, Pablo Fernández y tantos otros compañeros que pasaron a ser amigos con el tiempo compartido, las vivencias y el cariño ofrecido. Aunque la vida nos ha encaminado por las diferentes opciones y quizás hoy el contacto es más esporádico, allá donde estéis, tendréis siempre un hueco en mi corazón.

Gracias a los técnicos de la Consejería de Fomento de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha, por el apoyo en la aplicación práctica de la investigación.

Gracias a Juan Luis Ortiz, la máxima expresión del ingeniero de caminos, sin artificios ni excentricidades, puro conocimiento y raciocinio. Tan buen profesional como amigo, agradezco tu gran apoyo en aquellas materias de la investigación en las que me has aportado luz en el camino.

Gracias a Jorge A. López, Bernabé Briones, Tomás Navarro y Daan Stoop, por la importante etapa profesional compartida en aquella empresa, de cuyo nombre no quiero acordarme.

Gracias a Antonio N. Albal, por tu espíritu de lucha diaria reflejada en esta aventura empresarial en la que me acogiste, Proyecta 79, S.L. y que hoy sirve de base del desarrollo profesional de varias personas. También mi agradecimiento a los miembros del Colectivo DU.

Gracias a todos los miembros de mi familia, mis padres, Alfonso y Encarnación, mis hermanos, Alfonso, Encarnación y Francisco, mi tía Celia, mis suegros y cuñados, mi mujer, Patricia y mis hijos, Arturo y Camino. De diversas maneras y en diferentes ocasiones, habéis sido mi punto de apoyo, mi guía, mi serenidad, mi ilusión, mi dedicación, mi fe, mi constancia.

Finalmente, a todos aquellos que no he nombrado, pero que habitan en lo más profundo de mis sentimientos por haber forjado con los momentos compartidos el crisol de principios y convicciones que forman parte de mí.

RESUMEN

En la actualidad, y en consonancia con la tendencia de “sostenibilidad” extendida a todos los campos y parcelas de la ciencia, nos encontramos con un área de estudio basado en la problemática del inevitable deterioro de las estructuras existentes, y la gestión de las acciones a realizar para mantener las condiciones de servicio de los puentes y prolongar su vida útil. Tal y como se comienza a ver en las inversiones en los países avanzados, con una larga tradición en el desarrollo de sus infraestructuras, se muestra claramente el nuevo marco al que nos dirigimos. Las nuevas tendencias van encaminadas cada vez más a la conservación y mantenimiento, reduciéndose las partidas presupuestarias destinadas a nuevas actuaciones, debido a la completa vertebración territorial que se ha ido instaurando en estos países, entre los que España se encuentra.

Este nutrido patrimonio de infraestructuras viarias, que cuentan a su vez con un importante número de estructuras, hacen necesarias las labores de gestión y mantenimiento de los puentes integrantes en las mismas. Bajo estas premisas, la tesis aborda el estado de desarrollo de la implementación de los sistemas de gestión de puentes, las tendencias actuales e identificación de campos por desarrollar, así como la aplicación específica a redes de carreteras de escasos recursos, más allá de la Red Estatal.

Además de analizar las diversas metodologías de formación de inventarios, realización de inspecciones y evaluación del estado de puentes, se ha enfocado, como principal objetivo, el desarrollo de un sistema específico de predicción del deterioro y ayuda a la toma de decisiones.

Este sistema, adicionalmente a la configuración tradicional de criterios de formación de bases de datos de estructuras e inspecciones, plantea, de forma justificada, la clasificación relativa al conjunto de la red gestionada, según su estado de condición.

Eso permite, mediante técnicas de optimización, la correcta toma de decisiones a los técnicos encargados de la gestión de la red.

Dentro de los diversos métodos de evaluación de la predicción de evolución del deterioro de cada puente, se plantea la utilización de un método bilineal simplificado envolvente del ajuste empírico realizado y de los modelos markovianos como la solución más efectiva para abordar el análisis de la predicción de la propagación del daño.

Todo ello explotando la campaña experimenta realizada que, a partir de una serie de “fotografías técnicas” del estado de la red de puentes gestionados obtenidas mediante las inspecciones realizadas, es capaz de mejorar el proceso habitual de toma de decisiones.

Toda la base teórica reflejada en el documento, se ve complementada mediante la implementación de un Sistema de Gestión de Puentes (SGP) específico, adaptado según las necesidades y limitaciones de la administración a la que se ha aplicado, en concreto, la Dirección General de Carreteras de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha, para una muestra representativa del conjunto de puentes de la red de la provincia de Albacete, partiendo de una situación en la que no existe, actualmente, un sistema formal de gestión de puentes.

Tras un meditado análisis del estado del arte dentro de los Capítulos 2 y 3, se plantea un modelo de predicción del deterioro dentro del Capítulo 4 “Modelo de Predicción del Deterioro”. De la misma manera, para la resolución del problema de optimización, se justifica la utilización de un novedoso sistema de optimización secuencial elegido dentro del Capítulo 5, los “Algoritmos Evolutivos”, en sus diferentes variantes, como la herramienta matemática más correcta para distribuir adecuadamente los recursos económicos dedicados a mantenimiento y conservación de los que esta administración pueda disponer en sus partidas de presupuesto a medio plazo.

En el Capítulo 6, y en diversos Anexos al presente documento, se muestran los datos y resultados obtenidos de la aplicación específica desarrollada para la red local analizada, utilizando el modelo de deterioro y optimización secuencial, que garantiza la correcta asignación de los escasos recursos de los que disponen las redes autonómicas en España. Se plantea con especial interés la implantación de estos sistemas en la red secundaria española, debido a que reciben en los últimos tiempos una mayor responsabilidad de gestión, con recursos cada vez más limitados.

Finalmente, en el Capítulo 7, se plantean una serie de conclusiones que nos hacen reflexionar de la necesidad de comenzar a pasar, en materia de gestión de infraestructuras, de los estudios teóricos y los congresos, hacia la aplicación y la práctica, con un planteamiento que nos debe llevar a cambios importantes en la forma de concebir la labor del ingeniero y las enseñanzas que se imparten en las escuelas.

También se enumeran las aportaciones originales que plantea el documento frente al actual estado del arte.

Se plantean, de la misma manera, las líneas de investigación en materia de Sistemas de Gestión de Puentes que pueden ayudar a refinar y mejorar los actuales sistemas utilizados.

SUMMARY

In line with the development of "sustainability" extended to all fields of science, we are faced with the inevitable and ongoing deterioration of existing structures, leading nowadays to the necessary management of maintaining the service conditions and life time extension of bridges. As per the increased amounts of money that can be observed being spent in the countries with an extensive and strong tradition in the development of their infrastructure, the trend can be clearly recognized. The new tendencies turn more and more towards conservation and maintenance, reducing programmed expenses for new construction activities, in line with the already well-established territorial structures, as is the case for Spain.

This significant heritage of established road infrastructure, consequently containing a vast number of structures, imminently lead to necessary management and maintenance of the including bridges. Under these conditions, this thesis focusses on the status of the development of the management implementation for bridges, current trends, and identifying areas for further development. This also includes the specific application to road networks with limited resources, beyond the national highways.

In addition to analyzing the various training methodologies, inventory inspections and condition assessments of bridges, the main objective has been the development of a specific methodology. This methodology, in addition to the traditional system of structure and inspection database training criteria, sustains the classification for the entire road network, according to their condition. This allows, through optimization techniques, for the correct decision making by the technical managers of the network.

Among the various methods for assessing the evolution forecast of deterioration of each bridge, a simplified bilinear envelope adjustment made empirical method and Markov models as the most effective solution to address the analysis of predicting the spread of damage, arising from a "technical snapshot" obtained through inspections of the condition of the bridges included in the investigated network.

All theoretical basis reflected in the document, is completed by implementing a specific Bridges Management System (BMS), adapted according to the needs and limitations of the authorities for which it has been applied, being in this case particularly the General Highways Directorate of the autonomous region of Castilla-La Mancha, for a representative sample of all bridges in the network in the province of Albacete, starting from a situation where there is currently no formal bridge management system.

After an analysis of the state of the art in Chapters 2 and 3, a new deterioration prediction model is developed in Chapter 4, "Deterioration Prediction Model". In the

same way, to solve the optimization problem is proposed the use of a singular system of sequential optimization elected under Chapter 5, the "Evolutionary Algorithms", the most suitable mathematical tool to adequately distribute the economic resources for maintenance and conservation for mid-term budget planning.

In Chapter 6, and in the various appendices, data and results are presented of the developed application for the analyzed local network, from the optimization model, which guarantees the correct allocation of scarce resources at the disposal of authorities responsible for the regional networks in Spain. The implementation of these systems is witnessed with particular interest for the Spanish secondary network, because of the increasing management responsibility, with decreasing resources.

Chapter 7 presents a series of conclusions that triggers to reconsider shifting from theoretical studies and conferences towards a practical implementation, considering how to properly conceive the engineering input and the related education.

The original contributions of the document are also listed.

In the same way, the research on the Bridges Management System can help evaluating and improving the used systematics.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Origen y motivación de la investigación.....	2
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Estructura general de la tesis.....	5

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1. Antecedentes y reseñas históricas	10
2.2. Concepto de Sistema de Gestión de Puentes (SGP)	12
2.3. Estado actual de la implementación de SGP	14
2.4. Identificación de conceptos generalmente aplicados en SGP	17
2.5. Modelos de predicción del deterioro	23
2.5.1. Deterioro. Origen y cuantificación.....	23
2.5.2. Predicción evolución del deterioro	24
2.5.3. Modelos de predicción del deterioro	24
2.5.3.1. Físicos o mecanicistas	24
2.5.3.2. Probabilísticos.....	28
2.5.3.2.1. Función ratio de fallo	28
2.5.3.2.2. Procesos estocásticos.....	28
2.5.3.2.3. Variación del índice de fiabilidad	29
2.5.3.2.4. Modelo Markoviano	30
2.5.3.3. Empírico-deterministas.....	33
2.5.3.4. Inteligencia Artificial	41
2.6. Técnicas de optimización. Tendencias y aplicaciones en SGP	45
2.7. Descripción de los principales SGP utilizados.....	53
2.8. Referencias al área de estudio dentro del <i>fib</i> Model Code 2010 ..	55
2.9. Análisis crítico del estudio del estado del arte de los SGP	60

2.10. Resumen del límite del conocimiento y el salto inexplorado que supone el trabajo de investigación realizado	66
--	-----------

CAPÍTULO 3. INVENTARIO, INSPECCIONES Y ESTADO DE CONDICIÓN

3.1. Definición y mantenimiento de inventarios	72
3.1.1. Concepto y aplicación	72
3.1.2. Elementos constitutivos: datos esenciales del inventario...	73
3.2. Propuesta específica de inspección ajustada a los medios disponibles en redes locales de escasos recursos	76
3.2.1. División de la inspección en los principales componentes constitutivos del puente	78
3.2.2. Alcance, profundización y sistematización de la inspección	80
3.2.2.1. Tipos de inspección. La inspección principal como núcleo central de los sistemas de gestion.....	80
3.2.2.2. Sistematización: periodos entre inspección y protocolo.....	87
3.2.2.3. Alcance y desarrollo de la inspección	91
3.2.2.3.1. Inspección de la subestructura	91
3.2.2.3.2. Inspección de los aparatos de apoyo	96
3.2.2.3.3. Inspección de la superestructura	97
3.2.2.3.4. Inspección de los equipamientos.....	100
3.2.2.4. Objetividad del proceso. Catálogo de daños	100
3.3. Estado de condición de los puentes	102
3.3.1. Concepto.....	102
3.3.2. Evaluación y clasificación.....	103
3.4. Puntos críticos de los componentes del puente.....	104
3.5. Condición de crítico de la estructura	107

3.6.	Plan de mantenimiento. Alcance de operaciones programadas	113
3.7.	El caso particular de la gestión de puentes en las concesiones ..	115

CAPÍTULO 4. MODELO DE PREDICCIÓN DEL DETERIORO

4.1.	Introducción.....	120
4.2.	Desarrollo del modelo estocástico	122
4.3.	Modelo empírico-determinista	126
4.4.	Consideración de los defectos de diseño y ejecución.....	126
4.5.	Modelo de deterioro de los componentes principales.....	128
4.6.	Comparación con otras propuestas	140
4.7.	Modelo de deterioro de los componentes secundarios.....	142
4.8.	Influencia de otros factores.....	143
4.9.	Análisis de riesgos.....	145
4.9.	Aspectos innovadores del modelo planteado	146

CAPÍTULO 5. OPTIMIZACIÓN DE ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO

5.1.	Base metodológica	150
5.2.	Estructura	151
5.3.	Sistemas auxiliares	151
5.3.1.	Valoración del estado de conservación	151
5.3.2.	Modelo de deterioro	154
5.3.3.	Costes de reparación	155
5.3.4.	Impacto de las reparaciones	156
5.3.5.	Costes de gestión	158
5.3.6.	Costes de usuario.....	159
5.4.	Modelo integrado de optimización	163
5.5.	Optimización a Nivel de Puente	165
5.5.1.	Implantación 1 ^{er} nivel	167

5.5.2. Técnicas de optimización 1 ^{er} nivel	172
5.5.3. Resultados 1 ^{er} nivel.....	179
5.6. Optimización a Nivel de Red.....	181
5.6.1. Implantación 2º nivel.....	183
5.6.2. Técnicas de optimización 2º nivel.....	184
5.7. Informe de resultados	185
5.8. Resumen, resultados y aspectos originales	186

CAPÍTULO 6. APLICACIÓN DEL MODELO SGP-CLM

6.1. Definición de la campaña de campo.....	192
6.2. Aplicación del SGP-CLM	197
6.3. Análisis de resultados obtenidos en la implementación	200
6.4. Reflexiones prácticas de la aplicación al caso real	207

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES, APORTACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

7.1. Conclusiones	218
7.2. Aportaciones originales al estado del conocimiento.....	228
7.3. Futuras líneas de investigación.....	232

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bibliografía	236
--------------------	-----

ANEXOS

ANEXO A: FICHAS DESCRIPTIVAS PRINCIPALES SGP IMPLANTADOS

ANEXO B: FICHAS DE INVENTARIO

ANEXO C: APLICACIÓN DE CRITERIOS CONDICION DE CRÍTICO

ANEJO D: FICHAS DE INSPECCIONES

ANEJO E: CODIFICACIÓN Y CATÁLOGO DE DAÑOS

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1.	Imágenes “Silver Bridge” en servicio. Christian, 2010	10
2.2.	Imágenes “Silver Bridge” tras el colapso. Ratay y Christian, 2010	11
2.3.	Esquema de la conexión origen del fallo estructural e inspecciones “post-mortem”. Christian, 2010	11
2.4.	Concepto de vida útil y su gestión. León González, Javier, 2008...	13
2.5a.	Grado de implantación mundial de sistemas de gestión de puen- tes.	15
2.5b.	Grado de implantación red comarcal y local de sistemas de gestión de puentes	16
2.6.	Distribución sistemas de gestión/administración gestora. IABMAS Bridge Management Committee 2010	16
2.7.	Esquema general común a los principales SGP implementados ...	17
2.8.	Modelo Simplificado del tiempo de avance de la Corrosion por Carbonatacion. Cobo Escamilla, Alfonso	26
2.9.	Fases de iniciación y propagación según modelo de Tuutti, 1982.	27
2.10.	Gráfica evolución fiabilidad y variables aleatorias asociadas. Frangopol et al, 2001	30
2.11.	Esquema de Modelo de Deterioro de Markov. Brime, 2001	32
2.12.	Dispersión de algunos modelos empíricos internacionales. P. Panetsos, S. Lambropoulus, TRA, Paris, 2014.....	34
2.13.	Curvas de deterioro. Efectos de reparación y refuerzo. Miyamoto, A. Japón, 2009.....	35
2.14.	Curvas de deterioro pavimento. FHWA/IN/JTRP-2008/30, 2009 ..	36
2.15.	Curvas de deterioro plataformas metálicas. FHWA/IN/JTRP- 2008/30, 2009	36

2.16. Curvas de deterioro superestructura de hormigón. FHWA/IN/JTRP-2008/30, 2009	37
2.17. Curvas de deterioro subestructura de hormigón. FHWA/IN/JTRP-2008/30, 2009	37
2.18. Curvas de deterioro superestructura de acero. FHWA/IN/JTRP-2008/30, 2009	38
2.19. Curvas de deterioro plataforma de hormigón. Lidón Masiá, Manuel. 2014	39
2.20. Curvas de deterioro plataforma de acero. Lidón Masiá, Manuel. 2014	39
2.21. Curvas de deterioro superestructura de hormigón. Lidón Masiá, Manuel. 2014	40
2.22. Curvas de deterioro superestructura de acero. Lidón Masiá, Manuel. 2014	40
2.23. Curvas de deterioro subestructura de hormigón. Lidón Masiá, Manuel. 2014	40
2.24. Curvas de deterioro subestructura de acero. Lidón Masiá, Manuel. 2014	41
2.25. Red neuronal artificial. Abhishek Kar, 2008	42
2.26. Mecanismo de funcionamiento Backward Prediction Model. Jaeho Lee, 2008.....	43
2.27. Resultados satisfactorios de la aplicación BMP. Jaeho Lee, 2008 .	44
2.28. Resultados erróneos de la aplicación BMP. Jaeho Lee, 2008	44
2.29. Diagrama de funcionamiento de las técnicas de optimización	45
2.30. Esquema funcional de los algoritmos genéticos.....	48
2.31. Gestión de conservación, ciclo de vida y registro según <i>fib</i> Model Code 2010	56

2.32. Esquema funcional proceso de gestión ciclo de vida según <i>fib</i>	
Model Code 2010.....	57
3.1. Adaptación componentes principales de los puentes según NBI	
EEUU, 1995	78
3.2. Organización conceptual inspecciones de un sistema de gestión .	86
3.3. Esquema teórico solape de curvas de deterioro de componentes	
de puente.....	88
3.4. Recorrido inspección parte inferior Fase 1. Guía para la realización	
de inspecciones principales RCE, 2012	89
3.5. Recorrido inspección parte inferior Fase 2. Guía para la realización	
de inspecciones principales RCE, 2012	89
3.6. Recorrido inspección parte inferior Fase 3. Guía para la realización	
de inspecciones principales RCE, 2012	89
3.7. Recorrido inspección parte inferior Fase 4. Ministerio de Fomento,	
2012	90
3.8. Recorrido inspección parte inferior Fase 5. Ministerio de Fomento,	
2012	90
3.9. Recorrido inspección parte superior Fase 6. Ministerio de Fomen-	
to, 2012.....	91
3.10. Importancia de un movimiento en cimentación según tipología.	
León González, J. 2007	92
3.11. Zonas de inspección en estribos. Defectos más frecuentes. Del	
Cuvillo, R. et al, 1988	95
3.12. Zonas de inspección en pilas. Defectos más frecuentes. Del Cuvillo,	
R. et al, 1988	96
3.13. Zonas de inspección en superestructura. Defectos más frecuentes.	
Del Cuvillo, R. et al, 1988	99

3.14. Diferenciación de cimentaciones críticas – no críticas en la misma estructura	105
3.15. Estadística de las principales causas de colapso de puentes. Muñoz, E. y Sebastián D., 2011.....	111
3.16. Esquema de relaciones entre labores de inspección y mantenimiento. Leon Gonzalez, Javier. Guía para la redacción del Plan de mantenimiento, 2014	113
4.1. Modelos de deterioro	121
4.2. Ejemplo de ajuste del modelo de deterioro a las observaciones	124
4.3. Campaña de inspecciones, índices de estado de la plataforma ..	127
4.4. Campaña de inspecciones, índices de estado de la superestructura	128
4.5. Campaña de inspecciones, índices de estado de la subestructura	128
4.6. Modelo de deterioro probabilista. Plataforma	129
4.7. Modelo de deterioro probabilista. Superestructura	130
4.8. Modelo de deterioro probabilista. Subestructura.....	130
4.9. Modelo de deterioro exponencial. Plataforma. Puentes sin defectos de ejecución	132
4.10. Modelo de deterioro exponencial. Plataforma. Puentes con defectos de ejecución	132
4.11. Modelo de deterioro exponencial. Superestructura. Puentes sin defectos de ejecución	133
4.12. Modelo de deterioro exponencial. Superestructura. Puentes con defectos de ejecución	133
4.13. Modelo de deterioro exponencial. Subestructura. Puentes sin defectos de ejecución	134

4.14. Modelo de deterioro exponencial. Subestructura. Puentes con defectos de ejecución	134
4.15. Modelo de deterioro envolvente. Plataforma. Puentes sin defectos de ejecución.....	137
4.16. Modelo de deterioro envolvente. Plataforma. Puentes con defectos de ejecución	137
4.17. Modelo de deterioro envolvente. Superestructura. Puentes sin defectos de ejecución	138
4.18. Modelo de deterioro envolvente. Superestructura. Puentes con defectos de ejecución	138
4.19. Modelo de deterioro envolvente. Subestructura. Puentes sin defectos de ejecución	139
4.20. Modelo de deterioro envolvente. Subestructura. Puentes con defectos de ejecución	139
4.21. Modelo de deterioro plataforma. Comparación con otras propuestas	141
4.22. Modelo de deterioro superestructura. Comparación con otras propuestas	141
4.23. Modelo de deterioro subestructura. Comparación con otras propuestas	142
4.24. Modelo de deterioro componentes secundarios	142
4.25. Influencia tipo de puente. Plataforma.....	143
4.26. Influencia tipo de puente. Superestructura	144
4.27. Influencia tipo de puente. Subestructura	144
4.28. Influencia intensidad de tráfico en red Indiana Department of Transportation. Componente Tablero Metálico	145

4.29. Representación de la tolerabilidad del riesgo mediante el modelo del semáforo. Fuente: International Risk Governance Council, 2006	146
4.30. Identificación de conceptos comunes a las curvas de deterioro invetigadas.....	147
5.1. Estructura del modelo de optimización (adaptada de Elbehairy, 2007)	152
5.2. Costes de reparación de los componentes	155
5.3. Deterioro de plataformas metálicas. Bolukbasi et al., 2006	157
5.4. Impacto de las reparaciones.....	158
5.5. Niveles en la toma de decisiones de SGP. Herzagy et al., 2004... 	164
5.6. Esquema del modelo integrado de optimización	165
5.7. Esquemmatización del análisis a Nivel de Puente.....	168
5.8. Módulo de entrada de datos	169
5.9. Obtención de costes de reparación	170
5.10. Evolución del deterioro	171
5.11. Selección del año de análisis	171
5.12. Menú de entrada de parámetros de Solver.....	172
5.13. Ejemplos de óptimos locales y globales en el espacio factible....	174
5.14. Proceso de un algoritmo genético. Lin et al., 1996.....	175
5.15. Ejemplo de función de costes directos	179
5.16a.Estructura de resultados de la optimización a Nivel de Puente..	180
5.16b.Estructura de resultados de la optimización a Nivel de Puente..	180
5.17. Esquemmatización de la optimización a Nivel de Red	181
5.18. Interfaz de usuario de la optimización a Nivel de Red	184
5.19. Tabla de evolución de IEP	185
5.20. Gráfico de evolución de IEP	185

5.21. Tabla de evolución de IEC	186
5.22. Gráfico de evolución de IEC	186
5.23. Tabla de costes de reparación	187
5.24. Gráfico de costes de reparación	187
6.1. Resumen Red Autonómica Carreteras Castilla-La Mancha 2015.	192
6.2. Zonificación Red Autonómica Provincia de Albacete	194
6.3. Ubicación estructuras introducidas en el SGP	197
6.4. Menú de inicio herramienta SGP-CLM	198
6.5. Pantalla de introducción de datos.....	200
6.6. Ajuste del modelo de deterioro.....	201
6.7. Efectos de los defectos de ejecución	202
6. 8. Solución del Problema a Nivel Puente, para el año 2.017.....	202
6.9. Solución del problema a Nivel de Red	203
6.10. Comparación de índices de estado de los componentes.....	203
6.11. Evolución de estado de condición a lo largo planificación	204
6.12. Distribución de operaciones de reparación e inversión	205
6.13. Costes reparación puentes integrales y el resto.....	206
6.14. Comparación estado de condición puentes integrales y resto....	206
6.15. Filtraciones en paramentos de estribo por falta de impermeabilización de juntas.....	208
6.16. Efectos en componentes principales debidos a la ineficaz impermeabilización de la junta en estribo	208
6.17. Deterioros en aparatos de apoyo próximos a la finalización de su vida útil	209
6.18. Socavación de cimentación de muros de acompañamiento	209
6.19. Implantación y materialización inadecuada de imbornales	210
6.20. Afección sistemática a vigas de borde y losa.....	210

6.21. Deterioros habituales en culatas de vigas	211
6.22. Asiento de losas de transición reflejado en pavimento y aceras	211
6.23. Descalce de elementos sustentados en terraplén de acceso	212
6.24. Importante grado de deterioro en estribo flotante	212
6.25. Deterioros frecuentes dentro de las juntas	213
6.26. Elementos de contención fuera de reglamentación y deterioros por impacto	213
6.27. Proceso global de la vida útil de un puente. Insostenibilidad de detalles hipercríticos	215

ÍNDICE DE TABLAS

2.1.	Principales Sistemas de Gestión de Puentes-I	54
2.2.	Principales Sistemas de Gestión de Puentes-II	55
3.1.	Períodos habituales aplicados a las inspecciones de puentes.....	87
3.2.	Deterioros habituales en elementos de cimentación.....	93
3.3.	Deterioros habituales en estribos de puentes.	94
3.4.	Deterioros habituales en pilas de puentes.....	95
3.5.	Deterioros habituales en aparatos de apoyo.	97
3.6.	Deterioros habituales en tableros de hormigón armado y pretensa- do.....	98
3.7.	Deterioros habituales en equipamientos.	100
3.8.	Asignación de valoración según el tipo de cauce interceptado...	108
3.9.	Asignación de valoración según categoría de tráfico soportada.	109
3.10.	Asignación de valoración según el tipo de ambiente	109
3.11.	Asignación de valoración según recorridos alternativos	110
3.12.	Asignación de pesos de los factores de jerarquización	111
3.13.	Condiciones de contono para nuestro SGP según Condiciones de Crítico Pseudoestáticas.....	112
3.14.	Diferentes tipos de operación en concesión de conservación y mantenimiento	116
4.1.	Modelo de deterioro exponencial definido.....	131
4.2.	Modelo de deterioro envolvente definido	136
5.1.	Sistema de valoración de estado. FHWA, 1989	153
5.2.	Pesos relativos de los componentes. Yanev, 1997	154
5.3.	Costes reparación de los componentes principales. Seo, 1994 ...	155
5.4.	Impacto de las opciones de reparación. Seo, 1994	157

5.5. Valores de C1 según el tipo de vía	160
5.6. Valores de C3	160
5.7. Porcentajes de vehículos desviados por limitaciones de carga. Sinah, K. et al., 2007	161
5.8. Porcentajes de vehículos desviados por gálibo insuficiente. Sinah, K. et al., 2007	162
5.9. Modificación propuesta en el sistema de valoración. Pesos de los componentes	190

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y

OBJETIVOS

1.1. Origen y motivación de la investigación

La gestión de infraestructuras, y en concreto de las estructuras que forman parte de ellas, es un campo de reciente creación y gran auge en los últimos años, despertando el interés de los investigadores y gestores de la red viaria, tanto en naciones desarrolladas como en las que comienzan a emerger.

En los países desarrollados, con grandes activos en materia de infraestructuras, hay una fuerte necesidad de implementar sistemas de gestión, con el fin de mantener el buen funcionamiento de todos los puentes construidos dentro del conjunto de la red gestionada. Por su parte, en los países en vías de desarrollo, debido a la escasez de recursos, se insta a implementar tecnologías adaptadas a los medios disponibles, con programas de gestión que apuntan hacia el desarrollo sostenible y la satisfacción de la demanda, ajustada al rápido crecimiento económico de alguno de ellos.

Independientemente de las diferencias entre las necesidades de los diversos países, la disciplina de la gestión de infraestructuras contiene muchos conceptos análogos dentro de la amplia gama de sistemas utilizados.

El conjunto de la red de infraestructuras de una sociedad moderna abarca, a su vez, diferentes sistemas definidos por sus propias características distintivas y enfoques de gestión, ajustados a los recursos disponibles, normalmente relacionados directamente con la jerarquía preestablecida de la red. Además, la gestión de infraestructuras plantea unos objetivos finales en términos de asignación óptima del presupuesto disponible, seleccionando aquellas acciones que mantienen a los elementos del conjunto de la red gestionada en la mejor de las situaciones durante el transcurso de la vida útil, minimizando el nivel de deterioro de los puentes, garantizando además las condiciones de seguridad y funcionalidad exigibles.

Por ello, varias son las cuestiones que motivan un estudio minucioso y particularizado del problema: ¿cómo podemos determinar una asignación óptima del presupuesto asignado al mantenimiento y conservación?, ¿cuál es la estrategia más adecuada para la gestión de infraestructuras a corto, medio y largo plazo? y ¿qué metodología debemos utilizar para maximizar el valor de las acciones de mantenimiento a llevar a cabo?

La respuesta a estas preguntas se ha ido centrando en la investigación del análisis de modelos de predicción de la evolución del deterioro y los métodos de optimización. Los investigadores han estado tratando de formular modelos que puedan ser usados para predecir el proceso de deterioro de un sistema de infraestructuras específico. Además, al emplear técnicas que tienen en cuenta los costes y metodologías de evaluación fruto de investigaciones de acciones de mantenimiento y conservación, los modelos de predicción pueden ampliarse para incorporar técnicas de evaluación de

presupuesto y tareas de gestión. Como resultado, se busca la óptima asignación del presupuesto disponible y la mejor estrategia de mantenimiento/reparación que pueda ser alcanzada.

Los métodos evolutivos para la optimización de la gestión de las infraestructuras han sido ampliamente documentados en la investigación llevada a cabo en la presente tesis, resolviendo el fracaso de las técnicas clásicas que si bien pueden ser aptas en otras áreas de la ingeniería, no tienen cabida en las tareas de optimización de ayuda a la toma de decisiones de estrategias de gestión de puentes. Los estudios recientes se centran principalmente en la formulación y la aplicación de modelos de deterioro de Cadenas de Markov, sobre todo en sistemas de gestión de firmes (SGF) y sistemas de gestión de puentes (SGP), campo de aplicación este último en el que se centra nuestro estudio. Si bien pueden reportar un interesante punto de partida que tenga en cuenta la aleatoriedad del proceso, no entendemos el desprecio hacia los métodos empíricos que algunos sistemas de gestión plantean, y cuya comparación y complementación pueden mejorar considerablemente la previsión de las curvas de deterioro.

Los modelos de evaluación del estado del puente y la valoración de su evolución, dependen, en gran medida, del mecanismo de deterioro estructural y los datos de seguimiento obtenidos en las campañas de inspección realizadas. Cada componente del sistema de la red de puentes investigada puede tener un mecanismo de deterioro estructural diferente a la de otros, a causa de las diferencias en las características estructurales, historia del puente, normativa de referencia, sistema constructivo de la época y condiciones ambientales en las que se encuentre. Estas diferencias también generan dificultades en el proceso de seguimiento del estado de los puentes gestionados. Por tanto, hemos considerado importante centrarnos en la formulación de los modelos de deterioro calibrados para cada conjunto de estructuras con características comunes. Para la ayuda a la toma de decisiones, tanto el tamaño del problema a resolver como la obtención de la mejor alternativa de actuación, nos llevaría ineludiblemente a la necesidad de un apoyo computacional a través de métodos de optimización, y su aplicación específica al conjunto de la red en la que se implementa el sistema de gestión de puentes.

1.2. Objetivos

Primordialmente, el objetivo de la presente tesis doctoral consiste en el desarrollo particularizado de un sistema de gestión de puentes aplicado a un conjunto de estructuras de una red viaria existente capaz de evaluar el deterioro y su evolución, y servir de apoyo a la toma de decisiones mediante la optimización de los recursos económicos disponibles, en función de la clasificación del estado de condición de los puentes, llevada a cabo mediante las tareas de inspección e inventariado previo. Para dotar de un valor añadido a la investigación, se propone un novedoso modelo de

predicción que conjuga las virtudes de los métodos estocásticos con las de los empíricos, planteando un sistema simplificado bilineal envolvente de las curvas obtenidas por ambos ajustes para cada uno de los componentes y poblaciones de históricos, tipologías, proceso constructivo, etc. También se introduce un inédito método secuencial de optimización a partir de técnicas matemáticas basadas en algoritmos evolutivos. De la misma manera, se desarrollan los módulos completos que un sistema de gestión de última generación debe plantear, con una exposición integral de la metodología de creación de un sistema desde su inexistencia hasta su máximo nivel de desarrollo, nunca antes reflejado en publicaciones técnicas, que suelen centrarse en cada una de las partes específicas del proceso global de gestión. Finalmente, se realiza una implementación del sistema de gestión de puentes al caso real de la red de carreteras comarcales de la provincia de Albacete, dependientes de la Consejería de Fomento de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha, donde se obtienen los datos experimentales que sirven de base para la calibración de nuestros modelos de predicción y ayuda a la toma de decisiones, así como se plantean revisiones a conceptos internacionalmente aceptados recogidos en guías y recomendaciones, que bajo nuestro criterio, pueden ser objeto de mejora en el futuro.

La investigación lleva implícita una serie de pasos intermedios, de necesario cumplimiento para la consecución global del objetivo general de la tesis anteriormente mencionado:

- Identificación, análisis y estudio pormenorizado de las diferentes herramientas de gestión de puentes existentes, para tener una idea clara del estado del arte.
- Plantear una planificación y formato de inspección de puentes, de manera homogénea y sistematizada, que sirva como referencia de la entrada de datos, clasificando el estado de cada una de las estructuras de manera relativa al conjunto de la red, atribuyendo a diversos puentes de la red la condición de críticos en función de características estratégicas y de índice de estado.
- Apoyo a estas inspecciones mediante la correcta identificación de puntos críticos relativos a cada puente y sus componentes, y elaboración de catálogos de daños que eliminen cualquier mínimo grado de subjetividad del proceso de parametrización numérica de partida.
- Una vez introducido en el sistema el estado de condición de cada puente, se planteará un interesante y original modelo de predicción de la evolución de dicho estado, mediante ajuste de envolventes a las curvas empíricas y estocásticas obtenidas, simplificándolo del lado de la seguridad mediante un modelo bilineal de evolución del deterioro. Este modelo simplificado cobra gran sentido al plantear la posterior resolución matemática del proceso de optimización de soluciones a las estrategias de mantenimiento y conservación.
- Analizar las diferentes herramientas de optimización existentes, determinando cuál de ellas se puede adaptar mejor a la red particular estudiada, conociendo

los medios disponibles de la administración responsable. En este paso ineludible, se desarrollará un innovador sistema que encadena una doble optimización secuencial mediante algoritmos evolutivos, con una total flexibilidad respecto a variables de decisión a nivel de componente del puente y de la red, así como en periodos de planificación, restricciones presupuestarias, condiciones de contorno por condición de crítico y ajuste a criterios de selección en base a determinaciones políticas.

- Desarrollo de la herramienta informática sobre la que se plasmará en diversos módulos cada uno de los elementos principales del sistema de gestión; en concreto se definirán cuatro módulos; inventario, inspecciones, ayuda a la toma de decisiones y extractos e informes.

1.3. Estructura general de la tesis

La tesis ha sido estructurada intentando mantener un índice secuencial, que vaya desarrollando cada uno de los bloques expuestos de manera coherente, encadenada y pedagógica, para ayudar a la comprensión global de la línea de investigación desarrollada.

El documento, en términos generales, consta de 7 capítulos, referencias bibliográficas y anexos. De manera específica, el contenido de cada uno de los apartados se resume en:

- El **Capítulo 1 “Introducción y Objetivos”** describe los antecedentes del estudio, su motivación y los objetivos perseguidos en la tesis.
- El **Capítulo 2 “Análisis del Estado del Conocimiento”** trata de recopilar la información existente en materia de sistemas de gestión de puentes, obteniendo una visión global del estado del conocimiento, las herramientas utilizadas, el alcance y las tendencias.
- El **Capítulo 3 “Inventario, Inspecciones y Estado de Condición”** aborda la sistemática de las inspecciones a realizar como “input” al sistema de gestión, diferenciando las tipologías, alcance y resultados a obtener en cada una de ellas. Además se define el término de “Estado de Condición”, comúnmente utilizado como parámetro para la clasificación relativa del nivel de degradación de cada puente que integra la red estudiada. Se introducen conceptos de gran interés como las inspecciones principales, pilares del conjunto del sistema. También se analiza la condición de crítico de un puente sobre la red en la que se enmarca, así como la definición de puntos críticos, asociados a elementos de la estructura que pueden condicionar el proceso de evolución del deterioro.
- El **Capítulo 4 “Modelo de predicción del deterioro”** desarrolla la metodología utilizada en los métodos estocásticos y empíricos, obteniendo un modelo específico a partir de los datos de la campaña experimental realizada, con un

ajuste realizado con la simplificación mediante un sistema bilineal envolvente a las curvas exponenciales utilizadas en la aproximación empírica y las obtenidas mediante los modelos markovianos. Todo ello, evaluado para los diferentes componentes que forman parte del puente, así como para cada una de las poblaciones que se desprenden de los análisis de sensibilidad realizados, y que coinciden con grupos de estructuras ejecutadas en un contexto histórico-normativo similar, con intensidades de tráfico, ambientes y condiciones de contorno equivalentes.

- El **Capítulo 5 “Optimización de estrategias de mantenimiento”** profundiza los métodos de ayuda a la toma de decisiones, orientados a la aplicación en materia de ingeniería de conservación y mantenimiento de estructuras, definiendo de manera justificada, para el caso concreto de la presente tesis doctoral, el sistema seleccionado para la optimización de los recursos para redes viarias con presupuestos muy ajustados, justificando su elección frente a otras alternativas.
- El **Capítulo 6 “Aplicación del modelo SGP-CLM”** muestra el funcionamiento del sistema de gestión específico desarrollado para la red de carreteras local estudiada a partir del inventariado, las inspecciones de campo realizadas, el análisis de la evolución del deterioro, las restricciones aplicadas y los sistemas de optimización estudiados.
- El **Capítulo 7 “Conclusiones, aportaciones y futuras líneas de investigación”** resume las principales conclusiones extraídas del estudio realizado, mostrando nuestra propuesta que contrasta con algunos puntos de consenso alcanzados en la comunidad científica mundial. Por su parte, se realiza una justificación de las aportaciones originales que nuestra propuesta supone, como paso innovador e inexplorado. Por último, se analizan aquellas líneas de investigación que quedan abiertas para futuros estudios.

Adicionalmente, y no por ello menos importante, pero con el criterio de mantener la secuencia lógica de la investigación planteada en el índice general, se introducen, a modo de anexos, diversos aspectos de interés dentro de la tesis:

- El **Anexo A “Fichas descriptivas principales SGP implantados”** realiza una síntesis de los principales sistemas de gestión implementados en el mundo, describiendo las características principales y el esquema funcional de cada uno de ellos.
- El **Anexo B “Fichas de inventario”** plantea las fichas de inventario de cada uno de los puentes de la red comarcal de la Consejería de Fomento en Albacete que han sido investigados de manera específica para el desarrollo del documento.
- El **Anexo C “Condición de crítico”** determina las prioridades dentro de la red de puentes estudiada, bajo criterios de condición de crítico por motivos de solicitudes de tráfico, existencia e importancia de cauce interceptado, tipo

de ambiente al que está sometido, rutas alternativas, importancia histórica-patrimonial e índice de condición.

- El **Anexo D “Fichas de inspección”** plantea las fichas de inspección principal de cada uno de los puentes de la red comarcal de la Consejería de Fomento en Albacete que han sido investigados de manera específica para el desarrollo del documento.
- El **Anexo E “Catálogo de daños”** enumera los deterioros más habituales objeto de revisión en cada uno de los componentes de las estructuras, así como proponen algún ejemplo ficha tipo de daño, de tal forma que un inspector tenga codificado el listado de incidencias habituales sin necesidad de establecer su propia denominación, tendiendo de esta manera hacia la máxima objetividad de las inspecciones principales, en las que se deberá añadir al código preestablecido del daño la intensidad, accesibilidad, extensión y afección a otros componentes, que dependerá de las características particulares de la estructura y del propio deterioro.

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS DEL ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1. Antecedentes y reseñas históricas

En general, las necesidades de los trabajos de mantenimiento y conservación han ido creciendo en todos los países desarrollados con redes de infraestructuras importantes. En principio, estas labores estaban enfocadas desde el punto de vista de resolver problemas de la estructura ya deteriorada, mediante reparaciones y acciones puntuales, para pasar, actualmente, en los sistemas de gestión más desarrollados, a tratarse de labores preventivas que eviten llegar a la situación de degradación última de la estructura, en la cual se disparan los costes de adecuación.

Aunque la inquietud por la creación de inventarios y clasificaciones de las obras públicas se remonta a fechas anteriores, un hecho particular se podría tomar como referencia en el origen de lo que hoy conocemos como “Sistemas de Gestión de Puentes (SGP)”. Se trata del colapso el 15 de Diciembre de 1967 del puente “The Silver Bridge” en Ohio, Estados Unidos, que provocó más de 40 víctimas mortales, y que hizo reflexionar a las autoridades del país acerca de la importancia de las labores de inspección y gestión de las infraestructuras.

Figura 2.1. – Imágenes “Silver Bridge” en servicio. Christian, 2010

Si bien, tras las correspondientes investigaciones posteriores a la tragedia, se determinó que la causa principal del siniestro fue el desarrollo de una fisura a través de un proceso de corrosión bajo tensión, también se estableció que otras circunstancias pudieron estar en el origen de la debacle. Por ejemplo, se estimó que las cargas a las que el puente había estado solicitado en servicio eran superiores a las que sirvieron como base de diseño. Además, se determinó que la calidad del material utilizado no correspondía a las exigencias necesarias y que no existía un grado de redundancia en la estructura que permitiese tener cierto grado de seguridad frente al fallo de algunas conexiones. Finalmente, y en conexión con la importancia que pretendemos reseñar en el presente trabajo de las labores de seguimiento y conservación de puentes, se puso de manifiesto la dificultad para realizar trabajos de inspección de los bulones que formaban parte de la estructura, desencadenándose, lamentablemente, los hechos anteriormente relatados en uno de estos elementos.

Figura 2.2. – Imágenes “Silver Bridge” tras el colapso. Ratay y Christian, 2010

Figura 2.3. – Esquema de la conexión origen del fallo estructural e inspecciones “post mortem”. Christian, 2010

Por ello, se realizó una revisión profunda del estado de sistematización y estandarización de los procesos de seguimiento de los puentes de la red norteamericana, culminando en la creación del “National Bridge Inspection Program (NBIP)”, junto al “National Bridge Inventory”, génesis del posterior desarrollo de los sofisticados sistemas de gestión de puentes utilizados en EEUU, como el caso del PONTIS, implementado en 45 estados, y exportado a otros países europeos.

En Europa, a pesar de contar con países con redes de carreteras y ferrocarriles muy antiguas, como Francia e Inglaterra, los sistemas de gestión han sido implantados hace relativamente poco tiempo, comenzando en Inglaterra a principios de los sesenta y en 1978 en Francia.

En esos mismos años, la OCDE impulsó una serie de trabajos en diversos países para dotar de la importancia necesaria a las labores de gestión de puentes.

En España, el inicio de la toma de contacto con la gestión de puentes se realiza mediante la redacción del primer inventario de puentes de carretera (1985), siendo Ramón del Cuvillo, en la Dirección General de Carreteras, uno de los principales precursores del conocimiento en materia de inventariado e inspecciones.

Posteriormente, entre los años ochenta y noventa, una serie de países fueron implementando sus sistemas de gestión de puentes, en algunos sistemas desarrollados específicamente a tal fin, y en otros utilizando sistemas desarrollados comercialmente y adaptados para su uso en cada lugar.

Recientemente, en Europa, se desarrolló un ambicioso proyecto para plantear las bases comunes del conocimiento en materia de gestión de puentes, formando una comisión de expertos denominada BRIME (Bridge Management in Europe), en el que participan Francia, Alemania, Noruega, Eslovenia, España y el Reino Unido, el cual tuvo por objetivo el desarrollo de un sistema marco para el mantenimiento de los puentes de la red europea de carreteras.

A pesar de los grandes avances conseguidos en los antecedentes referenciados, queda una gran tarea por delante, para que los sistemas de gestión se extiendan más allá de las redes principales, llegando a redes de segundo orden y locales. También hay grandes parcelas de estudio en materia de métodos de optimización de recursos dedicados al mantenimiento y conservación, que permitan la ayuda a la toma de decisiones. De la misma manera, se debe reflejar en herramientas informáticas todo el conocimiento teórico, de manera sencilla, intuitiva y eficaz.

2.2. Concepto de Sistema de Gestión de Puentes (SGP)

El progresivo aumento de los fondos para el mantenimiento y conservación de puentes se debe aplicar de una manera eficiente, buscando la toma de decisiones basadas en los aspectos técnicos y económicos, teniendo también en cuenta los factores sociales y ambientales.

La gestión de puentes se define, por tanto, como el conjunto de acciones a llevar a cabo para garantizar la seguridad y calidad de servicio de las estructuras gestionadas y optimizar el uso de recursos disponibles. No obstante, esta gestión no debe limitarse a la fase de servicio del puente, y debe establecerse tan pronto como sea posible, preferiblemente en la fase de diseño, proyecto y ejecución.

Los sistemas de gestión de puentes, según se puede extraer de las aplicaciones desarrolladas en los diferentes países que ya los tienen implementados, se plantean como herramientas cada vez más desarrolladas como resultado de la evolución de las computadoras y su capacidad de procesamiento. Generalmente presentan una estructura modular, con una serie de elementos comunes, que forman los siguientes módulos básicos:

- Inventario
- Inspección y evaluación

- Apoyo a las decisiones y la gestión. Matrices de decisión
- Catálogo de daños

Estos sistemas deben ayudar al gestor a tomar decisiones basadas en la información recopilada durante las inspecciones y determinación de la condición de los puentes, simulando varios escenarios de acción para poder predecir el nivel de conservación futuro de cada elemento y optimizar los recursos económicos para realizar acciones que prolonguen la vida útil de los puentes de la red y mantengan un nivel de servicio adecuado. En la siguiente figura se muestra esquemáticamente el planteamiento conceptual de los efectos de la aplicación de estrategias de conservación en mantenimiento, frente a políticas de no inversión:

Figura 2.4. – Concepto de vida útil y su gestión. León González, Javier, 2008

Los modelos de evolución del deterioro futuro de elementos plantean una previsión de la degradación, basándose en diferentes teorías probabilísticas. Hay modelos deterministas, modelos según evolución planificada de daños o probabilístico, basado en el estado actual del elemento y probabilidad de una tasa predeterminada de deterioro en el tiempo y modelos de valoración de costes que tienen en cuenta un análisis económico a lo largo del ciclo de vida de los puentes gestionados.

Los sistemas de gestión de puentes deben aportar criterios objetivos para determinar en qué momento compensa tomar la decisión de llevar a cabo medidas de conservación, teniendo en cuenta los beneficios de la inversión y los riesgos de que los deterioros puedan crecer con el tiempo y suponer costes de reparación mucho más elevados.

Por tanto, aunque no es tarea sencilla, pues siempre hay un cierto condicionamiento del contexto económico por el que pueda atravesar la administración gestora, que pudiera tener que restringir el gasto por debajo de límites que garantizaran la optimización de las labores de gestión, se proponen las siguientes etapas generales descritas en diferentes metodologías de sistemas de gestión de puentes:

- 1º. Definición de los elementos estándar en un puente
- 2º. Inventario y creación de una base de datos de puentes y elementos existentes.
- 3º. La identificación mediante labores de inspección de puentes de las anomalías de cada elemento y el desarrollo modelos para predecir el futuro deterioro.
- 4º. Desarrollo de acciones de conservación y mantenimiento para cada conjunto de elementos y cada una de las tipologías de anomalía detectadas.
- 5º. Desarrollo de modelos de optimización y toma de decisiones.

En general, existe un avance importante, llevado a cabo en los últimos años en países desarrollados, en lo que a las etapas de inventariado y creación de bases de datos se refiere, existiendo lagunas y líneas de acción pendientes en lo que se refiere a las etapas finales de implementación de sistemas de gestión (modelos de predicción y toma de decisiones), siendo esta última la línea de investigación que ayudará a la optimización de los recursos disponibles, como culminación del desarrollo de la técnica en cuanto a gestión, conservación y mantenimiento de los puentes.

2.3. Estado actual de la implementación de SGP

Los planteamientos de los sistemas de gestión están siendo llevados a la realidad en los últimos años, no sin las dificultades propias de las partidas presupuestarias cada vez más restrictivas en materia de conservación y mantenimiento, lo que dificulta su eficacia y la posibilidad de realizar las actuaciones necesarias que pudiesen mejorar el estado general de los puentes. Se puede observar en la figura adjunta la distribución de países que de una manera u otra han implementado sistemas de gestión de puentes, integrados, generalmente, en los sistemas de gestión globales de la infraestructura a la que pertenecen, aunque no siempre existe esta relación.

Se representan las capitales de los países que han llevado a cabo el proceso de desarrollo de normativas y recomendaciones respecto a los criterios mínimos de creación de inventarios, pautas para las inspecciones y criterios para la toma de decisiones. En todos los casos se trataría de datos referidos a redes de primer orden de carreteras y ferrocarriles, principalmente estatales.

Figura 2.5a. – Grado de implantación mundial de sistemas de gestión de puentes

En el caso de España, existe una aplicación bastante generalizada de los SGP en lo que se refiere a la Red de Carreteras de Alta Capacidad y RIGE, mediante la contratación a empresas especializadas en gestión de estructuras del sector privado de la actualización de la herramienta que el Ministerio de Fomento tiene implantada para la gestión global de sus puentes, dividiendo el territorio en sectores homogéneos ajustados a las Demarcaciones de Carreteras de la Administración Central próximas entre sí. Lo mismo ocurre con la gestión que se realiza a nivel de puentes de ferrocarril, optando el ente público gestor de la red (ADIF, a fecha de elaboración del presente trabajo) por una externalización sectorizada de los trabajos de inventariado, inspecciones y valoración del estado de las estructuras gestionadas. Todo ello conlleva a que en la actualidad existan más de veinticuatro mil puentes de la Red de Carreteras del Estado, dependientes del Ministerio de Fomento sobre los que se ha implementado el sistema de gestión de puentes, y más de seismil puentes en lo que se refiere a las líneas de ferrocarril.

No obstante, aunque más ligado a la distribución interna de cada país en comunidades y subdivisiones territoriales específicas, gran parte de las estructuras pertenece a estas redes de segundo y tercer orden, correspondientes a la gestión comarcal y provincial, y en muchos casos, el estado de implementación de los sistemas de gestión experimenta

una acusado abandono, estando dirigido en esta dirección el enfoque del caso real estudiado en la presente tesis.

Figura 2.6. – Distribución sistemas de gestión/Administración gestora.
IABMAS Bridge Management Committee 2010

Se puede observar, en la siguiente figura, como el estado de implementación en estos niveles de red secundaria en España está lejos del grado de avance existente en otros países europeos:

Figura 2.5b. – Grado de implantación red comarcal y local de sistemas de gestión de puentes

Se desprende de los estudios y publicaciones unas conclusiones de gran importancia relacionadas con el abandono de la aplicación de estos sistemas de gestión en jeraquías medias y bajas de la red, sirviendo de punto de partida para la justificación de la necesidad de continuar trabajando en el desarrollo e implantación de estos sistemas a todos los niveles (desde la R.I.G.E. hasta el último escalón municipal ó local), adoptando los medios disponibles en cada una de las administraciones.

2.4. Identificación de conceptos generalmente aplicados en SGP

En el presente apartado se definen una serie de conceptos que, tras el análisis de los diferentes sistemas de gestión utilizados, podrían resumir los puntos en común entre dichas herramientas, y las tendencias generales de estudio e investigación.

De manera sintética, se puede establecer el siguiente esquema, que muestra el fundamento general de gran parte de los SGP, sus etapas, funcionamiento y tratamiento evolutivo de la información, con retroalimentación, como sistema en continua actualización:

Figura 2.7. – Esquema general común a los principales SGP implementados

Inventarios

Se trata del punto de partida de todo SGP, sustentación y base del resto de fases y procesos que nutren al sistema, y garantizan la optimización de prioridades. Históricamente, como se comenta en anteriores apartados, ha sido el germen de los actuales SGP, promovidos en países con un nivel de desarrollo considerable, en los cuáles la preocupación por las labores de conservación, mantenimiento y explotación han ido ganando terreno a la dedicación plena que en otros países en vías de desarrollo y emergentes, se centra principalmente en la obra de nueva construcción.

No se comprende, por tanto, la gestión de un conjunto de puentes de la red sin tener el adecuado conocimiento del patrimonio que debemos gestionar, definiendo inicialmente qué puentes forman parte de los activos de la red. De manera general, todos los sistemas recogen un número mínimo de datos que caracterizan la estructura de manera formal, más o menos sistematizada, con la ayuda de herramientas informáticas y medios auxiliares cada vez más sofisticados, aunque en esencia, se trata de reflejar, de manera lo más precisa posible, la siguiente información:

- Carretera a la que pertenece
- Calzada
- P.K. en el que se encuentra
- Tipología
- Distancia entre paramentos verticales de estribos
- Número de pilas
- Altura aproximada de las pilas
- Foto general
- Clave de inventario

Además, para complementar la información, en algunos inventarios de SGP más avanzados, se recopilada la siguiente documentación adicional:

- Proyecto constructivo y todas las posibles modificaciones realizadas en obra.
- Datos del control de calidad de materiales llevado a cabo en la fase de ejecución, así como toda la información complementaria de relevancia.
- Prueba de carga antes de la puesta en servicio.
- Informes realizados a partir de los diferentes tipos de inspección (básica, principal y especiales).
- Actuaciones de mejora o reparación llevadas a cabo.

La realidad es que, en la actualidad, la mayoría de las administraciones locales, tanto en España como en el resto de países desarrollados, no tienen todavía implementado

un inventario actualizado (en muchos casos ni siquiera está creado). Aún así, en muchos casos se está aprovechando las campañas de inspecciones principales para que sirvan a su vez como origen de la creación de estos inventarios en redes secundarias (si no existen), y a la vez, se va evaluando la seguridad de cada una de las estructuras y mejorando la información existente (en caso de tener un inventario inicial con deficiencias). No obstante, los inventarios no son estáticos, ya que necesitan un mantenimiento y actualización constante para poder ser útiles, dependiendo el correcto funcionamiento de los SGP de la periódica alimentación de datos.

Jerarquización de la red: importancia del puente correlativo a la red

Gran parte de los sistemas de gestión parten de un estado inicial o estado 0 a partir del cuál las estructuras evolucionan, pudiendo aparecer diferentes daños, detectados durante las posteriores campañas de inspección. De manera independiente, en función de las características de cada puente, se suelen establecer unos índices o pesos correlativos que determinan, en el caso ideal de llevar a todos los elementos individuales a su origen de construcción, sin defectos iniciales ni daños producidos, la importancia relativa de cada puente dentro del conjunto correspondiente a la totalidad de la red. Por tanto, se trataría de una clasificación previa, en función de parámetros tales como:

- Tipología del puente
- Intensidad Media Diaria (IMD)
- Importancia del itinerario
- Rutas alternativas
- Clase de exposición
- Existencia de cauce
- Valor histórico-patrimonial

Se trata, por tanto, de una jerarquización de la red gestionada, que permite a los sistemas de gestión preestablecer unas prioridades en la distribución de recursos, que integre también los valores añadidos que cada estructura proporciona de manera individual al funcionamiento del conjunto de la red.

Realización de inspecciones: evaluación de daños y su evolución

Común a cualquiera de los sistemas de gestión aplicados es la tarea relativa a las inspecciones de puentes. Reconocidas con diferente denominación y con algún matiz de diferenciación en los niveles de alcance según el país, la administración o la aplicación utilizada, se pueden establecer, de manera general, los siguientes tipos de inspección, reconocidas en la mayor parte de la literatura técnica, normativas y recomendaciones existentes:

- ***Inspección básica o rutinaria***

Se trata del primer escalón dentro de las inspecciones, realizado por el personal encargado de la conservación rutinaria de la carretera (no necesariamente especializado en el ámbito estructural, pero convenientemente instruido mediante nociones básicas al respecto) en la que se encuentra ubicada la estructura, siendo de carácter visual, intentando detectar problemas de importancia urgentes de manera precoz, sin tener que esperar a niveles superiores de inspección, que podrían acarrear un empeoramiento del problema con el transcurso de tiempo. Son materializadas mediante fichas básicas, adjuntas a las de conservación integral de la red gestionada.

- ***Inspección principal***

Realización de trabajos basados en una campaña sistematizada en mayor o menor medida, muchas veces con un intervalo entre inspecciones establecido mediante una planificación integrada dentro de la estrategia de gestión de la red, ajustada a los medios humanos y técnicos disponibles. De la misma manera que la básica o rutinaria, se realiza mediante una inspección visual, llevada a cabo en este caso, necesariamente, por personal especialista dirigidos por un ingeniero con profundos conocimientos estructurales, en patologías y áreas geológico-geotécnicas. Aunque no siempre es posible, pues muchos sistemas de gestión se están implementando años después de la puesta en servicio de los puentes, todos los estudios y reflexiones plantean la necesidad de marcar un punto de partida de la estructura, en paralelo a la propia prueba de carga, previamente a su puesta en servicio, con una inspección principal en origen, que puede detectar problemas no achacables a los procesos de deterioro, pudiendo dejar a la vista problemas de la ejecución o del propio diseño. Algunos sistemas de gestión, como el caso español, ajustado a los criterios de inspección recopilados en la “Guía para la realización de inspecciones principales de obras de paso en la Red de Carreteras del Estado” del Ministerio de Fomento, va un paso más allá y define el término de Inspección Detallada como un caso particular de la Inspección Principal, dentro del cual se engloba un conjunto de estructuras que por sus características requieren unos medios auxiliares para la realización de la inspección extraordinarios (pasarelas inspección, plataformas, barcas, etc.).

El resultado de cada inspección principal se refleja en una posterior ficha, que además de plantear una radiografía del estado de la estructura en el momento de la realización, nos proporcionará una valoración de su estado, de manera correlativa con respecto al resto de los puentes de la red gestionados. Como se planteaba anteriormente, la mayoría de los sistemas de gestión determinan la

periodicidad de su realización en función de los medios disponibles, aunque como parece lógico, tienen en cuenta las excepciones producidas por informes de urgencia o alerta establecidos en el nivel inferior de inspección básica, que puede concluir con la recomendación de adelantar la inspección principal por razones de seguridad.

- **Inspección especial**

Aunque pueden formar parte del sistema de gestión, suelen ser el paso previo a labores de rehabilitación, reparación o refuerzo de la estructura, debido a que se trata de trabajos singulares que estudian deterioros importantes. En ocasiones son fruto de la conclusión de algún tipo de inspección de las mencionadas anteriormente (básicas o principales), aunque hechos accidentales pueden forzar a la necesidad de abordar este tipo de inspección, sin responder, por tanto, a una periodicidad preestablecida.

Requieren de un equipo técnico multidisciplinar, cualificado y altamente especializado en materias estructurales, geotécnicas y de análisis del deterioro de materiales. No es suficiente una campaña visual, ya que debemos conseguir una caracterización cuantitativa completa del puente para su posterior evaluación, recurriendo habitualmente a pruebas y ensayos destructivos o semidestructivos, mediante la realización de catas, testigos y otras pruebas relacionadas con la durabilidad, que nos reportan una radiografía de gran nitidez del estado de la estructura en ese momento.

La dirección de los trabajos requiere de un ingeniero jefe con amplia experiencia que sea capaz de planificar los trabajos de campo a realizar, y a su vez disponga de conocimientos estructurales y de gestión suficientes para aunar los esfuerzos del equipo de personas lideradas.

De esta manera, comúnmente, se resume la información obtenida en la campaña de campo en un informe denominado generalmente como de caracterización y evaluación, antesala de posteriores trabajos de proyectos de rehabilitación y reparación, en función de la importancia y nivel de gravedad de los daños y deterioros detectados.

Esta tipología de inspección puede llegar a tener tal cantidad de casuística y necesidad de profundizar en la estructura de manera particularizada, que no se suele englobar dentro de los módulos de los sistemas de gestión, aunque parte de los datos previos (proyectos, datos de la obra, informes de inspección, etc.) y los resultados de las operaciones de reparación forman parte de dicho

sistema, conformando los módulos de inventario e inspección por una parte, y los de biblioteca de daños y costes de reparación por otra.

Toma de decisiones: optimización recursos disponibles

Se trata de una de las características más importantes de los sistemas de gestión de puentes, y que podrían establecer una diferenciación en el estado del arte en dos hitos de desarrollo; el primero englobaría el desarrollo de las herramientas de gestión antes de comenzar a introducir algoritmos y funciones automatizadas que ayudan al usuario o técnico responsable a tomar decisiones, y el segundo hito, que correspondería a la fase en la que los sistemas más sofisticados, con el paso del tiempo, comienzan a utilizar técnicas de optimización de recursos para la toma de decisiones.

Inicialmente, la perspectiva de cualquier sistema de gestión centraba sus esfuerzos en la realización de un inventario de puentes de la red, cada vez entrando más en detalle, y con la recopilación de mayor número de parámetros. Paulatinamente, las inspecciones de nivel básico y principales van formando parte de los sistemas, además de los inventarios, constituyendo un verdadero historial clínico del puente, desde su creación hasta el estado de la fotografía en tiempo real que suponen las actualizaciones de las labores de inspección. El criterio de decisión de cómo repartir los recursos disponibles para mejorar el estado del parque de estructuras, de manera eficiente en mayor o menor medida, se realizaba (y aún los sistemas menos sofisticados los siguen haciendo) mediante métodos manuales, utilizando criterios puramente ingenieriles.

Posteriormente, como punto de partida hacia la gestión inteligente, se introduce la utilización de procesos automáticos que analizan diferentes variables, en función del estado del puente, su importancia, los costos, el tránsito y otros datos de relevancia. Se extraen una serie de directrices y parámetros que dan lugar a una priorización en las actuaciones a realizar.

Seguimiento de labores de gestión de puentes: retroalimentación y calibración

El proceso, como se reflejaba en la figura 2.4., es cíclico. Por una parte, en base a la implementación de una base de datos activa, desarrollada a partir de los datos obtenidos mediante los inventarios y las inspecciones que forman parte del sistema de gestión. Todo ello nos permite ir identificando situaciones y problemáticas similares acaecidas en diferentes estructuras, estandarizando, en la medida de lo posible, mediante catálogos de daños, las posibles casuísticas de deterioros con las que el gestor de las infraestructuras se puede encontrar. De la misma manera, en base a las campañas de actuaciones de reparación y rehabilitación, podemos elaborar nuestras bibliotecas de costes reales, valorar la idoneidad de las soluciones de mantenimiento llevadas a cabo y evaluar la efectividad de cada inversión.

Todo ello, de cara a la planificación de estrategias en línea de mando, desde una perspectiva técnico-económica, permite que los sistemas de gestión que poco a poco se van implantando, conjuguen una visión global de la conservación y mantenimiento de puentes, retroalimentando y calibrando el sistema según las particularidades y condicionantes específicos de cada red de puentes.

2.5. Modelos de predicción del deterioro

2.5.1. Deterioro. Origen y cuantificación

Como cualquier otro elemento de la carretera o vía objeto de gestión, los puentes sufren un proceso de deterioro a lo largo de su vida útil, por una parte debido al envejecimiento propio, y por otra, como resultado de las acciones externas y solicitudes a las que se ve sometido. Adicionalmente, existen factores previos que pueden condicionar la aparición de problemas en las estructuras, como son:

- Errores o defectos en fase de proyecto, por motivos de poca profundización en materia geotécnica, inadecuado diseño estructural, fallos en conceptos de desagüe y drenaje, falta de juntas o posiciones erróneas, etc.
- Proceso de construcción deficiente, con aparición de posteriores incidencias en el hormigón, armadura, impermeabilización, juntas, elementos accesorios, etc.

Por tanto, el análisis del deterioro de un puente es un proceso complejo, en tanto en cuanto, de manera general, se debe a la ponderación o combinación de diversos factores, no siempre identificables de manera inmediata, y con una considerable distribución en el tiempo, ya que abarca todos los defectos arrastrados desde el diseño hasta el punto del ciclo de su vida útil en el que se realice su valoración.

Aunque en países desarrollados, las etapas de diseño y construcción han ido siendo sometidas a intensos procesos de control de calidad y revisiones especializadas, que han llevado a una optimización del estado de las estructuras en su punto de puesta en servicio, las labores de seguimiento e inspección de la evolución durante el periodo de mantenimiento y conservación no se encuentran totalmente sistematizadas.

Por ello, acotadas en gran medida las fuentes de deterioro provenientes de todo el proceso de ejecución, restaría plantear adecuados sistemas de gestión, con procedimientos de inspección, evaluación y optimización de asignación de recursos, para poder llegar a garantizar el mínimo Coste del Ciclo de Vida (CCV) del conjunto de puentes de la red gestionados.

El deterioro es un proceso asociado de manera inherente a las estructuras, y por tanto, inevitable, aunque los sistemas de gestión tratan de cuantificarlo y controlarlo mediante estrategias de mantenimiento. Sus efectos pueden ser devastadores,

manifestándose en una considerable reducción de sus aspectos funcionales, portantes, confort y seguridad.

2.5.2. Predicción evolución del deterioro

Supone una de las herramientas más útiles implementadas en los SGP más evolucionados, ya que permite, en base a los datos extraídos de las inspecciones realizadas, a partir de un análisis del estado de los puentes en una fase actual, plantear su posible predicción de evolución, facilitando las labores de planificación y optimización de las labores de mantenimiento y gestión.

Diversos estudios plantean explícitamente la importancia del tiempo en la repercusión en los costes de reparación y puesta a punto de las estructuras, por lo que la previsión de la evolución de los deterioros y la correcta aplicación de los medios económicos destinados al mantenimiento en el momento adecuado, suponen una optimización de los recursos disponibles y una garantía de mantener buenas condiciones del uso de la red durante su vida útil.

Como se desarrollará más adelante, comúnmente aceptado es el criterio de la aplicación de una tasa de descuento del 6% para la realización de los cálculos del *Valor Actual Neto (VAN)* en la justificación del Coste del Ciclo de Vida de una estructura, lo que se traduce en una reducción de los costes de mantenimiento de factor $(1,06)^{-n}$, siendo n los años en los que se lleva a cabo alguna actuación de reparación o mantenimiento.

Por su parte, tanto la envergadura de las actuaciones como su coste derivado aumenta de manera desorbitada en función del nivel de deterioro bajo el cuál se planteen las actuaciones de mejora.

El tiempo, por consiguiente, influye directamente en la mayor parte de las variables que intervienen en los procesos de deterioro, tanto en los físicos (acciones, características resistentes, interacción con el terreno, etc.) como en los químicos (corrosión, carbonatación, cloruros, sulfatos, etc.).

2.5.3. Modelos matemáticos de predicción

2.5.3.1. Físicos o mecanicistas

Los métodos mecanicistas pretenden tener un enfoque puramente científico, con un marco teórico suficiente que permita el análisis completo de la mecánica del comportamiento de un elemento estructural ante las acciones ambientales y sollicitaciones. Esto es, un marco teórico en donde las propiedades fundamentales de los materiales se conocen, y se pueden determinar en laboratorio o en campo.

Estos modelos facilitan la predicción correcta de la evolución en el tiempo de los diferentes deterioros que se pudieran presentar y, por tanto, pueden aumentar en gran medida la confiabilidad de los diseños. Sin embargo, actualmente sólo están identificados y justificados algunos de los mecanismos de deterioro asociados a materiales y procesos concretos. En realidad, tan sólo estarían identificados ciertos fenómenos de deterioro de estructuras de hormigón armado como la carbonatación y la corrosión en presencia de iones cloruro.

Como es sabido, el hormigón es un material poroso que permite la penetración del CO₂ del aire a través de sus poros. A partir de aquí, se produce la reacción del CO₂ con la fase líquida intersticial saturada del hidróxido cálcico del hormigón y de los compuestos hidratados del cemento en equilibrio con la fase líquida, formándose carbonato cálcico. En esta reacción, el pH empieza a decrecer y deja de ser un agente protector de la corrosión de armaduras.

El avance del proceso de carbonatación se puede aproximar a la raíz cuadrada del tiempo.

$$X_c = K_c \times \sqrt{t}$$

donde:

X_c : Profundidad de la capa carbonatada (mm)

K_c : Constante de carbonatación (mm/año^{0.5})

t : Tiempo (años)

Esta ecuación se ve condicionada por la humedad del ambiente en el que se encuentre, válida para el caso de humedad baja, ya que en escenarios con humedad alta y valores próximos a la saturación, no se produciría la carbonatación.

En la figura que se muestra a continuación, se puede observar el modelo simplificado de avance del proceso de corrosión por carbonatación, en relación con la concentración de CO₂ y la determinación del pH de la masa de hormigón, determinando una profundidad de avance con el tiempo.

Figura 2.8. – Modelo Simplificado del tiempo de avance de la Corrosión por Carbonatación.
Cobo Escamilla, Alfonso

Otro factor capaz de desatar la corrosión es la presencia de iones despasivantes cloruro, que en una concentración determinada pueden romper las películas de óxido submicroscópicas y continuas, a las cuales se les atribuye la cualidad de pasivar las armaduras, produciendo una corrosión localizada en forma de picaduras. El origen puede ser debido a los propios cloruros añadidos en los aditivos del hormigón, por las sales que provocan el deshielo de la red viaria en episodios de nevadas o porque el propio ambiente los contenga, como sería el caso de las zonas costeras.

Los cloruros penetran a través del agua en superficie hasta las armaduras por los poros, formándose celdas de corrosión catódicas donde se produce un proceso de reducción y un área anódica pequeña, la picadura, donde se disuelve el acero. La concentración de cloruros decrece desde la superficie hacia el interior siguiendo una ley propuesta que responde a la raíz cuadrada del tiempo.

En estos modelos se realiza una estimación de la vida útil de las estructuras de hormigón bajo procesos de corrosión de la armadura pasiva según una división en dos periodos, tal y como propone Tuutti (1982): el primero de ellos corresponde al tiempo de difusión en la masa de hormigón hasta alcanzar un límite de concentración de iones en los alrededores de la armadura y el segundo del tipo de daño estructural, tras la

aparición del óxido. Se identifican como fase de iniciación y de propagación, respectivamente. En la figura que se muestra a continuación se reflejan ambas fases:

Figura 2.9. – Fases de iniciación y propagación según modelo de Tuutti, 1982

La vida útil de una estructura sería la suma del periodo de iniciación hasta un t_0 determinado correspondiente al periodo de iniciación y del periodo de propagación t_1 , entendido como el plazo de tiempo que transcurre desde que la estructura queda desprotegida frente al ataque hasta que se alcanza un cierto umbral de daño aceptable.

La cuantificación de los periodos de iniciación y de propagación (curvas de deterioro) plantea la necesidad de un correcto diagnóstico que se determina mediante la identificación de los mecanismos de deterioro y una suficiente evaluación de los parámetros relevantes de los modelos disponibles, estableciendo de esta manera una relación físico-química entre las variables de partida y la evolución del deterioro con el tiempo.

La pendiente de la recta de deterioro representada para $t > t_0$, en la zona de propagación, depende, entre otras cosas, del mantenimiento. En muchos países, estos modelos físicos que caracterizan algunos de los procesos de deterioro de determinados materiales han sido la base para el planteamiento de la necesidad de conocer el límite funcional y la vida útil de las estructuras. Lógicamente, una interesante línea de investigación sería la identificación de los principales procesos que condicionan la curva global de deterioro de los diferentes componentes de la estructura mediante mecanismos que ligan los parámetros de entrada con la evolución en el tiempo de la estructura, y la combinación entre ellos. Para llegar a proponer un modelo totalmente mecanicista, debemos partir del análisis de multitud de propuestas empíricas que vayan evolucionando hacia un paso intermedio con modelos empírico-mecanicistas, para finalmente establecer una propuesta de mecanismo físico de deterioro.

2.5.3.2. Probabilísticos

De forma general, existen varios modelos matemáticos probabilísticos de predicción de la evolución del deterioro en función del tiempo, comúnmente aceptados en la literatura referente a los sistemas de gestión de puentes:

- 1) Función ratio de fallo
- 2) Procesos estocásticos
- 3) Variación del índice de fiabilidad
- 4) Modelo Markoviano

A continuación se describe cada uno de los modelos, con las bases de partida, aplicaciones y limitaciones.

2.5.3.2.1. Función ratio de fallo

Se trata de la función de distribución de vida de un puente o elemento del mismo, representando la probabilidad de fallo de la misma en función del tiempo. Siendo $F(t)$ la función de distribución de probabilidad, con función de densidad $f(t)$, la función de ratio de fallo $r(t)$ vendrá definida (Barlow y Proschan, 1965) como:

$$r(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)}$$

Siendo $r(t)dt$ la probabilidad de fallo de un elemento en la edad t para el intervalo $[t, t+dt]$.

Este modelo, aplicado con éxito en otros campos de la ingeniería, no se considera el más adecuado para su implementación en sistemas de gestión pues se limita a ofrecer información de un solo dato, la probabilidad de fallo, determinando si existe fallo o no, en función de unos objetivos de partida.

2.5.3.2.2. Procesos estocásticos

En una línea matemática similar al anterior, se encuentran los modelos de deterioro estocásticos, utilizando procesos Gaussiano y Gamma (Van Noortwijk, 1998), referentes a las correspondientes funciones de distribución Gauss y Gamma. Si bien ambos modelos pueden ajustarse adecuadamente al proceso de deterioro, se establece una mayor versatilidad de los procesos Gamma, que al tomar incrementos independientes no negativos, aumentando con el tiempo en una dirección, frente a los Gaussianos (basados en la teoría del movimiento Browniano), en el que las variables de la estructura aumentan y disminuyen alternativamente.

Además, el ajuste de los modelos Gamma a partir de las inspecciones realizadas al puente es relativamente sencillo, ya que se cuantifican incrementos finitos de deterioros detectados, lo que permite su integración en el proceso.

2.5.3.2.3. Variación del índice de fiabilidad

Gran desarrollo y aplicación muestran las denominadas técnicas de fiabilidad, ya que permiten la toma de decisiones del nivel de seguridad de los puentes a partir de datos actualizados de las variables que proporcionan un análisis de la evolución del deterioro con una retroalimentación de parámetros. Estos modelos valoran la seguridad de la estructura como su capacidad portante. De hecho, utilizan modelos que ponen en contraste las variables capacidad-demanda $R-S$, valorando el comportamiento de la estructura, como su nivel de seguridad, en función de su respuesta resistente (R) frente a las solicitaciones (S), bajo diferentes comprobaciones de estado límite a las que puede estar sometido el elemento.

Nivel de seguridad = $R-S > 0$ (sería 0 para la ecuación del estado límite analizado)

Estos modelos interpretan que, tanto las acciones, como las propiedades intrínsecas de la estructura (tipo de material, geometría, interacción con el terreno, etc.) pueden ser consideradas como variables aleatorias, que vendrán definidas por sus correspondientes funciones probabilísticas de distribución y densidad.

Bajo estas premisas, se define la probabilidad de fallo de una estructura según la siguiente expresión:

$$P_f = \text{prob} \{(R-S) < 0\}$$

Frangopol y Das, referentes en el conocimiento de los sistemas de gestión y su base de justificación matemática, plantean como base de partida que gran parte de las actuaciones a llevar a cabo sobre una estructura depende de una disminución de la capacidad portante del elemento, en mayor medida, frente a los problemas que puedan venir derivados de incremento de los niveles de deterioro o gestión insuficiente de las labores de gestión.

De la afirmación de que “puentes con un diseño y proceso de construcción análogos pueden evolucionar en el tiempo de manera diferente, con índices de fiabilidad distintos” (Frangopol y Das, 1999), se puede entender que diversos factores pueden ser modelizados como variables aleatorias. En concreto, establece la necesidad de evaluar ocho variables aleatorias que inciden en la composición del perfil de fiabilidad de una estructura o conjunto de elementos de una red objeto de estudio. Estas se pueden resumir en la siguiente figura (Frangopol *et al*, 2001):

Figura 2.10. – Gráfica evolución fiabilidad y variables aleatorias asociadas. Frangopol et al,2001

Donde:

β_0 : Índice de fiabilidad de partida

t_I : Tiempo inicio del deterioro

α : Ratio deterioro sin actuación mantenimiento

θ : Ratio de deterioro del índice de fiabilidad en periodos mantenimiento preventivo

t_{PI} : Tiempo aplicación mantenimiento preventivo inicial

t_P : Tiempo repetición aplicación mantenimiento preventivo

t_{PD} : Periodo duración efecto del mantenimiento preventivo

γ : Incremento índice fiabilidad debido a labores de mantenimiento

Diversos estudios han tratado de ir identificando y definiendo las funciones de densidad de probabilidad de cada una de las variables para cada una de las tipologías de puentes (hormigón armado, pretensado, mixtos, acero, etc.), lo que permite, en muchos casos, tener una buena aproximación al conocimiento de la evolución global del deterioro de la estructura. Herramientas matemáticas como el método de simulación de MonteCarlo analizan diferentes escenarios aleatorios a partir de las citadas funciones.

Se trata, por tanto, de sofisticados y complejos sistemas estadísticos, que dejan abiertas muchas interesantes líneas de investigación en el campo de la predicción de la evolución del deterioro aplicado en SGP.

2.5.3.2.4. Modelo Markoviano

Aunque se profundizará posteriormente durante el desarrollo del presente trabajo, es importante, para explicar el fundamento del modelo Markoviano, describir previamente la definición de los conceptos de “índice de deterioro” e “índice de estado ó condición de la estructura”. El primero de los conceptos haría referencia a la

cuantificación extraída de los datos de campo obtenidos durante el desarrollo de las inspecciones bajo la aplicación de diferentes criterios propios de cada sistema de gestión para la ponderación de cada uno de los daños detectados. Por su parte, el segundo de los conceptos englobaría la calificación general de conservación del estado del puente, a partir de la determinación de todos los índices de deterioro de la estructura. Adicionalmente, dentro de algunos sistemas de gestión, se incorporan niveles intermedios que permiten extraer índices de estado de elementos específicos del puente (viga n, pila n, cimentación n, etc.) hasta índices de zonas más globales (superestructura, subestructura, elementos accesorios, etc.).

De esta manera, basados en una determinación previa de los estados de condición de cada una de las estructuras a partir de los trabajos de inspección, el Modelo de Markov simplifica el problema planteando que la evolución de dicho estado o índice de condición depende exclusivamente del estado anterior en el que se encuentre el puente y de las acciones de conservación y mantenimiento llevadas a cabo entre estos dos estados, quedando ligada la transición de un estado a otro por medio de una relación probabilística, variable en función de las actuaciones ejecutadas. La probabilidad de evolucionar de cada uno de los deterioros de un estado a otro determina los índices de transición, condicionados por las acciones de mantenimiento, en caso de aplicarlo (existe la posibilidad de no realizar ninguna acción). Se actúa, por tanto, en la línea de análisis de las funciones de distribución de probabilidad, para poder establecer esta relación de probabilidades de transición entre estados, partiendo de la condición obtenida de una inspección y de la acción llevada a cabo.

Se trata, por su versatilidad y ajuste a la realidad, del modelo de predicción del deterioro más utilizado dentro de los planteados. Sin contar con todo el historial de la estructura, permite valorar la probabilidad de transición de un estado a otro, adaptándose a las campañas de inspecciones sistemáticas que suelen formar parte de cualquier sistema de gestión adecuadamente organizado.

A continuación, se plantea de manera conceptual, el planteamiento general del modelo de las cadenas de Markov, que se rigen por un árbol de probabilidad a partir de unos estados iniciales o puntos de partida, coincidentes con los resultados obtenidos de las caracterizaciones previas del estado de las estructuras gestionadas.

Figura 2.11. – Esquema Modelo de Deterioro de Markov. BRIME, 2001

Partiendo de una inspección y de su estado de condición asociado, podemos conocer la probabilidad de pasar a otro estado. Por ejemplo, la probabilidad de que la estructura evolucione a un estado 3 en la inspección número 2 se definiría como:

$$P_{EC=1 \rightarrow EC=3} = p_{12} \times p_{23}$$

De la misma manera, para pasar a un estado 2 en la segunda inspección, la probabilidad sería:

$$P_{EC=1 \rightarrow EC=2} = p_{11} \times p_{12} + p_{12} \times p_{22}$$

Así, globalmente, podríamos establecer la probabilidad de poseer un estado de condición medio en cada uno de los hitos asociados a las inspecciones realizadas. Como ejemplo, dentro del esquema de Cadenas de Markov representado en la anterior figura, estableceríamos dicho estado según la siguiente expresión:

$$C_m = p_{11}^2 + 2 (p_{11} \times p_{12} + p_{12} \times p_{22}) + 3 p_{12} \times p_{23}$$

A partir de estas expresiones, la manera en la que los sistemas de gestión integran las probabilidades de transición consistiría en:

- Determinación de tipología y número de elementos en los que dividir de manera homogénea la estructura.
- Estimación, para cada uno de los grupos establecidos con características similares, de los estados de condición, extraídos a partir de las inspecciones principales llevadas a cabo, estudiando funciones de probabilidad que se

ajusten los más eficazmente posible a las variaciones de dichos estados de conservación con el tiempo. Función de transición de probabilidades del estado de condición medio ($F_{\text{ajuste investigaciones}}$).

- c) Obtención, para diversas fases de la vida del puente, de los estados medios de conservación, utilizando los criterios probabilísticos del método Markoviano ($F_{\text{cadenas Markov}}$).
- d) Introducción de mecanismos y herramientas de optimización que minimicen la diferencia entre $F_{\text{ajuste investigaciones}}$ y $F_{\text{cadenas Markov}}$, para periodos de tiempo fijados previamente.

Por tanto, partiendo de los estados de conservación de cada uno de los grupos homogéneos de elementos en los que podemos dividir el conjunto estructural, para una determinada “fotografía” del elemento individual, en un tiempo “t” concreto, podremos concluir que el modelo markoviano, a partir de las probabilidades de transición óptima ajustadas a la edad del puente, puede pronosticar la evolución del estado futuro de conservación.

2.5.3.3. Empírico-deterministas

Los modelos empírico-deterministas, basan sus propuestas en el análisis de la observación real de la evolución de los deterioros, por lo que en cierto modo, se trataría de la verificación indiscutible de hechos tangibles de los deterioros a través del tiempo, siempre y cuando los datos de partida hayan sido tomados con gran rigurosidad y mediante una sistematización que haga que el proceso no sea un juicio de valor subjetivo, sino que se trate de resultados totalmente coincidentes independientemente de los técnicos que lleven a cabo la valoración del estado de las estructuras. En base a las comentadas observaciones de la propia experiencia, se plantean diversos ajustes matemáticos a partir de los estudios de sensibilidad, que calibran las curvas de evolución del deterioro, pudiendo variar en función del componente, tipología, material, proceso constructivo, agentes externos, etc. Es decir, no tratan de plantear una solución única aplicable a todos los tipos de redes y sistemas, sino que interpretan la realidad de cada una de ellas. Como en todo proceso científico, son la base de futuros desarrollos de modelos físicos-mecanicistas, ya que en algunos casos, podrían plantear el establecimiento de relaciones causa-efecto tras una exhaustiva identificación. En cualquier caso, son la base de estudios en aquellas áreas de la materia que se encuentran en un proceso poco definido y que integra una cantidad de variables difícilmente encadenables, como es el caso de la predicción de la evolución del deterioro de las estructuras.

Figura 2.12. – Dispersión de algunos modelos empíricos internacionales. P.Panetsos, S. Lambropoulus, Transport Research Arena, Paris, 2014

Diversas publicaciones abogan por estos sistemas:

- El investigador japonés Ayaho Miyamoto, propone en su estudio *“Development of lyfe-cycle cost based budget allocation system for bridge group, 2008”* un modelo empírico con incorporación una división de la curva de deterioro en función de la capacidad de carga de la estructura y de la durabilidad de la estructura. En el primero de los componentes (1), se diferencian ajustes como la intensidad de tráfico, material constitutivo y tipología de puente. En el segundo (2), se valora el ambiente al que está sometida. Conformar, por tanto, una herramienta para la determinación de la curva de evolución del deterioro a medio camino entre un modelo puramente empírico y un avance hacia un método mecanicista. La formulación que propone corresponde a una función polinómica de tercer y cuarto grado, con unas constantes particularizadas para cada una de las clasificaciones en las que divide los puentes de la red y el ambiente en el que se encuentran:

$$(1) S_L(t) = f(t) = b_L - a_L t^4$$

$$(2) S_D(t) = g(t) = b_D - a_D t^3$$

donde a_L , b_L , a_D , b_D son constantes tabuladas en el sistema de gestión japonés J-BMS y t el tiempo en años.

Además, incorpora la diferenciación de la evolución de sus curvas de deterioro tras las acciones de mejora y mantenimiento, tal y como se observa en las siguientes figuras:

Figura 2.13. – Curvas de deterioro. Efectos de reparación y refuerzo. Miyamoto, A. Japón, 2009

- Por su parte, dentro del reporte final de la investigación *FHWA/IN/JTRP-2008/30 "Updating and Enhancing the Indiana Bridge Management System (IBMS)"*, se nos muestra los modelos empíricos utilizados por la administración de Indiana para la aplicación de su sistema de gestión, diferenciando por componente, materiales, tipologías y tipo de administración a la que pertenece el puente. Se plantea la siguiente formulación base para pavimento, plataforma, superestructura y subestructura (Kepaptsoglou and Sinha, 2002):

$$Element_Condition = E - \frac{A}{B + C * (Age)^D}$$

donde la condición del elemento depende de unas constantes A,B,C y D y del tiempo en años.

Se muestra, a continuación, la representación de alguna de las curvas del modelo empírico de deterioro planteadas en esta publicación.

Figura 2.14. – Curvas de deterioro pavimento. FHWA/IN/JTRP-2008/30, 2009

Figura 2.15. – Curvas de deterioro plataformas metálicas. FHWA/IN/JTRP-2008/30, 2009

Figura 2.16. – Curvas deterioro superestructura hormigón. FHWA/IN/JTRP-2008/30, 2009

Figura 2.17. – Curva deterioro subestructura hormigón. FHWA/IN/JTRP-2008/30, 2009

Figura 2.18. – Curvas deterioro superestructura acero. FHWA/IN/JTRP-2008/30, 2009

- Otro ejemplo de modelos empíricos es el planteado por los datos publicados en la página web del departamento FDOT (Florida Department of Transportation, <http://www.dot.state.fl.us/>) donde se pone en conocimiento la información más relevante sobre el estado de los puentes desde 1970 hasta el año 2012. A partir de esos datos, diversos investigadores, entre los que se encuentra Manuel G. Lidón Masiá tutelado por el profesor José Casanova Colón, han realizado un interesante trabajo de investigación en la Universidad Politécnica de Valencia titulado “Modelos de deterioro de infraestructuras del transporte. Puentes y Pavimentos” y fecha de elaboración junio de 2014. Se trata de la representación de diversos ajustes empíricos correspondientes a los datos públicos del sistema americano, pudiendo observar que las curvas de deterioro de los componentes de los puentes de esta red se dividen en un tramo inicial de deterioros atribuibles a las condiciones de ejecución y diseño, con una reducción en los primeros años de vida del nivel óptimo a niveles intermedios, donde experimentan una fase de estabilización durante un dilatado periodo, para finalmente, en paralelo a la propagación de los procesos de degradación por durabilidad de los materiales, experimentar una acusada pérdida de nivel de los índices de estado del puente hasta el límite de servicio. A su vez, se realiza un cribado previo de aquellos puentes antiguos en los que se han

llevado a cabo labores de reparación importantes, y cuyo estado de condición mejorado podría alterara la curva de deterioro del proceso natural sin actuaciones, que es lo que se trata de representar. Tras la retirada de los datos que alteran el modelo, se analizan más de 7500 frecuencias de valoración de inspecciones de diferentes tipologías de puentes de la red de Florida. Se representan, a continuación, las curvas planteadas para los componentes principales:

Figura 2.19. – Curva de deterioro plataforma de hormigón. *Lidón Masiá, Manuel. 2014*

Figura 2.20. – Curva de deterioro plataforma de acero. *Lidón Masiá, Manuel. 2014*

Figura 2.21. – Curva de deterioro superestructura hormigón. *Lidón Masiá, Manuel. 2014*

Figura 2.22. – Curva de deterioro superestructura acero. *Lidón Masiá, Manuel. 2014*

Figura 2.23. – Curva de deterioro subestructura hormigón. *Lidón Masiá, Manuel. 2014*

Figura 2.24. – Curva de deterioro subestructura acero. *Lidón Masiá, Manuel. 2014*

2.5.3.4. Inteligencia artificial

Los modelos basados en la Inteligencia Artificial, y su aplicación directa mediante Redes Neuronales Artificiales han desarrollado un gran número de implementaciones de interés en los últimos años, estando siendo aplicados con éxito a través de una extraordinaria gama de tipologías de problemas, en áreas tan diversas como las finanzas, la medicina, la ingeniería, la geología y la física. Diversas son las maneras formales de definir estos métodos, aunque señalamos la establecida por Haykin en 1994, que afirmaba que una red neuronal es similar a un procesador distribuido masivamente que tiene una propensión natural para almacenar experiencias de conocimiento y ponerlas a disposición para su uso, con un aprendizaje continuo. Se asemeja a la cerebro en dos aspectos:

- El conocimiento se adquiere por la red a través de un proceso de aprendizaje
- Las fuerzas de conexión interneuronal se utilizan para almacenar el conocimiento

Mientras que una sola neurona artificial no es capaz de poner en práctica algunas funciones booleanas, el problema se supera mediante la conexión de las salidas de algunas neuronas como entrada a las otras, por lo que se constituye una red neural capaz de desarrollar el proceso de aprendizaje. Suponiendo la conexión de muchas neuronas artificiales para formar la red, habrá varias neuronas en el sistema, por lo asignamos índices a las neuronas para discriminar entre ellas. A continuación, para expresar la neurona i -ésima de activación, se plantea la formulación siguiente:

$$a = \sum w_i u_j + \theta$$

donde w_i son los pesos relativos de las conexiones de las redes, a es la neurona de activación, u_j son los inputs de la red, y θ es el límite de activación. El esquema de conexión se representa en el siguiente diagrama:

Figura 2.25. – Red neuronal artificial. Abhishek Kar, 2008

En el área específica de modelos de predicción del deterioro de puentes, esta herramienta presenta actualmente una innovadora línea de investigación que está siendo desarrollada en los últimos años por la Universidad de Griffith en Australia. Se trata de la aplicación de algoritmos de redes neuronales artificiales para la obtención de datos del histórico de la evolución del deterioro a partir de datos actuales, que son los que se pueden obtener de la medición y observación directa. Ha sido denominado como “Backward Prediction Model”, y trata de rellenar el vacío de datos que nos encontramos al implementar un sistema de gestión a una red que lleva tiempo en funcionamiento. Conceptualmente, se resumen en la siguiente figura su esquema funcional:

Figura 2.26. – Mecanismo de funcionamiento Backward Prediction Model. Jaeho Lee, 2008

En esta publicación se aplica el BPM para un caso de 9 componentes básicos de 7 puentes de la autoridad de carreteras “Roads and Transport Authority of New South Wales (RTA NSW), Australia” construidos durante el periodo de 1960 a 1980, con una vida media de 40 años, y con inspecciones realizadas en 6 registros únicamente en los últimos 10-12 años previos a la implementación del modelo. Se aplicó un algoritmo basado redes neuronales artificiales de prueba con retropropagación anticipativa. De la misma manera, se introduce una función de transferencia del tipo log-normal, introduciendo como input 5 factores dependientes del clima y 2 correspondientes al crecimiento de población. La salida del proceso de resolución es el estado de condición de los puentes dentro de la franja de años en los que no existe información de las observaciones. Es decir, mediante el aprendizaje del proceso de deterioro, se trata de saber como se ha llegado a un punto determinado. Los resultados obtenidos en la investigación fueron coherentes en la mayoría de los casos (97,69% del total), con un pequeño porcentaje de desviaciones por errores del propio modelo. A partir de las bases de cálculo comentadas, se obtuvieron diversos resultados en la aplicación del modelo para obtener el histórico previo de las estructuras durante el intervalo desde 1962 hasta 1992, del que no se tenía información alguna. Se muestran, a continuación, las gráficas que definen las curvas previas de deterioro:

Figura 2.27. – Resultados satisfactorios de la aplicación BPM. Jaeho Lee, 2008

Figura 2.28. – Resultados erróneos de la aplicación BPM. Jaeho Lee, 2008

2.6. Técnicas de optimización. Tendencias y aplicaciones en SGP

Comenzaremos por exponer el concepto de optimización, desde el punto de vista de su aplicación a los sistemas de gestión de puentes. Se trata de llevar a cabo la elección que maximice los beneficios perseguidos con la acción propuesta, dentro del conjunto de alternativas existentes, minimizando aquellos aspectos negativos (coste, inseguridad estructural, impacto sobre el tráfico y medioambiente, etc.) que puedan plantear un estado general de la red de puentes gestionada no aceptable. El siguiente esquema muestra la descomposición de los elementos que forman parte, desde un punto de vista global, del funcionamiento de las técnicas de optimización.

Figura 2.29. – Diagrama de funcionamiento de las técnicas de optimización

Por tanto, en términos generales, la optimización conlleva una búsqueda y toma de decisiones, hasta su consecución, de los valores de las variables que conducen al

alcance de la solución óptima, cumpliendo las restricciones intrínsecas del sistema estudiado.

No obstante, existen algunos casos especiales en los que no es posible encontrar la función objetivo que resuelva el problema, bajo el conjunto de restricciones establecidas (Sistemas de ecuaciones lineales – no lineales) y otros en los cuáles simplemente se buscan los valores del conjunto de variables que maximizan o minimizan alguna de las funciones, sin aplicación de restricciones (Optimización sin restricciones). De la misma manera, el objetivo a obtener puede ser múltiple, siendo necesaria en estos casos la denominada “Optimización multiobjetivo”, con el análisis de varias funciones objetivo que pueden resolver el problema, suponiendo el incumplimiento de otros objetivos la falta de convergencia de soluciones, en otros casos.

Globalmente, podemos diferenciar la tipología de sistemas de optimización en las siguientes dos grandes familias:

- 1) Métodos matemáticos clásicos
- 2) Métodos de búsqueda aleatoria o metaheurísticos

Los primeros, persiguen la minimización de un problema, aplicando una serie de restricciones, reservados a problemas matemáticos básicos de optimización. Entre ellos cabe destacar los siguientes:

- Programación lineal
- Programación cuadrática
- Minimización con restricciones
- Minimización sin restricciones
- Minimización escalar

Por su simplicidad, no son capaces de adaptarse de manera eficaz al número de variables barajadas y su complejidad, en los análisis de ingeniería estructural aplicada a sistemas de gestión de puentes, por lo que no forman parte de las herramientas habituales de optimización más frecuentemente utilizadas.

El segundo gran grupo de sistemas de optimización, los métodos metaheurísticos, aparecen ligados a problemas de inteligencia artificial, que actualmente forman parte de las principales tendencias de estudio para la resolución de problemas de optimización en diversos campos de la ingeniería, electrónica y robótica.

Existe un gran número de métodos dentro de esta familia, siendo los enunciados a continuación, los principalmente utilizados en ingeniería de puentes:

- Redes neuronales artificiales
- Métodos evolutivos (Algoritmos genéticos)

- GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedures)
- Recocido simulado
- Búsqueda tabú

Múltiples han sido los estudios y publicaciones ligadas a la aplicación de estas herramientas de optimización en ingeniería estructural implementada en sistemas de gestión de puentes.

Redes neuronales artificiales

Inspirados en el sistema nervioso biológico, se trata de un modelo compuesto por elementos en conexión, asimilables a las neuronas, capaz de aprender a partir de reiteraciones de ejemplos de funcionamiento del proceso estudiado, identificando conductas o patrones de importante complejidad. No se trata de herramientas que simulen procesos computacionales, sino que intentan reproducir la capacidad del cerebro biológico para establecer tendencias y predicciones de evolución a partir de registros de datos. Este procesamiento de información, en contraste con el funcionamiento del cerebro biológico, fue ya enunciado en diversas publicaciones (Bishop, 1995). Por su parte, Cattán y Mohammadi (1997), desarrollan su investigación en relación con el índice de condición de una estructura implementando este tipo de método de optimización. Exponen la identificación de diversas conexiones entre la obtención de dichos parámetros mediante criterios subjetivos con respecto a los determinados analíticamente. Por tanto, plantean que una red neuronal artificial puede ser un buen método aplicable a sistemas de gestión de puentes que vayan incorporando registros de datos, campaña tras campaña, controlando y asociando la tendencia del índice de estado de un puente con su proceso de degradación histórica, asimilando patrones aplicables a casos de estructuras similares bajo condiciones de contorno equivalentes. En la misma línea de investigación Mohamed et al., 1998, propone el uso de las redes neuronales artificiales para los SGP, justificando su validez y versatilidad para la optimización de la asignación económica para diversas estrategias de conservación y mantenimiento. Distribuye la red de gestión de puentes en dos capas, una primera capa bineuronal que establece la aplicación de parámetros de penalización, y una segunda capa que representaría el conjunto de puentes analizados y las alternativas de actuación para mantener y conservar la estructura con el mejor índice de condición posible, con unas conexiones neuronales que representarán los costes de cada una de las alternativas de mejora.

Métodos evolutivos (Algoritmos genéticos)

Estos métodos están basados en el proceso de selección natural de especies, según la capacidad genética de cada uno de los individuos para adaptarse al medio. El origen de su utilización data de 1960 cuando el investigador John Holland planteó la posibilidad de aplicar este tipo de método de selección y supervivencia como medio de resolución

de problemas complejos de Inteligencia Artificial. Se trata, por tanto, de una técnica de optimización estocástica, denominadas globalmente como Algoritmos Evolutivos, siendo los Algoritmos Genéticos (Goldberg) una línea de investigación dentro del conjunto de métodos evolutivos de optimización.

Se trata de una técnica no convencional, robusta y poderosa, establecida en consonancia con las teorías darwinianas de selección natural y reproducción genética. De esta manera, existe una serie de individuos que plantean un mayor ciclo vital, con una probabilidad superior de reproducir y evolucionar que el resto. Así, se establece una cadena de transmisión genética entre los individuos descendientes que aumentan la probabilidad de mejorar las condiciones de la especie, llegando a un final de proceso con los mejores individuos, que representarían las mejores soluciones, en el caso de la aplicación a la resolución de problemas de optimización en materia de ingeniería.

Las características de estos algoritmos permiten partir de un conjunto de soluciones iniciales, empleando la aplicación de una serie de operaciones de búsqueda, tendiendo hacia la solución óptima. Estas operaciones de búsqueda pueden realizarse por técnicas matemáticas clásicas o bien por métodos biológicos, entre los que se encuentran los algoritmos genéticos. Éstos reproducen un modelo evolutivo en el que se plantean sucesivos cambios en los genes, con soluciones análogas a los cromosomas, estableciendo cadenas binarias que identifican el problema, aplicando transformaciones similares a las producidas en los organismos vivientes de cruce, inversión y mutación al conjunto de soluciones posibles para alcanzar la mejor de ellas (mejora de la especie).

Figura 2.30. – Esquema funcional Algoritmos Genéticos

Presentan una serie de ventajas con respecto a los métodos tradicionales en su aplicación a resolución de problemas de ingeniería, ya que:

- Trabajan con codificaciones de parámetros, no con ellos directamente.
- La búsqueda se realiza sobre una población, no sobre un individuo.
- Determinan soluciones finales (función objetivo), no sus derivados.
- Utilizan previsiones de transición probabilistas, no deterministas.

En paralelo al incesante desarrollo de los procesadores de las computadoras, estos sistemas han sido introducidos por diversos autores en el área de ingeniería de puentes.

Liu et al. (1996) desarrollan un estudio relacionado con el uso de los algoritmos genéticos para la optimización de las estrategias de mantenimiento de estructuras a largo plazo. Se partiría del análisis de elementos básicos (puentes) con las propuestas de mantenimiento para un año determinado y, a partir de estos parámetros iniciales, se conformarían cadenas de elementos más complejas que irían ajustando las acciones de mantenimiento de años posteriores a partir de presupuestos de los años precedentes, con aplicación al conjunto de la red estudiada, tras una aplicación binaria del algoritmo, con cruce multi-punto. De la misma manera, investiga la aplicación de la optimización para las estrategias de mantenimiento de tableros de puentes a largo plazo, considerando el beneficio obtenido para cada una de las estrategias de mantenimiento en contraposición con las condiciones de tráfico de la vía en la que se situa el puente.

Furuta et al. (2001) plantean un sistema de gestión y mantenimiento integrado que parte de una visión global a partir de los elementos que forman el conjunto de puente y red, introduciendo el concepto global de coste de ciclo de vida combinado con la utilización de algoritmos genéticos.

Miyamoto et al. (2002) proponen un sistema de gestión de puentes de hormigón para evaluar el nivel de servicio, coste de ciclo de vida y optimización de las labores de conservación y mantenimiento usando también algoritmos genéticos multietapa, con un doble objetivo, por un lado la minimización del coste aplicado a las labores de mantenimiento, y por otro la maximización del estado de los miembros del puente sobre los que se actúa.

Francisco A. Alonso Farrera (2006) redacta su tesis doctoral, bajo la dirección de Joan Ramón Casas, uno de los principales investigadores españoles en la materia de gestión de estructuras, en base a la optimización conjunta de las políticas de mantenimiento y rehabilitación en puentes mediante algoritmos genéticos, implementando el método propuesto para un sistema de gestión de puentes del Estado de Chiapas (México).

Todos estos estudios, junto con otros, demuestran que los algoritmos genéticos son una herramienta de gran potencial para la resolución de problemas de optimización ligados a la ingeniería estructural, de fácil implementación y tiempo de resolución aceptable frente a problemas de gran complejidad.

GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedures)

Plantea como base del sistema de optimización un procedimiento adaptativo de búsqueda aleatorio (también conocido como GRASP por sus siglas en inglés) con pasos sucesivos de construcción y mejora. Es un algoritmo de la familia de los metaheurísticos, comúnmente aplicado a problemas de optimización combinatoria. GRASP consiste en iteraciones realizadas mediante construcciones sucesivas de una solución aleatoria y posteriores mejoras iterativas de la misma a través de una búsqueda local. Las soluciones aleatorias, orientadas a partir de la obtención en primera fase de una buena solución, van generando, por la adición de elementos al conjunto, soluciones del problema dentro de una lista de elementos clasificados por una función de búsqueda heurística, de acuerdo con la calidad de la solución que se pretende alcanzar. La mejor de las soluciones dentro de las iteraciones de mejora quedaría establecida como la solución final (Resende y Ribeiro, 2003).

Recocido simulado

Está inspirado en conceptos estadísticos clásicos a partir del análisis del proceso físico que experimenta un sólido al ser sometido a un baño térmico. La simulación puede realizarse según una adaptación del algoritmo de Metropolis-Hastings, método de Montecarlo (Flannery et al., 2002) capaz de generar muestras aleatorias de estados de un sistema termodinámico. Analiza problemas de optimización global, con un objetivo prioritario de alcanzar una aproximación al valor óptimo de una función dentro de un conjunto amplio de configuraciones para el sistema, valor denominado “óptimo global”. Por tanto, identifica los diferentes estados del sistema con las posibles soluciones, la energía con los baremos de calidad de cada solución, el estado fundamental como la solución óptima, los estados metaestables como óptimos locales y la temperatura como variable de control.

Búsqueda tabú

La búsqueda tabú es un procedimiento heurístico de memoria adaptativa propuesto por Glover en 1986 (Glover, 1986) para la búsqueda de los óptimos globales en problemas de optimización mono-objetivo. Está siendo aplicado exitosamente en las últimas décadas en multitud de problemas complejos (continuos y discretos, lineales y no lineales, convexos y no convexos, etc.) en diferentes áreas científicas, entre las cuales se encuentran diversos problemas de optimización en ingeniería.

A través de repetidas búsquedas desde una solución de partida hacia la mejor de sus vecinas, evitando los óptimos locales. En cada iteración se produce el desplazamiento a la mejor solución no tabú del vecindario desde la solución actual. Los principales atributos obtenidos en cada iteración son almacenados en una lista tabú, evitando ciclos en la búsqueda por entornos. Así, un elemento del conjunto próximo de la solución actual es declarado tabú (no aplicable) si contiene atributos que estén en la lista tabú. En general, el proceso de un método basado en búsqueda tabú requiere de los siguientes elementos:

1. Solución inicial: solución aleatoria o inducidas (*greedy functions*) admisible que satisfaga las condiciones de contorno del problema. La adecuada elección de la solución de partida puede mejorar la convergencia hacia la solución y la reducción de tiempo en llegar a finalizar el proceso de optimización.
2. Desplazamiento: generación de una solución admisible a partir de la solución inicial.
3. Vecindad: desarrollo del conjunto de soluciones que pueden ser generadas por los diferentes desplazamientos desde la solución inicial.
4. Generación de lista tabú: evita, a través de mecanismos de memoria adaptativa, procesos de generación de bucles o finalización de proceso en óptimos locales.
5. Finalización del proceso. Se preestablecerá un tiempo de cálculo o número de iteraciones a partir del cual, en caso de no encontrar mejoras dentro del proceso de búsqueda de la solución óptima, se dará por concluido el proceso.

El método genera dos tipos de registros de memoria que intercambian información entre sí, en ámbitos diferentes, normalmente a corto y largo plazo, respectivamente. Se reproducen estrategias de intensificación y/o diversificación, en ámbitos locales y globales, persiguiendo alcanzar el óptimo global sin quedarse estancado en óptimos locales (Glover y Laguna 1997).

Otras tendencias para resolver problemas de optimización aplicados a SGP

Existen otras líneas de investigación en materia de optimización de problemas de gestión de puentes, entre ellas cabe destacar:

- Aplicación de modelo de predicción Markoviano combinado con un proceso de optimización multiobjetivo para asignación de recursos y priorización de actuaciones de mantenimiento. Lounis y Vanier (1998) proponen la utilización de esta metodología, bajo la cual se establece una serie de garantías que deben cumplir los puentes gestionados, entre las que estarían el umbral mínimo de estado de condición, minimización de costes de políticas de mantenimiento y reparación, la fiabilidad y la intensidad de tráfico asumida por la estructura. Se trata de una metodología de alta aplicación, ya que parte de los datos extraídos

de las inspecciones principales de necesaria realización para la implantación de un adecuado sistema de gestión. A partir de aquí, se aplica el modelo estocástico de Markov, en el que se integra la relación de la evolución del deterioro con el tiempo. Finalmente, se impone una serie de objetivos que deben ser obtenidos de manera simultánea, proponiendo para ello una gestión de mantenimiento acorde a los medios disponibles.

- Frangopol y Estes (1999), ilustres investigadores norteamericanos en materia de gestión de infraestructuras, desarrollan diversas técnicas de optimización aplicada a SGP. Por un lado, proponen un análisis de los intervalos óptimos para la realización de tareas de inspección y mantenimiento, en paralelo al estudio de minimización de costes de ambas tareas, estableciendo un punto de equilibrio entre los niveles de fiabilidad asumibles y los costes de mantenimiento del ciclo de vida de la estructura, incluyendo dichos costes los referidos tanto a la materialización de las inspecciones como los relativos a las reparaciones y tareas de conservación. Además, realizan un trabajo experimental sobre un puente en servicio, a partir de una propuesta de sistema de fiabilidad, que pone en contraste las hipótesis de modos de fallo del puente (combinación serie-paralelo de modos) con el modelo de deterioro, generado a partir de las variables de tiempo y carga aplicada. Se predefinen criterios de mantenimiento y reparación, evaluando los resultados obtenidos con la realidad, concluyendo que la herramienta se adecúa en gran medida, aunque para ello requiere un proceso de alimentación de datos continuo mediante las inspecciones y frecuentes ajustes matemáticos.
- Perspectivas de gran aceptación son las basadas en la evaluación conjunta de costes de la estructura, incluyendo no sólo los debidos a la carga y sollicitación, alcanzando adicionalmente los iniciales originados por la construcción del puente y los producidos con posterioridad debido a los costes de mantenimiento y reparación durante su vida útil. Thoft-Christensen (2000) postula la importancia de tener en cuenta en el análisis de la fiabilidad de un puente los modelos estocásticos aplicables a cada uno de las variables representativas de los elementos, obteniendo modelos lo más adecuados posible a la evolución real de la estructura. Concluye, por tanto, con la propuesta de una línea de investigación orientada hacia una optimización de los costes de ciclo de vida del puente, que debe ser tomada en cuenta desde la fase de diseño.
- El sistema de monitoreo permanente se plantea con una herramienta de altas prestaciones frente a los sistemas convencionales de campañas de inspección visuales periódicas. Andersen et al. (2000) describen en su estudio las ventajas de la utilización de estas técnicas para la posterior optimización de las

estrategias de gestión de puentes, planteando, lógicamente, una serie de restricciones de aplicabilidad al gestor de la red, principalmente manifestadas en los costes de implantación del sistema de monitorización, que no siempre hacen viable esta alternativa.

- En línea con la investigación de Thoft-Christensen (2000), Troive (2002) reitera la importancia de optimizar los costes del ciclo de vida de los puentes a partir de un adecuado concepto en la fase de diseño y proyecto, utilizando diferentes herramientas técnicas a disposición de los ingenieros, de tal manera que se pueda alargar la vida útil de las estructuras, contrastando el coste relativo de estas medidas en función del beneficio producido a la sociedad.

Tanto las principales técnicas de optimización, como sus aplicaciones, comparativas, futuras líneas de investigación, así como el método específico y original desarrollado para la aplicación particular realizada en el presente estudio se amplían en el “Capítulo 4. Modelo de Optimización”.

2.7. Descripción de los principales SGP utilizados

Como referente, dentro de la literatura existente, en relación al estudio e identificación del estado del arte, características e implementación de los sistemas de gestión de puentes a nivel mundial, cabe destacar el gran trabajo elaborado en el anteriormente mencionado informe BRIME promovido por FEHRL (The Forum of European National Highway Research Laboratories). En él, dentro de su entrega “D4-Review of existing bridge management systems and definition of the functions, inputs, modules and format of the proposed bridge management system (WP7)” se realiza una síntesis global del estado del conocimiento en las herramientas utilizadas en los diferentes países para abordar la gestión de la conservación y mantenimiento de puentes.

En base a este estudio, y utilizando técnicas de difusión de cuestionarios, desde el año de la publicación del informe europeo de referencia (2002), en diversas publicaciones, comites y congresos, con expertos en la materia, se han ido realizando ampliaciones acorde a la escalonada entrada de nuevos países dentro de los que utilizan sistemas de gestión informatizados y con un nivel profundo de aplicación real en la red de infraestructuras gestionadas.

A continuación se plantean los principales SGP aplicados en diversos países, que se resumen en la siguiente tabla:

No.	País	Administración Gestora	Sistema	
			Nombre	Abr.
1	Alemania	German Federal Highway Research Institute	Bauwerk Management System	GBMS
2	Canadá	Ontario Ministry of Transportation and Stantec Consulting Ltd.	Ontario Bridge Management System	OBMS
3	Canadá	Quebec Ministry of Transportation	Quebec Bridge Management System	QBMS
4	Corea	Korean Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs	Korea Road Maintenance Business System	KRMBS
5	Dinamarca	Danish Road Directorate	DANBRO Bridge Management System	DANBRO
6	EEUU	American Association of State Highway and Transportation Officials	Pontis	PONTIS
7	EEUU	Federal Highways Association	Bridgit	BRIDGIT
8	EEUU	Alabama Department of Transportation	Abims	ABIMS
9	España	Ministerio de Fomento	Sistema de gestión de puentes	SGP
10	Finlandia	Finnish Transport Agency	The Finnish Bridge Management System	FBMS
11	Francia	Ministry of Ecology, Sustainable, Development, Transport and Housing	Quality Image of Engineering Structures	IQOA
12	Holanda	Dutch Ministry of Transport	Disk	DISK
13	Inglaterra	Surrey County Council (SCC)	Computerized System for the Management of Structures	COSMOS
14	Irlanda	Irish National Road Association	Eirspan	EIRSPAN
15	Italia	Autonomous Province of Trento	APT-BMS	APTBMBS
16	Japón	Kajima Corporation and Regional Planning Institute of Osaka	BMS@RPI	RPIBMS
17	Japón	Japan National Road Association	Japan Bridge Management System	J-BMS
18	Letonia	Latvian State Road Administration	Lat Brutus	Lat Brutus
19	México	Instituto Mexicano del Transporte	Sistema gestión puentes México	SIPUMEX
20	Polonia	Polish Railway Lines	Smok	SMOK

Tabla 2.1. – Principales Sistemas de Gestión de Puentes-I

No.	País	Administración Gestora	Sistema	
			Nombre	Abr.
21	Polonia	Local Polish Road Administrations	Szok	SZOK
22	Portugal	BETAR Consultores, Ltd- Ayuntamiento Lisboa	Gestao de obras de arte	GOA
23	Reino Unido	United Kingdom Roads Association	Nats	NATS
24	Reino Unido	Transport Research Laboratory	Bridgeman	BRIDGEMAN
25	Rusia	Moscow Government	Most	MOST
26	Suecia	Swedish Road Administration	Bridge and Tunnel Management System	BATMAN
27	Suiza	Swiss Federal Roads Authority	KUBA-MS	KUBA-MS

Tabla 2.2. – Principales Sistemas de Gestión de Puentes-II

Dentro del Anexo A “Fichas Descriptivas Principales SGP Implementados” de la presente investigación, se pueden consultar, de manera sintetizada, las principales características técnicas y funcionales de cada uno de los sistemas, su ámbito de aplicación, alcance y singularidades.

2.8. Referencias al área de estudio dentro del *fib* Model Code 2010

Dentro del capítulo 9 “Conservación” del *fib* Model Code 2010, correspondiente a la Parte V “Conservación y desmantelamiento”, se proporciona una visión general para el desarrollo de futuros códigos, normativas, guías y recomendaciones, en relación al campo de investigación de la conservación y mantenimiento de las estructuras de hormigón y su componentes, durante su vida útil prevista y/o extendida, con el fin de asegurar que el nivel de estado de la estructura se mantiene por encima de unos estándares mínimos para el cumplimiento de la seguridad estructural y la capacidad de servicio para la que ha sido encomendada. Se distinguen dos objetivos de conservación diferentes:

- Aseguramiento del cumplimiento del alcance de la vida útil prevista
- Actuaciones de mejora de la estructura con el fin de alcanzar los requisitos de servicio mínimos en cada una de las fases

A su vez, el proceso de conservación a través de la vida de una estructura consta de los siguientes tipos y secuencia de actividades:

- Conocimiento de la situación de la estructura: recopilación de información sobre el estado actual

- Evaluación del estado: elaboración de un pronóstico de rendimiento futuro, incluyendo la identificación de mecanismos de deterioro y predicción de daños.
- Toma de decisiones con respecto a las opciones potenciales de conservación y de intervención apropiadas
- La ejecución y la prevención de las obras de reparación
- Seguimiento a través de la vida de la estructura, incluyendo el registro y análisis de la información necesaria para la gestión del ciclo de vida

Esta publicación, plantea un flujo general de los procedimientos del proceso de conservación de estructuras según se muestra en la siguiente figura:

Figura 2.31. – Gestión de conservación, ciclo de vida y registro según *fib* Model Code 2010

El planteamiento del proceso de ciclo de vida de la estructura se resume en el esquema funcional que se incluye a continuación:

Figura 2.32. – Esquema funcional proceso de gestión ciclo de vida según *fib* Model Code 2010

En las estructuras de nueva construcción, la estrategia de conservación debe estar fijada desde la elaboración del diseño mediante la elaboración del correspondiente plan de mantenimiento que recoja aquellas actividades a llevar a cabo, tanto para las actividades generales ordinarias como para las tareas de mantenimiento especializado.

Por su parte, en aquellas estructuras existentes o en las que provienen de una actualización tras acción de mejora, se les aplicará unas directrices de seguimiento ajustadas al punto del proceso en el que se encuentren dentro de su vida útil, contemplando la valoración cuantitativa del periodo restante que la estructura puede garantizar en unas condiciones adecuadas de servicio y determinando las labores pendientes y el rediseño o nueva creación del plan de mantenimiento.

Dentro de las actuaciones, se clasifican las siguientes alternativas de conservación que se corresponden con diferentes categorías de labores de mantenimiento, en función de la importancia de la estructura, sus componentes, acciones externas y ambientales y costes de mantenimiento:

- Categoría A: Actividades proactivas

- Categoría B: Actividades reactivas
- Categoría C: Situaciones en las que no son factibles las operaciones de mantenimiento

Se propone, dentro de este documento de referencia internacional, un contenido mínimo para los planes de mantenimiento, que deben incorporar, al menos:

- Especificación del tipo de inspección, testeo y sistema de monitorización seleccionado
- Métodos de estimación del grado y valoración del deterioro
- Métodos de evaluación del estado de la estructura basados en criterios homogéneos
- Intervenciones en caso de no conformidad
- Tratamiento documental de todo el proceso de seguimiento

En paralelo a las diferentes categorías de estrategias de conservación establecidas, se plantean diversos niveles de control:

- Condition Control Level 3 (CCL3): planes de inspecciones periódicas y monitorización sistemática de los elementos críticos de las estructuras, con especial atención a la determinación de los procesos de deterioro
- Condition Control Level 2 (CCL2): planes de inspecciones periódicas realizadas por personal con suficiente formación en estructuras, sin apoyo de monitorización ni caracterización con acciones de ensayos adicionales
- Condition Control Level 1 (CCL1): inspecciones y chequeos no programados
- Condition Control Level 0 (CCL0): ausencia total de trabajos de inspección y monitorización

Destaca también esta publicación la importancia de establecer inspecciones en el origen de puesta en servicio de la estructura y, en su caso, tras cualquier tipo de actuación de mejora o reparación.

De la misma manera, realiza una clasificación de los principales factores que pueden tener influencia en el proceso de deterioro de las estructuras, según dos grandes grupos:

- Factores externos, basados en las acciones exteriores sobre la estructura, como la temperatura, humedad y todos los agentes ligados al ambiente del emplazamiento, así como las propias cargas físicas
- Factores internos, relacionados con las características del puente, como los materiales constitutivos, disposición, geometría, recubrimientos, etc. y el control de calidad durante el proceso constructivo

Lógicamente, la realidad responde a la combinación de varios de los factores, motivo por el que se complica la mecanización de la representación y conocimiento del proceso real de deterioro.

Se destaca el sentido de todo el conjunto de los sistemas de gestión en relación a aportar al técnico la capacidad de poder disponer de criterio de juicio justificado para la determinación de las acciones necesarias en cada momento, incluyendo decisiones de intervención, espera o puesta fuera de servicio.

Se clasifican los tipos de intervención, según los grupos siguientes:

- Intervenciones planificadas, como pueden ser el mantenimiento ordinario, preventivo y actuaciones de reparación periódica de aquellos elementos que dispongan de menor vida útil que el global de la estructura
- Intervenciones no planificadas, para resolver problemas de daños no previstos que se vayan produciendo a lo largo de la vida del puente

El mantenimiento ordinario contempla la realización de una serie de trabajos para corregir o prevenir pequeños deterioros, degradaciones o mecanismos previstos por el diseñador dentro de las tareas básicas de conservación.

En cuanto a las intervenciones preventivas, conllevan una serie de actuaciones que pretenden garantizar la integridad de los materiales constitutivos, asegurando que las protecciones frente a la activación de procesos de deterioro habituales (carbonatación y cloruros). Tratan, por tanto, de retrasar la iniciación de estos ataques, ampliando de esta manera la vida útil de los materiales, y por tanto, del conjunto de la estructura. Incluyen las actuaciones sobre daños aparentes detectados durante las inspecciones, como el sellado de fisuras y aseguramiento de recubrimientos.

Las intervenciones correctivas tratan de devolver a la estructura a una situación mínima de condición de servicio frente a daños previstos por el técnico que llevó a cabo el diseño, generalmente no restringidos únicamente a los materiales o métodos empleados. Conllevan un nivel mayor que el tipo de actuaciones anteriores, llegando a incorporarse dentro de las intervenciones de reparación, rehabilitación y restauración de características de la estructura o de alguno de sus componentes.

Se propone en el documento un nivel de análisis de reconstrucción y reemplazamiento, una vez que el estudio de los costes de reparación frente a la vida útil proporcionada no justificase las labores de rehabilitación.

También se define una serie de intervenciones ligadas a la mejora y adaptación de la estructura a las condiciones reales de solicitación, que pueden estar, en un momento dado, muy por encima de las previstas en el diseño inicial, y cuya adaptación hace necesarias actuaciones de refuerzo o incremento de prestaciones.

El registro de la gestión del ciclo de vida de la estructura puede permitir la previsión y determinación de una mejor adecuación de los medios, estableciendo la necesidad de crear un archivo denominado en la publicación como “Life Cycle File”

Finalmente, se analiza una problemática poco abordada en la literatura existente, que trata sobre el desmantelamiento, reciclaje y reutilización de estructuras al término de su vida útil en condiciones de servicio, cuando ninguna actuación puede retornar a dicha estructura a un estado mínimo con unos costes económicos asumibles. Debe tenerse en cuenta, desde el propio diseño, el posterior proceso de desmantelamiento y la valorización y reutilización de los componentes de la estructura, de tal manera que no se produzcan costes medioambientales ni sociales adicionales.

2.9. Análisis crítico del estudio del estado del arte de los SGP

Como se ha reflejado en el presente capítulo, nos encontramos ante una temática en pleno proceso de desarrollo, investigación y constante evolución, ya que el conocimiento de la técnica se halla en un proceso de migración desde los gérmenes iniciales de la problemática de la gestión de puentes, en base a simples bases de datos e inventarios de los puentes que forman parte de la red, hasta profundizar en los últimos años en los modelos matemáticos y estadísticos más sofisticados, para intentar eliminar, en la medida de lo posible, la subjetividad asociada a la resolución de las tareas de asignación de recursos de mantenimiento, mediante estrategias de optimización de todo tipo.

Pues bien, podemos afirmar que el estado del arte actualmente plantea tres escenarios o niveles generales de desarrollo, con una distribución piramidal en cuanto a su grado de implantación:

- **Nivel 0. Inexistencia aplicación SGP:** constituye el segmento donde se encontraría el estado de las labores de gestión de puentes de la mayor parte de los países en vías de desarrollo que, obviamente, no disponen de medios suficientes para poder establecer las medidas necesarias para una correcta gestión de sus infraestructuras, por lo general, con un bajo nivel de desarrollo y con una misión centrada en el concepto más básico de puente como unión entre dos puntos de la obra lineal que encuentra un obstáculo, sin entrar en otras cuestiones que puedan afectar a la vida útil de la estructura. Además, como elemento totalmente diferenciador con el resto de niveles, la red se encontraría en un nivel de ausencia de gestión tal que ni siquiera estaría configurado el inventario de puentes. No sólo las redes viarias de cualquier jerarquía de los países subdesarrollados estarían en esta situación, sino que podemos encontrarnos esta ausencia total de gestión en países desarrollados si analizamos las redes comarcales y locales. Por tanto, podemos afirmar que actualmente, los sistemas de gestión de puentes, están lejos de representar un

porcentaje de aplicación representativo en cuanto al número total de estructuras existentes. Esta es una de las principales lagunas o retos pendientes que nos encontramos dentro del desarrollo del conocimiento, punto esencial de partida para la motivación de la redacción del presente trabajo de investigación. Dentro de un contexto técnico de gran desarrollo en lo referente al diseño y construcción de puentes, llama la atención el gran vacío existente en la materia de evaluación del estado de la red y distribución de prioridades de actuación en función de los recursos a disposición, incluso en administraciones regionales y locales de países desarrollados.

- **Nivel 1. Creación del SGP:** Se trata de un paso intermedio dentro del desarrollo de los sistemas de gestión. Correspondería a aquellas administraciones que, en mayor o menor medida, tienen inventariadas las estructuras gestionadas y que comienzan a realizar trabajos de inspección y actualización periódica de sus bases de datos, lo que constituye la esencia de los comienzos del desarrollo de la técnica, allá por mediados del siglo XX, donde los sistemas se concebían como bases de datos, con un volumen de información, en algunos casos, ingente, referida a fichas de inventario e inspecciones, en base a los cuales se toman las decisiones de mantenimiento y reparación, siguiendo exclusivamente el criterio ingenieril de los técnicos responsables de la red. Aunque es un paso importante respecto a la falta de seguimiento y conocimiento de las infraestructuras que se tendría en el nivel 0 (ausencia total de gestión), todavía no podríamos hablar en este segmento de términos de ayuda a la toma de decisiones, ni de tendencias de eliminación de la subjetividad propia de este nivel intermedio, en el que aún no se englobaría el estudio de técnicas matemáticas de predicción del deterioro y de optimización de la asignación de recursos para las labores de mantenimiento y reparación. Aunque pudiera parecer que este nivel de desarrollo debería estar vigente en todas las jerarquías de carreteras y ferrocarriles de las infraestructuras de los países desarrollados, tras el estudio detallado del grado de implantación, podemos afirmar que más allá de inventarios básicos, en el propio ejemplo de España, la mayoría de sus comunidades autónomas y diputaciones carecen de datos actualizados de inspecciones periódicas que sirvan para poder tener una idea general del estado de los puentes gestionados, por lo que también en este estadio, existe una amplia tarea pendiente.
- **Nivel 2. Sistema inteligente como ayuda a la toma de decisiones:** Correspondería a la implementación de los sistemas de gestión de puentes en redes de carreteras y ferrocarriles de la red principal en países desarrollados de América del Norte (Canadá, Estados Unidos y México), Europa, Japón y Rusia. Responderían al grado más alto de desarrollo del conocimiento dentro de los

sistemas de gestión, incorporando, además de toda la base de información contenida en el nivel 1, herramientas que permiten optimizar políticas y estrategias de mantenimiento, a partir del análisis de los procesos de deterioro, formulados mediante diferentes métodos de predicción (físicos, empíricos, estocásticos e inteligencia artificial), y una posterior aplicación de algoritmos de búsqueda de soluciones (métodos clásicos y metaheurísticos) para la mejor asignación posible de los medios a disposición, en función del estado de los puentes de la red y su previsible evolución del deterioro. Estamos ante un sistema inteligente, capaz de ayudar a la toma de decisiones, con una base matemática, como apoyo objetivo al criterio ingenieril. Este sería el punto de encuentro de las discusiones en el que la ciencia se encuentra actualmente, y bajo el que se plantean diversas líneas de investigación y lagunas de conocimiento que serán el núcleo de discusión y desarrollo de este y otros trabajos relacionados con la más avanzada tecnología al servicio de los SGP.

Por todo lo comentado, se podría concluir que existe una intensa tarea por delante dentro del campo de investigación seleccionado, más allá de la propia iniciación de la elaboración de inventario y campañas de inspección en aquellos niveles de la red en los que todavía no se aplican, trabajo que está pendiente por realizar en gran parte de los niveles de jerarquía, incluso en países desarrollados, pero que no lo entendemos como la motivación del presente documento, que sí que profundiza en las siguientes líneas de investigación:

- **Análisis de los modelos de predicción del deterioro.**

Es fácil comprobar que la tendencia general de los principales SGP existentes (PONTIS, BRIDGIT, COSMOS, etc.) apuntan hacia el uso de los modelos markovianos como herramienta matemática de referencia para la determinación de la predicción del deterioro. Las razones de su más que contrastada eficacia y adaptación tienen mucho que ver con la manera en la que se ha ido desarrollando el proceso de implantación de los sistemas de gestión, ya que, en la mayoría de los casos, hemos comenzado a tener en cuenta la importancia de las labores de mantenimiento y conservación cuando la red de puentes ha ido teniendo un grado de madurez importante, es decir, no se abordó el problema desde el inicio y ahora debemos establecer sistemas que nos permitan partir de una “fotografía” actual a partir de la cual, en función del estado ó índice de condición establecido en campañas de inspección, podamos predecir las diferentes hipótesis de evolución para determinar las acciones o estrategias de mantenimiento más adecuadas.

Dentro del propio caso práctico que desarrollamos dentro de la presente investigación, para una muestra real de estructuras correspondientes a una red comarcal, en la provincia de Albacete, hemos podido verificar que existe una

total falta de información relativa al histórico de las estructuras, encontrándonos en una situación en la que tenemos:

1º) Ausencia total de datos de partida en lo referente a inspecciones intermedias, y por supuesto seguimiento continuo (monitorización) de ninguna de las estructuras, por lo que necesitamos un modelo que no necesite del historial del puente para predecir su probabilidad de paso hacia otro estado.

2º) Adaptabilidad a los medios comúnmente disponibles en administraciones regionales y locales (habitualmente con escasos recursos), ya que se trata de métodos cuyo “input” de partida es compatible y fácilmente adaptable a los datos de las inspecciones visuales periódicas, que en caso de tener épocas en las que no han podido realizarse, por diversos motivos, dan la posibilidad de retornar tras la realización de las campañas de actualización oportunamente llevadas a cabo.

Nuestro modelo de deterioro, por tanto, debe permitir un análisis estocástico inicial, ante la ausencia de datos, con la aplicación del método de las cadenas de Markov, para la determinación de las probabilidades de transición del estado de condición de los elementos del puente de nuestro sistema de gestión específico. No obstante, es importante tener la visión crítica de las limitaciones que tenemos al tomar esta decisión:

1º) Dependencia de la posible subjetividad de partir de datos basados en determinaciones cualitativas (inspecciones visuales), que resolveremos con una sistematización de la codificación de los daños más habituales y su registro mediante un catálogo de daños.

2º) Análisis discreto del problema, ya que los datos vienen establecidos en base a campañas periódicas.

3º) Aunque se puede entender como una ventaja operacional del método la independencia con el historial del puente, estamos despreciando datos que podrían aportar información esencial de las razones por las que una estructura pueda pasar de un estado a otro.

4º) Para realizar el paso del análisis desde el nivel elemento al nivel puente tendremos que plantear hipótesis de pesos relativos, no fácilmente justificables.

Aprovechando la incorporación de la realización de una campaña de campo de toma de datos, vemos interesante incorporar también un modelo empírico-determinista que nos reportará curvas de deterioro basadas en la propia observación, y que combinadas con la parte aleatoria de los modelos

estocásticos, nos permitirá la integración de un modelo envolvente que tendrá en cuenta las limitaciones y ventajas de ambos métodos por separado.

También se plantean líneas de investigación denominadas “Sintonización de Modelos” (A. Güemes et al., 2003) a partir de la obtención de las propiedades modales de la estructura comparadas con las formas modales extraídas mediante técnicas experimentales de dinámica estructural, que nos permitirían conocer, a través de adecuadas correlaciones, el efecto producido en la reducción de capacidad de respuesta.

No obstante, todas estas nuevas tendencias plantean la necesidad de un importante desembolso inicial (instalación de monitorización) y trabajos de grandes requerimientos técnicos (implementación de sofisticados modelos de tamaño reducido) que no siempre son justificables y aplicables. De hecho, su aplicación para una red local, como la analizada en la parte experimental de la presente investigación, no se plantea como alternativa viable desde el punto de vista del coste del ciclo de vida de la red estudiada, ya que sólo el coste de implantación a posteriori de estos nuevos sistemas conllevarían mayor coste que la puesta a punto de los elementos en los que se propone la actuación de mantenimiento y reparación.

- **Sistemas de optimización de estrategias de mantenimiento y reparación.**

Junto con el análisis de las técnicas de predicción de evolución del deterioro, la aplicación de los diversos sistemas de optimización de las estrategias de mantenimiento y reparación debe formar parte de la principal funcionalidad de los sistemas de gestión de puentes más sofisticados, siendo, además, el objeto central de la tendencia actual de discusión e investigación.

Sin embargo, el propio estudio realizado por un consorcio de países europeos, recogido en el conjunto de informes BRIME (2001), destaca que no todos los sistemas implantados en los países desarrollados cuentan con la aplicación de estos criterio de optimización.

Estos sistemas tratan de establecer el cumplimiento de unas garantías de funcionalidad y fiabilidad en una red de puentes bajo la verificación de unas restricciones preestablecidas, de tipo económico, seguridad, confort, etc. En el trabajo anteriormente mencionado, se enuncian las técnicas de optimización que habían sido utilizadas históricamente para la solución de los problemas de asignación de recursos para el mantenimiento y reparación:

- Programación Lineal o no Lineal
- Programación Dinámica

- Programación Multiobjetivo
- Programación Orientada a Metas
- Teorías de Control Óptimo
- Programación Entera

Se trata de técnicas de complicada formulación matemática que en su aplicación a la resolución de problemas de optimización arrojan unas prestaciones poco competitivas en lo referente a la dificultad de operación computacional así como en el tiempo de convergencia hacia las soluciones. Estas complicaciones incrementan de forma exponencial cuando el número de datos gestionados es importante, y eso suele ser habitual en cualquier caso, por pequeña que sea la red administrada. De hecho, como se explicará en sucesivos capítulos, para el caso experimental llevado a cabo dentro de la presente investigación, simplemente para la muestra representativa de la red seleccionada de veinte puentes, los tiempos para la obtención de resultados, y la falta de convergencia hacia los mismos, plantean todas estas técnicas inviables para su incorporación en los sistemas de gestión de puentes.

Por ello, múltiples publicaciones y estudios proponen nuevas tendencias basadas en los métodos evolutivos, y en concreto en su técnica más reconocida para su aplicación a problemas de optimización de tareas de mantenimiento y reparación de puentes, conocida como los algoritmos genéticos. La relación entre la calidad, precisión y tiempo computacional de cálculo para obtener los resultados, en contraste con los métodos convencionales, hacen plantear este tipo de técnicas como principal referencia.

Se aplicarán los métodos evolutivos como punto de partida para la optimización llevada a cabo dentro del SGP específico desarrollado para esta investigación, realizando los ajustes al método y planteamientos originales que entendemos pueden ser una propuesta de mejora y calibración a las condiciones particulares de cada tipología de red, aspecto que la mayoría de los SGP comerciales no evalúan adecuadamente.

2.10. Resumen del límite del conocimiento y el salto inexplorado que supone el trabajo de investigación realizado

Varias son las limitaciones actuales del conocimiento en materia de gestión de puentes, restando un largo camino en la búsqueda de respuestas a cuestiones que a día de hoy se encuentran en pleno proceso de desarrollo, experimentación y verificación, y que por tanto, identificamos como lagunas del estado del conocimiento.

¿Cuál es el tipo de formato de programación de inspecciones e inventariado más adecuado para llevar a cabo el mantenimiento y conservación de una red de puentes?

¿Qué método de evaluación de las estructuras puede adaptarse mejor a los análisis de seguimiento del estado del puente?

A día de hoy, ¿existe un sistema estandarizado que nos lleve a una valoración inequívoca, independientemente del inspector que realice la campaña?

¿Qué modelos de predicción del deterioro pueden ajustarse mejor a la realidad del proceso de degradación?

¿Cuál es el alcance del incremento del índice de estado que puede experimentar una estructura bajo una actuación de mantenimiento y mejora, y cómo evoluciona a partir de dichas acciones?

¿Cómo podemos resolver un problema de optimización que, además de las propias variables y dificultades matemáticas, lleva implícitas consideraciones de limitación presupuestaria y decisiones meramente políticas?

¿Cómo es posible que hasta para el correcto funcionamiento de muchos electrodomésticos o equipos domésticos existan planes de mantenimiento y no sea así para el caso de un puente sobre el que circularán durante su vida útil miles de vehículos?

¿Cuál es el destino del puente después de la finalización de su vida útil?

Podemos considerar, por tanto, que ante la inexistencia de respuestas totalmente definidas para las preguntas formuladas, nos encontramos con diversas líneas de investigación que delimitan el límite del conocimiento actual.

Ante esta situación, nuestro trabajo de investigación pretende realizar un salto inexplorado en lo referente a:

- Planteamiento de una **metodología integral para el desarrollo de la implantación de un sistema de gestión, inédita en la literatura existente,** abordando todas las etapas, desde su creación hasta la ayuda a la toma de decisiones para la distribución de recursos, en función de todos los datos previos obtenidos mediante la conformación de inventarios, inspecciones y evaluación a nivel de componente y red. Ante los ejemplos desencadenados y locales que pueden encontrarse en la literatura existente, planteamos un novedoso desarrollo que puede servir al lector para tener una clara

idea del problema global al que se enfrenta al implantar desde su inicio un sistema de gestión de puentes.

- **Innovadora** propuesta del esquema funcional de gestión, centralizando el proceso en torno a las inspecciones principales, de cuyo resultado dependerá, además de la propia formación de los inventarios, las inspecciones básicas o rutinarias (subsidiarias de las principales) y las especiales, consideradas estas últimas como un elemento fuera del alcance de los sistemas de gestión. Pues bien, esta perspectiva, enfrentada al clásico y comúnmente aceptado concepto establecido en guías y recomendaciones de jerarquía rígida y encadenada en el orden -inventario, inspección rutinaria, inspección principal e inspección especial- supone un arriesgado análisis frente a los criterios preestablecidos, pero que tiene su justificación en la necesidad de introducir los propios costes de inspección dentro del proceso de optimización, y que produce un enfoque en el que a partir de la detección de puntos críticos dentro de las inspecciones principales, se pueda realizar el seguimiento mediante órdenes transmitidas a las inspecciones básicas o rutinarias, que realizarán la función de ser los ojos del técnico que ha detectado las incidencias, permitiéndole continuar el seguimiento de manera indirecta hasta la siguiente inspección, reduciendo la necesidad de periodicidades excesivamente bajas entre dos principales consecutivas, con la mejora de recursos que esto supone.
- **Condición de crítico y puntos críticos de componentes**. Introducimos estos originales conceptos no aplicados en los sistemas de gestión existentes y necesarios para la adecuada labor de inspección y evaluación de las estructuras de la red. Respecto al análisis global de red, podríamos afirmar que un puente por sí mismo es un elemento crítico dentro de la vía en la que se encuentra, ya que una puesta fuera de servicio dejaría, inevitablemente, sin circulación a los usuarios de la infraestructura. Además, parece razonable determinar qué serie de puentes presenta características críticas, por ser estratégicos con respecto a mantener la accesibilidad, formar parte de un conjunto considerado patrimonio histórico-artístico, encontrarse en un entorno especialmente exigente con la existencia de cauces o ambientes agresivos, estar sometidos a un nivel de solicitaciones importante, tener un índice de estado cercano a los límites admisibles, etc. De la misma manera, identificamos una serie de deterioros habituales asociados a tipologías y componentes del puente, denominados puntos críticos, que deben ser objeto inevitablemente de profundización y seguimiento en el proceso de inspección y mantenimiento.
- Consideramos que el proceso real de la evolución del deterioro tiene una importante componente aleatoria y otra más previsible basada en una evolución predecible bajo la mera observación, fruto de la combinación de una gran cantidad de parámetros, cuya conexión causa-efecto estamos actualmente lejos de conocer en la actualidad. En la analogía con el propio proceso biológico que el ser humano sufre a lo largo de su vida, ¿alguien se atrevería a representar el proceso de evolución del estado de salud válido para diversos grupos de personas? Pues en una línea similar de planteamiento estaríamos en el caso de los puentes. Lógicamente, entendemos que en la mayoría de

las personas al igual que en los puentes, el tiempo es un factor determinante, con una relación que tiende a la reducción del bienestar según avanzan los años. De la misma manera, los cuidados y hábitos que las personas hayan tenido, influirán positiva o negativamente en el proceso. Hasta este punto, incluso podríamos plantear un patrón de evolución orientativo al que buena parte de la población de un determinado país, en función de su nivel de desarrollo, tienden a ajustarse. Todo ello, en cierta medida, se refleja en los estudios de esperanza de vida, que no deja de ser un análisis obtenido de la propia observación metódica de la realidad. Sin embargo, aceptando de manera general que en nuestro país, por ejemplo, la evolución de una persona puede tener varias fases, acelerándose el proceso de deterioro en los últimos años próximos a la esperanza de vida, también es cierto que desgraciadamente, existe una inmensa casuística basada en hechos de puro azar que pueden truncar el desarrollo normal del proceso biológico.

- Tras las anteriores reflexiones, nos hemos aventurado a **proponer un modelo que combina la parte estocástica del proceso y los datos de las observaciones realizadas con un ajuste empírico-determinista**, tanto en el caso particular de la red estudiada como en las llevadas a cabo por otras **administraciones valientes y comprometidas con las sociedad** que ponen a disposición sus estudios de valoración de los deterioros detectados en sus correspondientes redes. Podemos afirmar que gran parte de los avances futuros en materia de gestión de puentes vendrán de la mano de la publicación y análisis de las bases de datos de observación de la evolución real de las estructuras, que en combinación con la aplicación de las herramientas matemáticas correspondientes, nos permitirán ir caracterizando cada vez mejor el proceso. En países como los Estados Unidos de América, se está comenzando a publicar parte de los datos, siendo esto impensable a día de hoy en nuestro país, donde nos encontramos que unas pocas empresas consultoras especializadas tienen el conocimiento y desarrollo en su poder, y por motivos obvios de competitividad e integridad de su componente innovador, no están dispuestas a compartirlas con la comunidad científica. Nuestro modelo plantea una identificación de las virtudes y defectos de ambos métodos, el estocástico según las cadenas de Markov y el empírico-determinista obtenido con la campaña experimental, con la **aplicación de la combinación mediante un ajuste envolvente y unas simplificaciones del lado de la seguridad** que se explican en el Capítulo 4 “Modelo de Predicción del Deterioro”, resolviendo el primero de los problemas necesarios para poder establecer un sistema de gestión de puentes: **tener una buena aproximación de la manera en la que van a evolucionar las estructuras de la red gestionada.**
- No entendemos en base a qué criterios los únicos documentos de referencia en España (Guía para la realización de inspecciones principales de obras de paso en la Red de Carreteras del Estado 2012 e ITPF-05) fijan la periodicidad para los procesos de inspección principal. Por ello, una vez que tenemos nuestro modelo de deterioro definido, con una buena aproximación a la evolución del índice de estado con el tiempo, **introduciremos el periodo entre las inspecciones como una variable del proceso de optimización de la toma de decisiones, no como un valor fijo e**

inamovible. Se trata de minimizar las campañas necesarias de este tipo de inspección, que dependiendo del tipo de estructura, condiciones de acceso y nivel de interferencia al usuario, puede llegar a ser un valor muy significativo de los costes totales del ciclo de vida de la estructura. Quizás, queremos pensar que no de manera premeditada, **los sistemas de gestión existentes desprecian el término de costes de las inspecciones,** cuando realmente si la realización de la inspección conlleva el corte de carriles, la necesidad de medios especiales para el acceso como plataformas o camiones pasarela, podemos encontrar que en muchas ocasiones dicho coste sea superior incluso a la labor de mantenimiento que se desprenda de la aplicación de las recomendaciones del sistema de gestión. Por tanto, **ajustemos nuestras campañas a las necesidades reales que se obtienen de nuestro modelo de predicción del deterioro, no a plazos preestablecidos sin justificación alguna.**

- Utilización de **métodos alternativos a las técnicas clásicas de optimización,** que si bien son adecuadas en otros campos de la ingeniería, **fracasan estrepitosamente en la resolución de problemas de asignación de recursos en materia de gestión de infraestructuras.** Seleccionamos y adoptamos, por tanto, una potente herramienta matemática mediante la **aplicación de algoritmos evolutivos como novedoso ejemplo en el que se puede identificar su gran adaptación para la resolución de este tipo de problema, con el contraste basado en la campaña experimental llevada a cabo.** Su idoneidad viene justificada por la capacidad de generar soluciones de tipo entero ante una función objetivo a optimizar de componentes discretos, no diferenciable, con posibilidad de atacar por diferentes flancos el problema mediante los procesos de mutación, reproducción y crossover, evitando así caer en óptimos locales. Además, al descubrir las limitaciones de los análisis de optimización realizados por la literatura y sistemas implantados actualmente, que centran sus esfuerzos, bien con una concepción global de la red, decidiendo globalmente si actuar o no sobre una determinada estructura, bien en un planteamiento parcial de componentes de puente, que en ningún caso llevan a una asignación adecuada de recursos. Ante esto, **proponemos un innovador sistema que realiza una doble optimización secuencial nivel de puente** (llegando a analizar cada componente durante el plazo para el que fijemos nuestra estrategia de mantenimiento) **y nivel de red,** determinando la conveniencia de actuación o no sobre cada uno de los puentes a partir de los datos del primer nivel de componentes.
- **El problema teórico de optimización en particular, y el proceso global de gestión en general, deben dejar la suficiente flexibilidad para adaptarse a los plazos reales de inspección, tipos de actuación, restricciones presupuestarias, decisiones políticas, etc.** La rigidez de las propuestas existentes en el mercado llegan a hacer pensar que los desarrolladores de los sistemas han vivido poco o nada la realidad del funcionamiento de las administraciones y de los propios ciclos económicos de los países. Por ello, ajustar un plazo de estrategia sin la flexibilidad necesaria, es un error que la mayoría comete. No dejar la suficiente amplitud para ajustar el tipo de actuación, determinando la medición sobre la que se va a llevar a cabo, las condiciones de acceso para llevarla a cabo y el grado de intensidad con el que se va a realizar, puede llevar a

un planteamiento excesivamente encasillado del problema, no útil para el gestor. Por otra parte, como lamentablemente hemos vivido de manera especialmente aguda en nuestro país en los últimos años, las condiciones socioeconómicas del momento pueden llegar a plantear unas limitaciones presupuestarias para las cuales el sistema debe estar preparado, tal y como hemos planteado en nuestra propuesta, y que no es habitual en otras herramientas de gestión. Finalmente, conocido por todos los que compartimos nuestro desarrollo profesional con el contacto continuo con las administraciones, hemos podido comprobar que decisiones políticas por convenios con algún alcalde o municipio, pueden cambiar radicalmente los criterios de actuación, sin ningún tipo de fundamento técnico, siendo ésta una variable ante la cual el sistema debe dejar al usuario reflejar, por ilógicas que sean, las políticas de mantenimiento acordadas. Dejamos abierta nuestra herramienta para que el usuario realmente el sistema con las decisiones realmente llevadas a cabo, y sea capaz de volver a recalcular todo el problema.

CAPÍTULO 3

INVENTARIO, INSPECCIONES Y ESTADO DE CONDICIÓN

3.1. Definición y mantenimiento de inventarios

3.1.1. Concepto y aplicación

Sin duda, se trata de la ineludible tarea que todo sistema de gestión, ya sea de puentes o de cualquier otro elemento de la carretera, debe disponer como punto de partida para la implantación de dicha herramienta. Como se reflejaba en el capítulo anterior, históricamente, la génesis del proceso de desarrollo del conocimiento estaba basada en las campañas de inventariado realizadas, con gran limitación de medios para ello, pero con una clara apuesta por el ensalzamiento de la fundamental tarea de conocer qué elementos son objeto de gestión dentro de la red administrada.

La literatura existente y las herramientas específicas de gestión son buena muestra de la amplia variedad de criterios y metodologías utilizadas para la elaboración de inventarios. No obstante, se trata de un proceso de caracterización de puentes, aplicando un orden y nivel de detalle más o menos profundo, para conformar una base de datos representativa de la red gestionada.

Nuestro país posee una sistemática propia para la **elaboración de los inventarios**, similar a la de otros países desarrollados, aunque con diferencias dentro de los campos variables de toma de datos disponibles, oscilando desde los más sencillos con 60, hasta los más complejos, que pueden llegar a los 1.200 campos. Ha sido desarrollada por la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento en colaboración con diversas consultoras de ámbito privado, y se titula “Guía para la realización del inventario de obras de paso” publicada en el año 2.009.

En base a estas recomendaciones, con una serie de simplificaciones que las hagan más prácticas, hemos elaborado unos formatos para la materialización del inventariado de la red estudiada, reflejados en el **Anexo B “Fichas de Inventario”**. Pensamos que se debe evitar que las fichas sean demasiados extensas, ya que para eso deben estar los propios proyectos de construcción y finalización de obra. Se debe evitar la propuesta de infinidad de fichas en con huecos en blanco, que plantean una distracción y dificultad al técnico que las revisa. Un buen ejemplo del formato idóneo para estas fichas lo muestra el profesor Javier León González en su presentación “Análisis de riesgos para gestión de infraestructuras”. Propone que deberían parecerse al Documento Nacional de Identidad de una persona, con la información justa para poder ubicar el puente, su tipología, datos y materiales principales, y su identificación de condición de crítico dentro de la red. Como se adelantaba en el Capítulo 2 “Estado del Estado del Conocimiento”, incluso en países desarrollados como España, no existe un inventariado de todos los puentes existentes en las diferentes jerarquías viarias, reduciéndose exponencialmente su grado de aplicación según pasamos de la Red de Interés General del Estado (R.I.G.E.) a niveles comarcales e incluso locales. Para el caso práctico seleccionado de muestra de red analizado, como se ampliará en el capítulo 6

del presente documento, hemos verificado que las carreteras de nivel comarcal, como las gestionadas por la Consejería de Fomento de Castilla-La Mancha, carecen de un inventario formal de la red de puentes que forman parte de las carreteras titularidad de esa administración. Se pudo contrastar que, lejos de tratarse de un caso excepcional, es lo más común dentro de las vías gestionadas por las comunidades autónomas y diputaciones españolas.

En España hay, de forma aproximada, 18.000 km de vía de ferrocarril convencional entre los que se englobarían unas 6.500 estructuras, que suman más de 130 km de longitud. En cuanto a la red de Alta Velocidad, se puede estimar en la actualidad una longitud de la red en unos 4.000 km de vía, en los que habría unos 150 viaductos de más de 50 m y unas 400 estructuras adicionales entre pasos superiores y estructuras de menor entidad. Si bien a este respecto no se han encontrado datos, suponiendo una longitud media de los viaductos de 200 m y 25 m para el resto de estructuras, se obtendría un total de unos 30 km de viaductos y de 10 km de obras de paso de menor entidad.

La red de carreteras de España tiene, a 31 de diciembre de 2010, 165.802 Km de los cuales 25.733 están gestionados por la Administración Central y acogen el 51,3% del tráfico. Las Comunidades Autónomas gestionan un total de 71.464 Km están y los 68.606 km restantes por las Diputaciones. El número de estructuras existentes en la red de carreteras del estado, se estima en la actualidad en unos 17.500 puentes con una longitud estimada de 1.075 km con una superficie de 1350 ha y unas 18.500 obras de paso de menor entidad, menos de 10 m de longitud.

Si bien realizar la valoración económica del valor patrimonial de las estructuras de las redes anteriormente descritas resulta una tarea demasiado ambiciosa ante la falta de datos y parámetros concretos, se puede estimar en unos 12.000 millones de euros como orden de magnitud, el valor de las estructuras correspondientes a la Red de Carreteras del Estado y de ADIF, si las construyéramos nuevas en la actualidad.

Toda la exposición anterior nos lleva a una importante reflexión acerca del campo de actuación que queda pendiente en nuestro país en materia de gestión. Este es el punto de partida sobre el que se basarán posteriores campañas de inspección, evaluación de estado del puente, optimización de recursos, elaboración de bibliotecas de daños y valoraciones, estando pendiente de su desarrollo, en gran medida.

3.1.2. Elementos constitutivos: datos esenciales del inventario

Todo inventario debe identificar la estructura objeto de análisis dentro de un marco general de red en el que se encuentra ubicado. Por ello, se requiere la obtención de una serie de parámetros iniciales básicos, que configurarían lo que habitualmente denominamos ***“Datos Generales de Inventario”***:

- Carretera a la que pertenece
- Punto kilométrico, y en su caso, margen en la que se encuentra
- Provincia y término municipal
- Denominación
- Codificación

Se puede observar dentro del **“Anexo B. Fichas de Inventario”** el contenido propuesto para las fichas generales de inventario establecidas para nuestro SGP.

Por su parte, focalizando la obtención de datos para cada una de las estructuras, tendríamos la diferenciación de los habituales niveles establecidos en la literatura de más reciente difusión, que serían el **nivel de puente**, que estaría definido por los elementos o componentes de los que está formado cada una de las estructuras y el **nivel de red**, dentro del cual cada uno de los puentes sería un elemento que formaría parte del conjunto gestionado. En consonancia con gran parte de la literatura existente en esta materia de inventarios, hemos dividido la definición del inventariado de cada puente en los siguientes elementos:

a) Subestructura-Estribos y pilas:

Identifica los elementos de soporte del tablero o elemento estructural de contacto directo con el tráfico que lo solicita, tanto en los extremos (estribos) como en los apoyos intermedios (pilas). Dentro de las fichas, se determina la tipología, geometría, disposición y configuración de conexiones. Diversas publicaciones separan a su vez este concepto en la parte de fuste o elemento vertical de sustentación de la superestructura con la parte de apoyo sobre el terreno, la cimentación. Si bien se trata de elementos diferenciables, teniendo en cuenta la puesta en servicio de un SGP, partiendo normalmente de un estado de desconocimiento y falta de documentación de los puentes, no será conveniente en la mayoría de los casos aplicar esta subdivisión, ya que en las campañas de inventariado e inspecciones de actualización, difícilmente se podrán obtener datos directos de dicha cimentación. No sería justificable económicamente, máxime en casos de redes comarcales o locales de escasos recursos, llevar a cabo campañas de caracterización de dichos elementos, por lo que se establece la percepción global del concepto “subestructura” como el conjunto de fuste más cimiento, compatible con la propuesta de inspección visual para determinar el estado y los deterioros como efectos indirectos detectables en las partes visibles de los estribos o pilas.

b) Superestructura-Vanos:

Constituida, en general, por la parte resistente del puente en contacto con la carga solicitante, viene definida por diversas tipologías o configuraciones de tableros, sobre vigas, losa, viga+losa, cajón, etc. Se identifican contemplando los datos más relevantes asociados al tablero, las conexiones con la subestructura y elementos de apoyo, así

como los materiales que la constituyen. En el caso de la subestructura, al contrario de lo que proponemos para la subestructura, sí que establecemos la conveniencia de aplicar una diferenciación que es, sin duda, de gran utilidad para el correcto funcionamiento de un SGP, y sobre lo que hay diversas tendencias e interesantes discusiones en la bibliografía. Se trata de la puntualización de introducir el término que la literatura anglosajona define como “deck” que se diferencia del resto de la superestructura. En diversas publicaciones se establecen las desventajas de no realizar esta diferenciación, que nos llevarían a penalizar el estado del puente por encima de la realidad. Esto es así porque, por ejemplo, si determinásemos que el estado conjunto de la superestructura de un puente está en valores de estado de condición no deseables debido a deterioros observados en la parte más superficial del tablero, como podría ser el mal estado de la impermeabilización del mismo, y sabiendo que dentro de los parámetros habituales de reparación, el mayor coste unitario viene establecido por las labores de mejora del estado de condición de los elementos estructurales (subestructura y superestructura), estaríamos penalizando de manera desproporcionada la posibilidad de mejorar el estado a nivel de puente con acciones probablemente mucho más económicas que si englobamos todo el conjunto en un único concepto. En términos generales, si acometer el paso de un nivel de estado de condición inferior a uno superior en el elemento “deck” como parte independiente de la superestructura tiene una valoración económica de entre un 5-15% que lo que supondría ascender ese mismo paso si consideramos esta parte dentro del conjunto, podremos optimizar la correcta asignación de recursos que nuestra herramienta realice.

c) Juntas:

Se describe, dentro de las fichas correspondientes, la tipología de junta de calzada, el material, la geometría y todos aquellos datos que definen su disposición. Si bien algunos sistemas de gestión introducen estos elementos dentro de los equipamientos o sistemas auxiliares, por la multitud de problemas detectados durante las campañas de inspección, consideramos que merecen un capítulo específico, dando lugar, como se describe en las reflexiones obtenidas dentro del presente trabajo, a la discusión que plantea la conveniencia de tender, como muchos países desarrollados en Europa están haciendo, hacia “puentes integrales” tras diversos análisis de los costes de ejecución frente a los costes de mantenimiento. En España, el porcentaje de puentes realizados con disposición de juntas, tanto transversales como rompiendo la continuidad estructural entre subestructura-superestructura mediante los apoyos con materiales elastoméricos es mayoritario, a pesar de que nos encontramos posteriormente con unas tediosas labores de conservación y mantenimiento.

d) Equipamientos-Elementos no estructurales:

Engloban aquellos elementos relacionados con la protección y funcionalidad del puente, como son los sistemas de drenaje, muros de contención, bajantes, cunetas, pavimento, señalización, terraplenes, etc. Se caracterizan mediante como elementos no estructurales, y aunque como su propia definición indica se trataría de partes independientes de la propia configuración estructural del puente, deben ser inspeccionados con la misma intensidad que el resto, ya que pueden ser el origen de importantes problemáticas que finalmente se traducirían en patologías que pueden llegar a incidir incluso en la seguridad estructural del propio puente. Relativamente comunes son las problemáticas que comienzan con pequeños deterioros en los sistemas de desagüe y drenaje y acaban convirtiéndose, si no se realizan las labores de mantenimiento y reparación necesarios, en importante patologías generalizadas en la estructura. Por ello, dentro de la elaboración del inventario deben quedar definidos, para formar parte de una buena base de datos para las inspecciones a realizar durante el periodo de gestión de la red.

**3.2. Propuesta específica de inspección ajustada a los medios
disponibles en redes locales de escasos recursos**

Dentro de los estudios desarrollados por el Proyecto Europeo COST (2003) elaborado por la Dirección General de Transporte de la Comisión Europea, en materia de inspección de puentes, se observan una serie de contrastes entre los diversos sistemas de gestión implantados en los países europeos que fueron analizados. En concreto, las diferencias se podrían resumir en:

- Incompatibilidad en la división realizada de los elementos constituyentes del puente.
- Alcance, profundización y sistematización de las inspecciones.
- Periodicidad en la realización de las mismas.

Por este motivo, en la elaboración de un sistema de gestión de puentes, se deben concretar estos aspectos en función de las particularidades de la red estudiada. Por ello, como punto de partida para el desarrollo de las campañas de inspección, se realizarán las siguientes consideraciones previas:

- Datos previos de proyecto, obra e inventariado.
- Disponibilidad de medios humanos y económicos a disposición de las labores de seguimiento del mantenimiento y conservación de puentes.
- Formación de los equipos a disposición.
- Coherencia con las normativas y recomendaciones del país dentro del que se encuentra la red objeto de gestión. Aunque se hagan simplificaciones, mejoras o correcciones al planteamiento de estos documentos (en caso de existencia),

se debe tender a la operatividad entre SGP entre los diferentes niveles de administraciones estatales, regionales y locales.

- Determinación de periodos entre inspecciones, con un balance de costes ajustado a los recursos y necesidades del responsable de la gestión.
- Elección de sistemas adecuados de inspección. La profundidad y sistematización debe ser coherente con el objetivo de minimizar los costes obteniendo los máximos beneficios para el usuario, por lo que deben ir en paralelo a la importancia y características de la red.

Así, dentro del presente trabajo, hemos visto interesante implementar desde el origen el caso práctico de la aplicación de un sistema de gestión a un conjunto representativo de estructuras de la Red de Carreteras de la Provincia de Albacete administradas por la Consejería de Fomento de Castilla-La Mancha, orientando la preparación de dicha herramienta hacia los parámetros específicos de la red, que en este caso plantean unas referencias de partida según los siguientes aspectos:

1º) ***Inexistencia absoluta de un inventario formal*** de la red de puentes gestionados, así como de estrategias y planificación de campañas de inspección. Por tanto, no se dispone de ninguna base de datos.

2º) ***Baja densidad de número de puentes por kilómetro***, por debajo de una estructura por cada 10 km. en la mayoría de las carreteras.

3º) ***Tipología predominante: puentes de vigas-losa y marcos/cajones/pórticos de vanos con luces medias por debajo de 20,00 m.*** para anchos de tablero estrictos a la anchura de carretera convencional

4º) ***Nivel bajo de medios propios humanos y materiales*** que esta administración puede destinar a las labores de gestión. Actualmente, se dirigen todas las labores de conservación, tramitación y obra de nueva construcción mediante unos Servicios Periféricos que cuentan con 3 Técnicos de zona (uno para cada sub-zona en la que se divide la provincia) y un Jefe de Servicio que coordina los trabajos. En una línea de mando inferior se sitúan 3 Vigilantes asociados a cada una de las áreas.

5º) ***Inexistencia de contratos externos*** específicos para las ***labores de gestión de puentes***, centrándose los servicios de los que disponen para tareas de vialidad inercial y mantenimiento de calzada.

6º) ***Tráficos pesados de moderada importancia***, menores, en la mayoría de los casos, del 10% del total de la intensidad media diaria, no comparable a los grandes itinerarios del transporte que soporta la red estatal.

7º) **Terreno llano en gran parte de la provincia**, con excepciones en la zona sur, en las formaciones de orografía más accidentada en la Sierra del Segura y la Sierra de Alcaraz.

8º) Cruce de **cauces de pequeña entidad** salvo casos excepcionales, sobre los ríos Júcar, Segura, Valdemembra y Córcoles.

9º) **Existencia de itinerarios alternativos**, al disponer de un importante entramado de carreteras de jerarquía superior (Red Carreteras del Estado) e inferior (Diputación).

3.2.1. División de la inspección en los principales componentes constitutivos del puente

Cada sistema de gestión debe establecer una división previa de los elementos que forman parte de sus estructuras, de tal manera que el conjunto integre lo que habitualmente se denomina en la bibliografía como **“Nivel de puente”**. Tanto la naturaleza de la red, como los medios disponibles, así como los principales problemas detectados, pueden orientarnos en el establecimiento de unas variables de inspección u otras. En nuestro caso, en base a las problemáticas encontradas en las labores de mantenimiento y conservación, determinamos la necesidad de dividir el puente en los siguientes elementos constitutivos objeto de inspección, en paralelo con la guía norteamericana National Bridge Inventory (NBI):

Figura 3.1. – Adaptación componentes principales de los puentes según NBI EEUU, 1995

- a) **Plataforma:** Término proveniente del concepto “deck” utilizado dentro de la literatura anglosajona que, tal y como se explicaba en anteriores apartados, plantea una interesante diferenciación de la parte más superficial de los tableros (impermeabilización, recubrimiento superior, evacuación superficial del agua, etc.) con respecto al resto de la superestructura, dando lugar a una ponderación adecuada de las actuaciones de mantenimiento y conservación, con respecto a otras divisiones planteadas en otros sistemas de gestión, que pueden penalizar el coste de reparación respecto a las necesidades reales para producir una mejora o incremento en el estado de condición del componente. Se trataría de establecer una separación teórica de gran aportación práctica entre la parte no estructural de la superestructura (plataforma) y el propio elemento portante.
- b) **Pavimento:** capa de material, habitualmente formada por un acabado de aglomerado asfáltico u hormigón, sobre la que se produce el contacto directo de la rodadura de los vehículos que circulan sobre la estructura.
- c) **Juntas:** Dispositivos que permiten movimientos relativos entre partes de una estructura, como pueden ser los debidos a efectos reológicos, cambios de temperatura, acortamientos por acción de pretensado, cargas de tráfico, asientos diferenciales u otros efectos. Habitualmente tienen un alto nivel de degradación, y en el caso de la red sobre la que hemos aplicado el caso práctico, no estamos ante una excepción, por lo que determinamos claramente que merecen un apartado específico de inspección y valoración.
- d) **Apoyos:** También denominados “aparatos de apoyo”, son componentes intermedios que transmiten las cargas del tablero hacia las pilas o estribos. Pueden no existir produciéndose una de transmisión directa de solicitaciones, en tipologías con nudos rígidos, como puede ser el caso de los puentes pórtico. Sin embargo, en España existe muy poca tradición hacia la utilización de puentes integrales y es muy habitual la solución estructural de apoyos mediante elementos que absorban las cargas actuantes, permitiendo algún movimiento y coaccionando los restantes. La diversidad en tipologías de apoyos es amplia, desde los neoprenos zunchados más comunes hasta los más sofisticados apoyos tipo “pot” que permiten pequeñas rotaciones. En los mismos términos que las juntas, merecen una atención especial en labores de inspección puesto que representan uno de los componentes más vulnerables al deterioro, pudiendo tener además consecuencias de extrema gravedad si no se realizan las correspondientes labores de conservación y mantenimiento.
- e) **Superestructura:** definida por la parte estructural formada por el tablero y los elementos que configuran la estructura portante principal. Nótese el peso de elemento de soporte que se le atribuye a este componente, y que como ya se ha señalado, plantea una clara diferenciación con respecto al

componente plataforma o “deck” a la hora de atribuir estados de condición y dotación presupuestaria para políticas de conservación y mantenimiento. Junto con la subestructura, los posibles daños detectados durante las inspecciones se traducen en actuaciones con una repercusión económica y de seguridad estructural que hacen ponderar estos componentes con un peso relativo mucho más elevado que el resto. De hecho, se trata de los únicos que puede hacer llegar al puente a un nivel de estado de condición de fallo o puesta en fuera de servicio.

- f) **Subestructura:** englobaría los estribos, pilas, muros, que configuran el soporte y elemento de transmisión de las cargas transmitidas desde el tablero hasta la cimentación. En términos de componentes objeto de inspección, más aún para el caso de redes gestionadas por administraciones regionales o locales con escasos recursos, no se plantea la posibilidad de poder dividir la subestructura en la parte correspondiente a la cimentación y la relativa al fuste. Sería interesante e incluso podría ayudar a predecir problemas a edades tempranas, aunque por su coste inicial de realización, se limita su inspección a la detección de deterioros indirectos que puedan extraerse de la observación directa de alzados de muros y fustes de estribos y pilas. Al mismo nivel que la superestructura, constituyen la base estructural del puente, con una importancia prioritaria a la hora de determinar el estado global de la condición del puente.
- g) **Acabados:** considera aquellos elementos objeto de inspección, no estructurales, que contribuyen a garantizar las condiciones funcionales y de confort del puente, entre los que se encuentran los pavimentos, aceras, balizamiento, señalización, sistemas de drenaje, etc. Son componentes de corta vida útil en general, muy vulnerables a su puesta fuera de servicio debido a su fuerte exposición al contacto directo con el tráfico, normalmente con un bajo coste relativo de reposición, siendo muy frecuente que en las inspecciones no suelen alcanzar el nivel máximo de estado de condición, aunque también se caracterizan porque, como es lógico, ningún sistema de gestión les atribuye la capacidad de repercutir su mal estado en niveles que pongan al puente bajo límites de ruina o colapso, por lo que tendrán un umbral de incidencia moderado respecto a la traducción de sus deterioros en el nivel de puente.

3.2.2. Alcance, profundización y sistematización de la inspección

3.2.2.1. Tipo de inspección. La inspección principal como núcleo central de los sistemas de gestión

Como se enunciaba en el Capítulo 2, existe un compendio generalizado dentro del crisol de sistemas de gestión desarrollados por las diferentes administraciones

gestoras en lo referente a los tipos de inspección, recogidos en muchos casos en normativas, recomendaciones y contratos de conservación, denominándose:

- Inspecciones básicas o rutinarias
- Inspecciones principales
- Inspecciones especiales

Básicamente, las diferencias entre los tres tipos de inspección se encuentra en la periodicidad con la que se realiza, el grado de profundidad, los medios materiales y humanos utilizados, y las conclusiones obtenidas.

1º) Las **inspecciones básicas o rutinarias** tienen por objeto vigilar, lo más permanentemente posible, el estado general del puente. Se trata de inspecciones visuales, en las cuáles el **personal encargado de realizar el mantenimiento general de un tramo de carretera o vía férrea** (por lo general sin formación técnica respecto a temas estructurales pero con gran experiencia en obras, a nivel práctico) detecta posibles fallos aparentes, que deben registrarse en los correspondientes informes de inspección. Estas inspecciones dan lugar a un registro continuo de datos, que van conformando la historia clínica de la estructura. Se suele llevar a cabo mediante los contratos que las administraciones establecen para la conservación integral de la infraestructura, y que dependiendo de la jerarquía de la vía y de la administración gestora, puede realizarse de una manera más o menos correcta. Lo ideal es dotar a las personas dedicadas a la tarea de inspección, de la información previa de la que se disponga referida a las estructuras a revisar. Además es bueno introducirles conceptos generales de inspección, a partir de catálogos de daños, dándoles un criterio que les permita evaluar la importancia de los posibles daños observados durante la campaña de reconocimiento.

Las frecuencias de realización varían entre las administraciones, planteando **periodos máximos de un año a quince meses entre inspecciones** para abarcar las variaciones meteorológicas de un ciclo completo. No obstante, parecería lógico que estos periodos fuesen indicados en las inspecciones principales.

El resultado, como se ha comentado, suele acompañarse de un **informe o ficha modelo**, en el que se comenta el estado en el que se ha encontrado la estructura. Si la administración tuviese un inventario actualizado de los puentes de cada tramo de infraestructura, sería fácil plantear una sistematización y actualización de la información. En el caso habitual de que el inventario no esté ni siquiera creado, será una buena oportunidad para hacerlo, desconociendo parte de la vida de la estructura, no siendo deseable llegar a situaciones en las cuáles existan grandes lagunas referentes a inspecciones intermedias.

De este tipo de inspección **puede determinarse la necesidad de la realización de una inspección de tipo superior**, bien sea principal, o en caso extremo puede dar paso a

una inspección especial, ante posibles episodios de importantes deterioros que hagan dudar de la capacidad estructural del propio puente.

Lo anteriormente definido sería el estandarte idóneo como base de las labores de inspección. El caso práctico abordado dentro de la presente investigación nos ha hecho volver a entender que en nuestro país, a pesar del gran desarrollo en infraestructuras existente, todavía se está muy lejos de la aplicación de todos los niveles de seguimiento establecidos en el resumen del estado del arte. La mayoría de las comunidades autónomas, como la que se ha estudiado, carecen de estos servicios de vigilancia continua de sus carreteras, mucho más aún de la parte relativa a sus estructuras, por falta de medios técnico-económicos.

2º) Inspecciones principales. Su objeto es recopilar información, en un momento dado, del estado funcional y resistente de una estructura, determinando si cumple con los requisitos mínimos para seguir dando servicio, o por el contrario plantea la necesidad de alguna actuación que garantice unos niveles aceptables de seguridad, con una valoración objetiva del estado del puente y de la vida útil restante de cada componente.

Aunque, en general, se trata de inspecciones visuales sin utilización de información complementaria ni instrumentación especial, se efectúa una revisión mucho más profunda y detallada que en las inspecciones básicas. Son tareas propias de estas inspecciones las nivelaciones del tablero, mediciones geométricas, cuantificación de desplomes de pilas, distancias entre paramentos de estribos, etc.

El personal que realiza este tipo de inspecciones debe estar formado por **técnicos titulados, cualificados y especializados en materias estructurales**, con experiencia suficiente en este tipo de trabajos, llevando a cabo las consignas que se exponen en la publicación del Ministerio de Fomento “Guía para la realización de inspecciones principales de obras de paso en la Red de Carreteras del Estado”, y que hacen referencia a las condiciones de la realización de la inspección, “pudiendo ver” (accediendo a todos los puntos de inspección), “sabiendo ver” (inspectores con formación y experiencia adecuada) y “sabiendo ver lo que se quiere ver” (análisis previo de la estructura a inspeccionar, de tal forma que no se improvise la sistemática de trabajos a realizar, sino que esté estudiada y delimitada con anterioridad).

La **periodicidad entre cada inspección**, según recogen diferentes instrucciones, recomendaciones y contratos de conservación, debe estar en el entorno de los **5 años**. No obstante, fruto de las conclusiones y recomendaciones de inspecciones previas, el intervalo de tiempo para la siguiente inspección principal puede estar condicionado, modificándose en función del estado en el que se encuentre en dichas inspecciones. Lo ideal cuando existe un sistema de gestión de infraestructuras implantado, con un inventario que refleje el historial clínico del puente, es tomar el punto de referencia o de partida adoptando como base una primera inspección principal realizada antes de

la puesta en servicio. A partir de los datos obtenidos inicialmente, podríamos actualizar y contrastar, en sucesivas inspecciones, la evolución de la estructura.

La inspección culminará con un **informe que refleje los resultados obtenidos**, siendo necesario reflejar **de manera clara y concisa un “índice de daño”**, que permita (si es preciso) tomar medidas para solventar las problemáticas observadas. Fruto de estos informes, se puede aconsejar profundizar más en la inspección, en un escalón superior, solicitando la realización de inspecciones especiales, o acortando el intervalo de tiempo hasta la próxima inspección principal. En cualquier caso, las conclusiones se recogerán en fichas tipo de inspección, formando parte del historial del puente, de tal manera que en la planificación de la siguiente inspección será necesario revisar aquellos aspectos que pudieron resaltarse anteriormente, y cuyo seguimiento se hace necesario para asegurar el buen funcionamiento de la estructura.

En este tipo de inspección reside la viabilidad de la implantación de los sistemas de gestión de puentes a la mayoría de las redes, incluidas las de carreteras de escasos recursos. Como explicaremos más adelante, nuestra propuesta cambia radicalmente la jerarquía y proceso de inspecciones, planteando a las **inspecciones principales como núcleo central de los sistemas de gestión**.

3º) Inspecciones especiales. Su objeto es realizar un análisis de posibles daños observados en inspecciones principales previas, tales como fisuras y deformaciones excesivas, o con **motivo de alguna situación singular** (accidente, riada, socavación, etc.), aportando datos objetivos respecto al nivel de seguridad de la estructura frente a las solicitudes a las que vaya a estar expuesto.

Obviamente, este tipo de inspecciones requiere la colaboración de **equipos multidisciplinarios** de personas expertas en diversas materias (estructuras, geología-geotecnia, materiales, etc.) dirigidos por una persona con experiencia y conocimientos en patologías y métodos de evaluación de seguridad estructural, y que, tras campañas de toma de datos planificadas en función de estudios previos, ensayos para la caracterización estructural y de la durabilidad, y meditadas reflexiones y cálculos en oficina, permitan formular un diagnóstico que clarifique la situación en la que se encuentra la estructura en estudio, proponiendo, si es necesario, unas actuaciones (terapia de reparación) que garanticen la seguridad del puente en cuestión.

La **periodicidad** no viene predefinida en normativas ni contratos de conservación, sino que suelen ser **fruto de informes obtenidos de inspecciones principales** o de decisiones de las administraciones gestoras, debido a **situaciones excepcionales**, en las cuales tras algún tipo de incidente, se duda del estado en el que ha quedado la estructura.

El resultado de este tipo de inspecciones será un **informe técnico**, que contenga una descripción de la motivación que ha llevado a realizarlo (antecedentes), una

descripción de los trabajos llevados a cabo y los resultados obtenidos (trabajos de campo y ensayos), un **análisis detallado de la estructura y de su nivel de seguridad** (estudio estructural) y unas **conclusiones** en las que puedan proponerse **medidas a realizar o ratificar la capacidad de la estructura para seguir dando servicio**.

Una reflexión acerca de los conceptos comúnmente aceptados en materia de inspecciones y nuestras aportaciones:

Nuestra propuesta concreta iría a contracorriente de la conexión establecida entre los niveles de inspección comentados. Por tanto, reafirmamos la determinación de las **“inspecciones principales”** como la **herramienta más eficaz para la obtención de datos de evaluación del estado de la red y núcleo central de los sistemas de gestión**. Todo el sistema de gestión, partiendo del propio inventario, debe girar alrededor del concepto de este tipo de inspección. Aunque podamos encontrar sistemas de estructuras de nueva construcción, sino se aplica el sistema de gestión desde el primer momento, dichas estructuras pasarán a ser existentes justo un instante después de su puesta en servicio. Por ello, resaltamos las siguientes particularidades de nuestro planteamiento:

1º) Debe pasar a ser exigible por normativa, y no por recomendación, la elaboración de una **inspección principal acompañada de la correspondiente prueba de carga de toda aquella nueva estructura que pase a formar parte de la red gestionada**, con criterio de aceptación el alcance de los máximos niveles de valoración de los que disponga el sistema de gestión.

2º) **Inspección principal como base de todo el sistema de gestión**, siendo las **inspecciones básicas o rutinarias un complemento subsidiaria a las principales**, de tal manera que las primeras sean las que guíen, orienten y formen la planificación de las segundas. No nos parece correcto que la responsabilidad de detectar posibles deterioros recaiga sobre personal sin formación técnica específica que no pueda ver ni distinguir procesos que no son de su alcance, por lo que nos parece mejor estrategia que las propias **inspecciones principales sean las que aporten las directrices de vigilancia y seguimiento a las básicas y rutinarias**. Es decir, de cada inspección principal, debe salir un criterio de seguimiento de deterioros que se le encomiende a las inspecciones básicas, de tal manera que durante el intervalo que transcurra hasta la siguiente inspección principal las inspecciones subsidiarias de la vigilancia rutinaria sean los ojos del técnico. Este proceso, a su vez, generará una formación continua y grado de compatibilidad de servicios sobre todos los agentes implicados que fomentará una mejora constante del propio proceso de gestión.

3º) Las **inspecciones especiales no forman parte directamente de los sistemas de gestión de puentes**. Este tipo de actuación forma parte de la propia tarea de rehabilitación y refuerzo no atribuible a deterioros normales del proceso de deterioro. Muchas veces, se trata incluso de procesos forzados por intereses particulares de las

propias empresas especializadas, siendo un porcentaje muy reducido de las inspecciones que si pertenecen al sistema de gestión, las básicas y principales, de entre el 1-2% las que finalmente necesitan de una caracterización y análisis detallado, con una propuesta de proyecto de reparación, rehabilitación o refuerzo.

4º) Los **inventarios no son herramientas inmóviles** que se realizan una vez y tienen vigencia ilimitada. **Deben nutrirse de los propios datos de las inspecciones principales**, ya que pueden modificarse las condiciones constitutivas de la propia estructura, debido a modificaciones, ampliaciones o actuaciones de reparación y mejora. De la misma manera, en la consideración de condición de crítico de un puente, la propia estimación de evaluación de estado es un criterio que debe contemplarse en la ficha de inventario de la estructura, y es objeto de actualización continua. Un puente puede pasar a ser crítico en función de su estado, además de las condiciones de accesibilidad, importancia histórica, tráfico soportado y condiciones extremas de cauce o elemento de paso existente. En las estructuras existentes, dependiendo del nivel de organización de la administración gestora y de la propia edad del puente, es posible que la información del proyecto y obra ni si quiera esté disponible. Lógicamente, se trata de una información de gran importancia, aunque el fin último de los propios inventarios de una red de un sistema de gestión no sea el conocimiento detallado de cada uno de los elementos de la estructura, sino que se trata de conocer de manera sintética el patrimonio objeto de gestión. Los datos de detalle se recopilarán y caracterizarán en el caso de la necesidad de una actuación de rehabilitación o mejora, siendo parte de las inspecciones especiales, fuera del sistema de gestión, su total determinación en detalle.

5º) **Hay retorno para aquellas redes que han carecido de implantación de sistema de gestión**. El no haber llevado a la práctica la puesta en marcha de un sistema de gestión desde su inicio, aunque supone una pérdida de información de la propia historia de los puentes de la red de gran importancia, no supone un proceso totalmente irreversible. Aquí también se plantea como punto de partida para restaurar las condiciones de gestión la elaboración de una campaña de inspecciones principales que culminarán con la determinación de un inventario básico (conocer qué gestionamos) y unos parámetros de evaluación de red que serán la base la determinación de puntos críticos de componentes y validación de criterios de seguimiento de aquellos deterioros detectados.

6º) **Eliminación de aspectos subjetivos habitualmente atribuibles a las inspecciones principales**. Todo el sistema de gestión se basa en el “input” de este tipo de inspecciones, por lo que la sistematización, codificación y estandarización debe dejar poco a la improvisación. Los deterioros que se presenten habitualmente en los puentes suelen ser bastante repetitivos en función de la propia naturaleza, tipología, disposición y materiales constitutivos, lo que nos debe dar lugar a elaborar una recopilación detallada de los mismos, con una codificación que debe estar en poder

del inspector de campo que simplemente, disponiendo de la formación necesaria, debe identificar daños en la estructura real inspeccionado con respecto al catálogo de deterioros que proponemos como herramienta indispensable dentro de cualquier sistema de gestión de puentes. Como se ampliará en apartados posteriores, debemos dotar al inspector de puentes de las herramientas necesarias para elaborar una valoración totalmente “aséptica” y libre de criterios particulares, que nos lleven a las habituales posturas del ingeniero “alarmista” que bajo procesos normales atribuibles al funcionamiento lógico de las estructuras alerte de problemas de mayor envergadura que la realmente acaecida, muchas veces incluso por el propio sentimiento de responsabilidad y por otra parte, evitar también aquellos análisis que aunque moderados y ajustados a la realidad, no respondan a unos criterios sistematizados y estandarizados y que para cada inspección sean prácticamente un deterioro no codificado, aunque en realidad sea la repetición de un daño habitual.

En la siguiente figura se muestra el contraste entre la habitual concepción jerárquica establecida en los sistemas de gestión implantados hasta el momento y nuestra propuesta:

Figura 3.2. – Organización conceptual inspecciones de un sistema de gestión

3.2.2.2. Sistematización: periodos entre inspección y protocolo

En las actuales instrucciones y contratos de conservación se establece una periodicidad para cada uno de los tipos de inspección, sin especificar detalladamente en función de qué parámetros se determina dicho periodo. En realidad, parecen más bien intervalos fijados en función de valores generales, sin un criterio diferenciador entre estructuras. Dado el elevado número de puentes que cada administración puede llegar a gestionar, parece razonable crear algún tipo de prioridad, en función de parámetros objetivos de la vía de la que forman parte, además de establecer unos mínimos. Tanto en las publicaciones de la Dirección General de Carreteras (Guía para la realización de Inspecciones Principales de Obras de Paso en la Red de Carreteras del Estado. 2012) como en las instrucciones relativas a puentes de ferrocarril (ITPF-05), se establecen unas periodicidades para las inspecciones, que se resumen en la siguiente tabla:

Tipo de inspección	Periodicidad Carreteras (Sistemas de Gestión)	Periodicidad Ferrocarriles (ITPF-05)
Inspección básica o rutinaria	S / Contrato de conservación	Anual
Inspección principal	Cada 5 años*	Cada 15 años*
Inspección especial	S / Índice de gravedad**	S / Índice de gravedad**

Tabla 3.1. – Periodos habituales aplicados a las inspecciones de puentes

* Estos periodos corresponden a situaciones normales, en las cuáles no se presentan problemas en inspecciones rutinarias precedentes.

** De cada inspección principal se obtendrá un índice de gravedad escalado, que según la valoración, concluirá la necesidad de la realización de una inspección principal.

Como puede observarse en las distintas recomendaciones y contratos de conservación, los periodos suelen estar prefijados sin un criterio objetivo justificado que diferencie entre tipos de redes, puentes, etc.

Desde el punto de vista técnico, deberían integrarse diversos parámetros a la hora de plantear la planificación de estrategias de inspección. Esto no es habitual en los sistemas de gestión existentes.

Entendemos que una vez que conozcamos con un nivel de confianza adecuado las curvas de evolución del estado de deterioro de los componentes de nuestras estructuras, tendremos criterio técnico suficiente para establecer de manera justificada estos intervalos de periodicidad entre inspecciones, que no tienen ni siquiera porqué ser constantes en el tiempo, pudiendo determinar a través de la vida útil de la estructura periodos con un seguimiento más relajado y periodos más intensos. Esto también nos llevará a plantear el propio coste de inspección como una variable más en el proceso de optimización de los recursos a labores de gestión.

Como se muestra en la imagen a continuación, si solapamos las curvas de deterioro de todos los componentes de una estructura, veremos que hay elementos que en la vida útil global del puente quedarían fuera de servicio en varias ocasiones y que, por tanto, deben ser sustituidos. Los denominaríamos como componentes fusibles dentro del proceso de deterioro. Además, puede darse el caso que entre reposiciones efectuadas a estos elementos sea necesaria la actualización de algún elemento principal, por lo nuestro sistema de gestión debe estar dotado de umbrales de alerta que nos anuncien la necesidad de una próxima inspección.

Figura 3.3. – Esquema teórico solape de curvas de deterioro de componentes de puente

Sin embargo, este criterio técnico contrastaría con la realidad presupuestaria y política, ya que no siempre sería posible llevar a cabo campañas con la cadencia que el nivel de exigencia para determinadas estructuras demandase. Por ello, el sistema debe ser lo suficientemente flexible como para poder permitir al usuario reflejar estas decisiones ajenas a los criterios.

Por otra parte, el protocolo habitual para la realización de las inspecciones principales nos llevará a la sistematización del siguiente proceso:

- **Fase 1:** Recorrido perimetral en la parte inferior por los paramentos verticales del puente, comenzando por el estribo inicial, denominado Estribo-1 (E-1), así como los elementos de acompañamiento, muros, derrames de tierra, etc.

Figura 3.4. – Recorrido inspección parte inferior Fase 1. Guía Inspecciones Principales RCE, 2012

- **Fase 2:** Revisión visual mediante un recorrido en zig-zag de las caras inferior y laterales del primer vano del tablero, registrando todos los deterioros detectados.

Figura 3.5. – Recorrido inspección parte inferior Fase 2. Guía Inspecciones Principales RCE, 2012

- **Fase 3:** Inspección perimetral de la parte inferior de la pila (en caso de haberla), partiendo de la primera de ellas, Pila P-1.

Figura 3.6. – Recorrido inspección parte inferior Fase 3. Guía Inspecciones Principales RCE, 2012

- **Fase 4:** Reiteración del proceso para los siguientes vanos, V2, V3,... y de la misma manera para las pilas P2, P3,...

Figura 3.7. – Recorrido inspección parte inferior Fase 4. Guía Inspecciones Principales RCE, 2012

- **Fase 5:** Recorrido perimetral de la parte inferior por los paramentos verticales del puente, cerrando el recorrido por el estribo final, denominado Estribo-2 (E-2), así como los elementos de acompañamiento, muros, derrames de tierra, etc.

Figura 3.8. – Recorrido inspección parte inferior Fase 5. Guía Inspecciones Principales RCE, 2012

- **Fase 6:** Inspección de la zona superior del tablero y equipamientos, realizando un recorrido perimetral con suficiente profundización.

Figura 3.9.–Recorrido inspección parte superior Fase 6. Guía Inspecciones Principales RCE, 2012

3.2.2.3. Alcance y desarrollo de la inspección

3.2.2.3.1. Inspección de la subestructura

Cimentación

Se trata, sin duda, de la zona más complicada de inspeccionar dentro de cualquier tipo de estructura. En el mejor de los casos se trata de un elemento enterrado superficialmente, aunque en otros puede llegar a estar bajo el agua y a grandes profundidades, planteando las pertinentes complicaciones para realizar una observación directa. Por tanto, dentro de una inspección principal, normalmente no se llega más allá de evaluar el estado de la cimentación mediante **observación indirecta**, a través de registros de asentos, giros, desplomes, etc. En una fase más avanzada, dentro de inspecciones especiales, se puede llegar a realizar trabajos subacuáticos realizados por personal especialista, acompañados de sondeos de caracterización.

Dado que los problemas en la cimentación suelen ser una de las causas más comunes de colapso de puentes, debe realizarse, inexcusablemente, la inspección de los efectos indirectos que puedan tener origen en esta zona, a pesar de las dificultades para establecer relaciones de este tipo.

En general, el efecto de un movimiento en la cimentación se traduce de diferente manera según la tipología estructural y las condiciones de continuidad de la estructura. Por ello es necesario destacar la necesidad de que estas inspecciones sean realizadas por equipos expertos que sepan interpretar los resultados obtenidos. Se muestra a continuación, a título de ejemplo, el diferente comportamiento frente a un desplazamiento, dependiendo de que se trate de un vano de puente recto isostático, hiperestático y de bóvedas (a, b y c).

Figura 3.10. – Importancia de un movimiento en cimentación según tipología

León González, J. 2007

En el primer caso, se traducirá en un movimiento de ajuste de los tramos isostáticos colindantes, si la magnitud del movimiento no rebasa los límites de las condiciones de apoyo, caso en el cuál se podría producir un colapso parcial de la estructura. En tramos hiperestáticos este movimiento se traducirá en la introducción de unos esfuerzos sobre el tablero superior, que si están dentro de los límites admisibles, podrán ser soportados. En el último caso, con bóvedas, pensadas para trabajar a compresión en todas sus secciones, gracias a su especial geometría, puede ser causa inminente de colapso, debido a que se pueden introducir tracciones que rápidamente degraden la estructura. Todo esto, según el modelo de sistemas de gestión de puentes planteado, con una entrada de datos a partir de inspecciones visuales, deberá ser detectado a través de deterioros en los elementos de apoyo e incluso en el tablero.

A continuación se sintetizan algunos de los desperfectos más típicos que se pueden encontrar en la cimentación:

	DESCRIPCIÓN DEL DAÑO	CAUSA
FALLOS EN EL CIMIENTO	Disgregación de macizos de hormigón	Disolución y alteración química del material que constituye el macizo
	Dislocaciones y fractura del cimiento	Crecimiento de raíces y choques en zonas adyacentes al cimiento
	Agotamiento del material constitutivo	Solicitaciones elevadas, por encima de la resistencia del material de cimentación
FALLOS EN EL TERRENO	Cavidades y descompresión del terreno, con introducción de movimientos impuestos y reducción de capacidad portante en cimentaciones superficiales	Socavación del terreno
	Cavidades y descompresión del terreno, reduciéndose el rozamiento lateral, disminuyendo la sobrecarga de tierras en punta y aumentando los asientos bruscos, en el caso de cimientos sobre pilotes.	Socavación del terreno
TERRAPLÉN ADYACENTE	Superficies erosionadas	Deficiencias en sistemas de drenaje superficial, zonas de escorrentía, etc.
	Pie de talud afectado por arrastres y erosiones	Socavaciones producidas en épocas de crecida del cauce
DEFENSAS HIDRÁULICAS	Descalces en muros y máscaras de defensa	Crecidas extraordinarias
	Arrastre de bloques y gaviones	Corrientes de agua
	Hundimientos de defensas de escollera	Corrientes de agua
OTROS ELEMENTOS DE PROTECCIÓN	Podredumbre de elementos de madera	Ciclos saturación - secado, según diferentes niveles de agua
	Abrasión y arrastre de materiales	Circulación continua de agua
	Corrosión de elementos metálicos	Ataque químico, reacciones de oxidación del elemento metálico

Tabla 3.2. – Deterioros habituales en elementos de cimentación

Por tanto, en las inspecciones a realizar se deberán chequear todos los puntos expuestos anteriormente, sabiendo que en muchos casos la principal fuente de datos para evaluar el estado de la cimentación es la observación indirecta mediante chequeos periódicos de los movimientos, con trabajos topográficos de detalle, que nos proporcionen diversos fotogramas del puente en el tiempo. A veces se pueden realizar observaciones directas en zonas descubiertas o superficiales, que pueden dar una idea cualitativa del estado del cimiento. También, como se ha comentado, tiene especial importancia mantener un registro con datos referentes a la topografía del cauce o terreno colindante a la zona del cimiento, de cara a poder detectar posibles alteraciones, antes de que se traduzcan en socavaciones o erosiones que provoquen colapsos inesperados. En lechos fluviales se ha de profundizar el trabajo de reconocimiento con trabajos de topografía que determinen la dinámica del fondo del cauce y del lecho cercano a la zona del cimiento, interpretando posibles cambios en la

corriente, que pueden también ser fruto de la presencia de fosas o socavaciones del terreno circundante a la cimentación de pilas y estribos de puentes.

Estribos

Dentro de las inspecciones realizadas sobre estribos ha de tenerse en cuenta la gran variedad existente (estribo cerrado, abierto, flotante sobre el terraplén o sobre cabezal pilotado, muro en vuelta, etc.) con sus propias particularidades.

No obstante, hay unas partes comunes a un gran número de estribos, de cuyo estudio se pueden obtener conclusiones que ayuden a sistematizar, en la medida de lo posible, los problemas más típicos de este elemento. Las partes esenciales a chequear son:

- Cimiento (con todas las peculiaridades y problemáticas estudiadas en el anterior apartado)
- Paramento del muro (puede eliminarse en estribos flotantes)
- Zona de apoyo de la superestructura
- Losa de transición

A continuación se sintetizan algunos de los desperfectos más típicos que se pueden encontrar en los estribos:

DESCRIPCIÓN DEL DAÑO	CAUSA
Grietas verticales en muros	Asentamiento del terreno. Agudizan el daño los asientos diferenciales
Fisuras en la unión muro estribo-muro acompañamiento	Elevado empuje, debido a una excesiva compactación o subestimación del material de relleno
Fisuras verticales en muros	Retracción y falta de juntas
Fisuras en coacciones impuestas por los estribos	Interacción entre deformaciones del elemento que limita los movimientos y la superestructura
Ataques superficiales y erosiones	Infiltraciones en zonas con estado deficiente del drenaje y corrientes en arranques y partes bajas

Tabla 3.3. – Deterioros habituales en estribos de puentes

Se acompaña un esquema general de los problemas más habituales encontrados en los estribos, los cuales han de ser chequeados en cada una de las inspecciones realizadas:

Figura 3.11. –Zonas de inspección estribos. Defectos más frecuentes. Del Cuvillo, R. et al, 1988

Pilas

De la misma manera que en los estribos, en las pilas existe una gran variedad respecto a la tipología (material, fuste único o múltiple, forma, etc.). En las inspecciones se tendrá que controlar y registrar la tipología, forma, dimensiones, la función estructural que realiza, y cualquier otro dato que caracterice las pilas.

Además de los puntos de inspección y problemas propios de los estribos, cabe destacar algún daño característico de las pilas:

DESCRIPCIÓN DEL DAÑO	CAUSA
Fisuras verticales en paramentos de pilas de grandes dimensiones	Asientos diferenciales de cimentaciones superficiales
Fisuras en uniones pila-tajamar	Deformaciones de superestructura y asientos de pila. Acción de corrientes
Fisuras verticales en coronación de pilas	Elevadas cargas concentradas
Desconchones	Impactos de tráfico inferior

Tabla 3.4. – Deterioros habituales en pilas de puentes

Se acompaña un esquema general de los problemas más habituales encontrados en las pilas, los cuales han de ser chequeados en cada una de las inspecciones realizadas:

Figura 3.12. – Zonas de inspección en pilas. Defectos más frecuentes. Del Cuvillo, R. et al, 1988

3.2.2.3.2. Inspección de los aparatos de apoyo

Se trata, como anteriormente se establecía, de elementos que transmiten las cargas de la superestructura a las pilas y estribos. Existe gran tipología respecto a materiales, dimensiones y situación, siendo objeto de la inspección esclarecer minuciosamente todos estos parámetros generales. Además, una de las características más importantes es el tipo de coacción que introducen, ya que dará lugar a diferentes problemáticas. Es importante chequear en las inspecciones el estado general de almohadillas de apoyo y encastramientos.

A continuación se sintetizan algunos de los problemas más típicos que se pueden encontrar en los aparatos de apoyo:

DESCRIPCIÓN DEL DAÑO	CAUSA
Material constitutivo deteriorado	Corrosión en elementos metálicos, degradaciones en elastómero, corrosión en zunchos
Deformaciones excesivas y bloqueos	Defectos y problemas del mecanismo de control de movimientos del aparato de apoyo
Fallos en protección contra la corrosión	Eliminación o pérdida de capa galvanizada o pintura anticorrosiva

Tabla 3.5. – Deterioros habituales en aparatos de apoyo

En las inspecciones, será importante realizar las mediciones y chequeos que pongan de manifiesto posibles daños no detectados a primera vista.

Dentro de los apoyos zunchados (material elastomérico intercalado con chapas de acero), se recomienda:

- Medir los desplazamientos respecto a posición inicial
- Controlar deformaciones excesivas de los apoyos bajo cargas verticales
- Vigilar los encastramientos parciales del aparato de apoyo en las almohadillas
- Contrastar distorsiones producidas, con respecto a las previstas, en condiciones similares
- Observar degradaciones en elastómero y armaduras (despegues, grietas, corrosión, etc.)

En el caso de apoyos deslizantes, tipo teflón, es recomendable:

- Chequear bloqueos placa-teflón
- Desplazamientos bloque elastomérico-placa deslizamiento
- Controlar deformaciones y abombamientos de la placa de deslizamiento
- Observar posibles despegues entre teflón y elastómero

3.2.2.3.3. Inspección de la superestructura

Se describen los puntos singulares que deben inspeccionarse en tableros de puentes de hormigón armado y pretensado, extensible para otras tipologías con las analogías y equivalencias pertinentes. Se establecía dentro de la red objeto de estudio un amplio porcentaje de estructuras englobadas dentro de:

- Tableros de vigas prefabricadas armadas o pretensadas más losa
- Tableros de vigas “in situ” armadas a pretensadas más losa
- Losas de hormigón armado o pretensado
- Arcos de hormigón armado o en masa
- Pórticos de hormigón armado
- Cajones prefabricados o “in situ” de hormigón armado o pretensado

A continuación se sintetizan algunos de los desperfectos más típicos que se pueden encontrar en estas tipologías correspondientes a tableros de hormigón armado y pretensado:

DESCRIPCIÓN DEL DAÑO	CAUSA
Problemas de durabilidad. Corrosión.	Falta de compacidad del hormigón de recubrimiento, débil espesor, atmósfera agresiva (presencia de cloruros)
Fisuras en fase de construcción	Coqueras, retracción plástica, deformaciones de cimbras, segregación del hormigón, asientos diferenciales, cambios de temperatura, etc.
Fisuras en servicio	Retracción, gradientes térmicos, sollicitaciones, fluencia, ataques químicos, adherencia, etc.
Deformaciones excesivas	Menor rigidez de lo necesario, movimientos impuestos, contraflechas excesivas, etc.

Tabla 3.6. – Deterioros habituales en tableros de hormigón armado y pretensado

Además de las situaciones anteriormente comentadas, en el hormigón pretensado se pueden producir problemas adicionales, debido a desequilibrios tensionales inducidos por curvaturas impuestas en diversas partes de los tendones. Además se debe prestar especial atención a la inyección, que puede originar problemas de durabilidad.

El control de la fisuración debe ser estricto, chequeando que esté siempre dentro de los límites marcados por la normativa vigente (anchuras entre 0,1 – 0,3 mm son admisibles según el ambiente en el cual se encuentre la estructura). Además es importante registrar la evolución de estas fisuras, para clasificarlas como “sin evolución o muertas” o “vivas” variando según el estado de carga.

Especial cuidado se deberá tener con respecto a la fisuración no prevista de elementos de hormigón pretensado, siendo objeto de una inspección especial, por la pérdida de rigidez del elemento, además de los posibles problemas de durabilidad asociados.

Se acompaña un esquema general de los problemas más habituales encontrados en los tableros, los cuales han de ser chequeados en cada una de las inspecciones realizadas:

Figura 3.13. – Zonas de inspección en superestructura. Defectos más frecuentes.

Del Cuvillo, R. et al, 1988

Es importante también controlar el funcionamiento del drenaje, observando zonas con manchas o eflorescencias, fruto de acumulaciones de agua. También se debe prestar especial atención a elementos particulares como los diafragmas, que tienen una importante misión de rigidización y acoplamiento. No deben tener síntomas de fisuración excesiva ni degradación.

Como se ha mostrado en la figura 3.10., son puntos de especial interés de inspección, en elementos de hormigón pretensado, las zonas de anclaje, por la acumulación de tensiones. Se anotará la situación general del tablero, describiendo posibles fisuras, abombamientos, desprendimientos, armaduras vistas, meteorización, impactos, eflorescencias, filtraciones, etc.

Otro punto de especial interés serán las juntas y zonas de apoyo, produciéndose acumulaciones de fisuras debidas a deficientes dimensionados ó armados, inadecuados sistemas de apoyo, inexistencia de juntas y coacciones impuestas. Se deberá inspeccionar a fondo el estado funcional, de limpieza y de evacuación de aguas de estas zonas.

3.2.2.3.4. Inspección de los equipamientos

Se debe abordar, al menos, la detallada inspección de los siguientes posibles daños:

	DESCRIPCIÓN DEL DAÑO	CAUSA
CALZADA Y ACERAS	Deficiencias en pavimentación (grietas, fisuraciones superficiales, deformaciones, desgaste, etc.)	Normalmente debidas al uso de la vía, agotamiento del firme, pérdida de adherencia.
	Hundimientos, baches y deformaciones de origen profundo	Reflejo en los equipamientos de problemas en subestructura y superestructura
JUNTAS DE DILATACIÓN	Despegues, defectos en su funcionamiento (coacción de movimientos), alzado fuera de plano.	Disposición mal encajada de la junta, elementos de obstrucción a los movimientos, deterioro del material de relleno
	Agrietamientos y fisuración	Falta de juntas necesarias
SISTEMA DE DRENAJE	Acumulaciones de agua e introducción en la estructura	Ausencia de sistema de evacuación, falta de pendiente transversal, fallos en conducciones de evacuación
	Atascos y obstrucciones	Arrastre de material, falta de mantenimiento y limpieza
	Humedades, ataques a elementos estructurales, fugas, obstrucciones	Fallos en la estanqueidad

Tabla 3.7. – Deterioros habituales en equipamientos

3.2.2.4. Objetividad del proceso. Catálogo de daños

La no sistematización y asignación de criterios comunes a la hora de valorar tras las inspecciones el estado de los puentes, puede llevar a una entrada de datos que distorsione el resto del proceso de formación de modelos de predicción del deterioro y asignación de recursos, por lo que la importancia de llevar a cabo este proceso bajo unos **requisitos de rigurosidad y homogeneidad**, en este sentido, es de máximo nivel.

Para ello, determinaremos un **listado de daños habituales con su codificación** correspondiente, de tal manera que el inspector no tenga que introducir cada daño de manera desorganizada sino que se trate de identificar los deterioros según los códigos a su disposición, que normalmente saldrán reflejados ya que la casuística de daños tiene un carácter bastante reiterativo según los componentes, tipologías, etc. No obstante, no se trataría de un registro cerrado, sino que irá actualizándose mediante la incorporación de nuevos códigos a la base de datos del sistema de gestión, para ir nutriendo e identificando cada vez un grupo más extenso de daños habituales. A su vez, se deberá acompañar una medición de cada daño, en la unidad que corresponda, que nos permitirá traducir, posteriormente, la evaluación de daños en coste económico tras la aplicación de precios unitarios de unidades. Estos precios unitarios será una variable a disposición del usuario, ya que generalizar unos precios de referencia es una tarea complicada y cuyas conclusiones podrían aplicarse en un momento determinado, no pudiendo extenderse más allá.

Por tanto, nuestras inspecciones deben calificar y cuantificar los daños de manera:

1º) Objetiva, independiente del Equipo de Inspección que ha realizado el trabajo.

2º) Homogénea, formatos reglados y minimización de errores de transcripción.

3º) Comparable, con baremos y criterios similares, para poder determinar el posterior Orden de Prioridades de actuación, bajo criterios técnicos.

4º) Fiable, evitando dejar daños de importancia sin detectar.

Estos propósitos se lograrán mediante la ya comentada adaptación de un sistema de codificación de daños y su normalización dada por un **"Catálogo de Deterioros"** redactado con tal fin. En este catálogo se deben representar los daños que más frecuentemente se detectan, en función del elemento en que pueden aparecer y de su material constitutivo.

Dicho catálogo debe indicar el tipo y causa del daño, la unidad de medida a utilizar para cada tipo de deterioro y los límites de los niveles de gravedad.

En el **Anexo E "Codificación y Catálogo de Daños"**, se muestra un ejemplo del listado inicial de codificación de deterioros y fichas de daños.

3.3. Estado de condición de los puentes

3.3.1. Concepto

El objetivo principal de las tareas de inspección es ***clasificar el estado del puente mediante una valoración objetiva del alcance, tipología, intensidad, extensión y gravedad de los posibles deterioros detectados durante las visitas realizadas***, que puede aportar datos extraordinariamente importantes para el posterior análisis del proceso de deterioro y de las medidas de mantenimiento y reparación para optimizar el estado de la estructura a lo largo de su vida útil.

Por ello, tras la propuesta de desglose del puente en los componentes definidos en anteriores apartados, bajo criterios de realización de inspecciones de tipo principal, con periodicidades determinadas de las propias demandas de los umbrales mínimos admisibles, ajustadas a los ciclos rotativos de los mandos de dirección de administraciones regionales y locales, abordando la sistematización y alcance descritos, culminaremos el proceso mediante la definición de uno de los conceptos más comunes dentro de los diferentes sistemas de gestión, el ***estado de condición***.

Se trata de un índice asignado a partir de las inspecciones visuales de cada uno de los componentes que conforman el puente, con una ponderación razonada de la importancia relativa de las partes que lo integran.

De esta manera, diferenciamos, tal y como plantean diversos ***proyectos de investigación como COST y BRIME***, los siguientes ***índices según el nivel de análisis***:

1º) Nivel de elemento o componente dentro del puente – Índice de Deterioro

Para cada uno de los deterioros detectados dentro de los componentes de la estructura, se determinará un índice parcial que tendrá en cuenta la intensidad del tipo de daño, su extensión relativa a la superficie o volumen del elemento, previsión de propagación con el tiempo y el efecto producido en las condiciones de seguridad y durabilidad. Este parámetro quedará definido como el ***Índice de Deterioro***.

2º) Nivel de puente – Estado de Condición

Analizados los índices relativos a los daños de cada uno de los elementos, se plantea como objetivo fundamental la determinación de un índice global que defina el estado de conservación del puente como resultado de la integración de los parámetros parciales obtenidos en el nivel anterior, el ***Estado de Condición*** del puente.

3.3.2. Evaluación y clasificación

Tras analizar las diferentes justificaciones sobre los diversos criterios de evaluación y clasificación de los componentes, y de manera implícita del puente como elemento independiente, nos decantamos por una valoración del estado de condición basada en las tendencias anglosajonas, que plantean, frente a los criterios adoptados por bastantes sistemas de gestión europeos, una valoración del estado de cada componente del puente mediante un índice que denominaremos **(Índice de Estado de Componente, IEC) con una escala de cero a nueve (0-9), donde nueve (9) correspondería con el óptimo estado**. Este rango de valores, frente al planteamiento de cero a cinco (0-5) permite una mayor sensibilidad a la hora de reflejar el estado real del componente, considerándose suficientemente amplio como para describir de forma adecuada los estados de conservación de los diferentes elementos y servir de base para los posteriores procesos de optimización. El límite de estado de componente compatible con unas condiciones de servicio asumibles quedaría fijado en un valor de tres (3), momento a partir del que se debería plantear la puesta fuera de servicio de la estructura, evitando que el progreso de los factores de degradación pudiera desembocar en colapsos con el puente en servicio, con las dramáticas consecuencias que se persigue evitar en todo momento.

De manera análoga, el estado global del puente se puede caracterizar mediante otro índice **(Índice de Estado de Puente, IEP)**, con la misma escala (0-9), obtenido a partir de la ponderación de los diferentes índices de componentes obtenidos, mediante la correspondiente aplicación de los factores de importancia adoptados.

La FHWA (Federal Highway Administration) de los Estados Unidos de América propone unos baremos de valoración de estado en la misma línea de lo adoptado en nuestro sistema de gestión, con valoración 9 para un estado excelente del elemento y 0 para el fallo y puesta fuera de servicio de manera irreparable. Por su parte, para el paso de nivel componente a puente, se utilizarán las conclusiones de la repercusión económica/seguridad reflejadas en los estudios publicados por Yanev, 1997 que plantean para cada elemento del puente (subestructura, superestructura, plataforma, etc.) un factor de importancia. Dentro del Capítulo 5, se amplían todos estos conceptos.

Como fruto de la campaña de inspecciones llevadas a cabo, tendremos una valoración por componentes, en función de los deterioros encontrados. Se propone, tal y como se muestra en el **Anexo D “Fichas de Inspecciones”** un método de cuantificación del estado de condición de deterioro relativo, estableciendo un estado ideal del componente en el que no exista ningún tipo de daño, y un catálogo de daños extraído de la experiencia en la degradación de estructuras, complementado con las propias incidencias encontradas en la campaña de campo llevada a cabo. El listado de deterioros por componente se ordenará en categorías de daño, según la importancia e

incidencia que pueda ejercer sobre el elemento, con una atribución estadística, calibrada mediante la incorporación de datos extraídos de las inspecciones específicas realizadas en la red objeto de gestión. Además, se contemplan diversos conceptos planteados en la “Guía para la realización de Inspecciones Principales” del Ministerio de Fomento, y que permiten una mejor determinación del grado de deterioro y su evolución, frente a métodos tradicionales de asignación simplificada del estado de condición. Se trata de añadir a cada deterioro una etiqueta adicional, denominada **marca de condición**, que mediante un sistema binario, con valor 0/1, en función de si procede su aplicación o no, amplía la información del daño y su importancia relativa, a partir de los siguientes criterios:

- Caracterización del daño (extensión (N)+grado (G)+evolución (E))
- Mantenimiento de sus propiedades funcionales (F)
- Afección a otros elementos (A)

Para cada componente con detección en la inspección de un deterioro, se debe aportar una cuantificación objetiva de la “marca de condición daño” que englobaría la extensión en la que se produce, la importancia y alcance del deterioro y la posibilidad de que se produzca un avance en la degradación del elemento si no se actúa a tiempo.

Por su parte, se debe determinar si las anomalías producidas en el componente pueden poner en peligro la continuidad de las condiciones funcionales para las que el puente fue concebido.

Además de este concepto, la evaluación del daño debe cuantificar una medición lo más detallada posible, ya que en el proceso de asignación de recursos estas mediciones se traducirán en valor monetario comparativo. Es importante contemplar los aspectos asociados a la tipología de puente, material y acceso, ya que como es lógico, por ejemplo, el coste de una sustitución de apoyos deteriorados no sería el mismo en un puente con pilas de altura moderada al caso de grandes alturas. Por ello, es necesario establecer unos criterios de actuación en función de la dificultad relativa de actuación.

Finalmente, el inspector debe identificar la posible afección del deterioro detectado dentro de un componente en el resto de elementos que conforman el conjunto del puente.

3.4. Puntos críticos de los componentes del puente

Se definiría como punto crítico, para cada tipología de puente, y sus componentes asociados, una serie de puntos a los que será necesario prestar una especial atención durante el proceso de inspección, ya sea en la siguiente inspección principal como en el seguimiento rutinario, debido a que es ahí donde se detecta el origen de los principales deterioros del puente.

En el **caso de cimentaciones**, tendríamos que establecer si el puente tiene los siguientes puntos críticos:

- Alguna cimentación superficial dentro de la zona de cauce o sus proximidades. Se debe realizar un seguimiento en profundidad de sus protecciones. Una misma estructura puede tener pilas o estribos críticos y no críticos, como podemos ver en la siguiente figura:

Figura 3.14. – Diferenciación de cimentaciones críticas – no críticas en la misma estructura

- Diferenciación de tipos de cimentación dentro de la misma estructura, frente a posibles asientos diferenciales.
- La agresividad del terreno debe quedar definida, y determinará un punto crítico de los componentes asociados.

En el **caso de estribos**, tendríamos que determinar si el puente tiene los siguientes puntos críticos:

- Losas de transición, que de manera sistemática provocan problemas de asiento relativo terraplén-estribo.
- Muros frontales o de guarda bajo juntas de dilatación, que suelen recibir los efectos de una inadecuada impermeabilización y desagüe de las mismas.
- Cargaderos sobre muros de tierra reforzada, que habitualmente plantean problemas de vegetación y asientos, en casos de mala ejecución.
- Estribos flotantes y su relleno frontal, ante el peligro de formación de cárcavas en el relleno frontal.

En el **caso de pilas**, tendríamos que valorar si el puente tiene los siguientes puntos críticos:

- Determinación de aquellas que no son accesibles o de gran altura.

- Cabeceros bajo juntas de calzada, con la misma problemática comentada para los estribos.
- Pilas situadas en carrera de marea, por la afección derivada del impacto recibido.
- Bases de pilas, por la propia configuración estructural de tratarse de elementos cuyo funcionamiento es una ménsula simple, con la concentración en esa zona de los esfuerzos solicitantes.

En el **caso de aparatos de apoyo**, tendríamos que plantear si el puente tiene los siguientes puntos críticos:

- Críticos por su propia naturaleza de tener una vida útil inferior al del resto de la estructura.
- En determinados puentes, la accesibilidad puede ser problemática.

En el **caso de tableros**, tendríamos que tener en cuenta si el puente tiene los siguientes puntos críticos:

- Culatas de vigas, por la concentración del pretensado y extremos de losas por filtración a través de las juntas.
- Zonas bajo sumideros mal diseñados e ejecutados, que sistemáticamente evacúan el agua sobre vigas, losas o paramentos.
- Vigas de borde y paramento lateral de losas, debido a la inexistencia o ineficacia de los goterones, que finalmente acaba planteando que el agua escurra bajando por estos elementos estructurales.
- Vulnerabilidad ante impactos, sobre todo en casos en los que tengamos un gálibo reducido.
- Sistema de protección frente a la corrosión y soldaduras, en puentes metálicos.
- Interior de cajones cerrados, que ante un inadecuado sistema de drenaje, podrían pasar a ser elementos estancos de almacenamiento de agua, con el compromiso para la sobrecarga que ello supone.

En el **caso de equipamientos**, tendríamos que verificar si el puente tiene los siguientes puntos críticos:

- Imbornales y rejillas, sobre todo como elemento de fácil deterioro frente a obstrucciones y colmatación.
- Bajantes de terraplenes y bordillos, y su habitual descalce.

- Sistemas de impermeabilización, y las consecuencias sobre los elementos principales de la estructura.
- Juntas de dilatación, con una degradación sistemática tanto en sus condiciones de estanqueidad (congénitas a la construcción) como en su aterramiento y bloqueo. También son elementos críticos, en tanto en cuanto su vida útil es muy inferior al del resto de la estructura y pueden afectar tanto a la seguridad como al confort del usuario.
- Pretiles y barandillas. Elementos metálicos expuestos a procesos de corrosión. En el caso de los pretiles de hormigón, estarían condicionados por el posible ataque de sales fundentes. Seguimiento de los elementos de anclaje a la estructura principal, que puede suponer una ineficacia de su nivel de contención.

Por tanto, ***se deben identificar y acotar los puntos críticos para cada una de las tipologías concretas y elementos gestionados, aplicando de la misma manera unos criterios de umbrales admisibles para su correcto seguimiento.***

3.5. Condición de crítico de la estructura

Dentro de un conjunto de puentes integrados en una red viaria objeto de gestión, existe una multitud de tipologías y particularidades funcionales, de accesibilidad, durabilidad, etc. que plantean la necesidad de realizar una jerarquía dentro del conjunto de estructuras gestionadas. Proponemos dentro del presente trabajo la necesidad primordial de jerarquizar la red, de manera conjunta a los valores obtenidos en las inspecciones, de tal manera que se puedan plantear unos valores mínimos admisibles para el estado de condición del puente, imponiendo, por ejemplo, que estos valores fuesen más restrictivos para una estructura que tuviese una mayor facilidad frente a la pérdida de capacidad sobre la accesibilidad, captación de tráfico, durabilidad, índice de condición cercano al límite de servicio, patrimonio histórico-artístico, etc. que aquellos cuya puesta fuera de servicio no supusieran grandes costes derivados. La aplicación de estas condiciones de contorno como restricciones, reducen el tiempo computacional de optimización de asignación de recursos con respecto a su tratamiento durante la gestión de datos en las tareas de inspección y plantea un método directo para jerarquizar la red.

Para el desarrollo del S.G.P. hemos tenido en cuenta diversos parámetros para atribuir a las estructuras la condición de crítico y establecer un orden previo de prioridades, que plantearán unas condiciones de contorno, traducidas en un aumento de la exigencia para los niveles de estado de condición en paralelo al índice de prioridad que establezca un orden relativo de los puentes de la red. Estos parámetros serán:

- Existencia e importancia del cauce interceptado

- IMD
- Tipo de ambiente
- Rutas alternativas y vertebración del territorio
- Razones histórico-patrimoniales
- Índice de estado

Diferenciamos un primer grupo de parámetros englobados en una clasificación de **Condición de Crítico por Variables Pseudoestáticas:**

- ***Existencia e importancia del cauce interceptado***

El origen de la mayor parte de las catástrofes y colapsos en puentes ha sido la interferencia con un cauce, produciendo diferentes procesos de deterioro, como la socavación de sus elementos de apoyo de la cimentación, llegando a descalzar las pilas y estribos, con los efectos secundarios producidos sobre la superestructura, y en algún caso crítico, la puesta fuera de servicio de la estructura. Por ello, dependiendo de la existencia de este parámetro y la categoría, se establecerá una valoración previa, relacionada con el patrón de estabilidad relativa de Schumm, 1977, asociada al caudal y la capacidad de carga de sedimentos en fondo:

Categoría cauce interceptado	Puntuación
Cauce principal de cuenca con escorrentía continua, pendiente >1% y carga de fondo alta Morfología trenzada	5
Cauce principal de cuenca con escorrentía continua, pendiente >0,5% y carga de fondo media Morfología meándrica	4
Cauce principal de cuenca con escorrentía continua, pendiente >0,1% y carga de fondo baja Morfología recta	3
Cauce secundario de subcuenca con escorrentía discontinua, con crecidas que interfieren de forma directa sobre la estructura	2
Cauce secundario de subcuenca con escorrentía discontinua, con crecidas que interfieren de forma indirecta sobre la estructura	1
Ausencia de cauce	0

Tabla 3.8. – Asignación de valoración según el tipo de cauce interceptado

- ***Intensidad media diaria de tráfico (IMD)***

De gran importancia, por la incidencia lógica de una carga cíclica sobre la estructura, tendrá el parámetro de la intensidad media diaria de tráfico soportada por el puente.

Dentro de las diferentes instrucciones, la intensidad de tráfico viene clasificada mediante unos intervalos de % de tráfico pesado soportado por la vía. Estos datos son de fácil acceso mediante el seguimiento de las publicaciones anuales que la mayoría de las administraciones realizan a partir de campañas de aforo. Proponemos para la jerarquización de nuestro S.G.P. la siguiente valoración, en paralelo a las categorías de tráfico pesado establecidas en la normativa de carreteras 6.1. I.C.:

Categoría de tráfico	Puntuación
T0 a T00 ($IMD_p \geq 2000$ vehículos pesados / día)	5
T1 ($800 \leq IMD_p < 2000$ vehículos pesados / día)	4
T2 ($200 \leq IMD_p < 800$ vehículos pesados / día)	3
T31 ($100 \leq IMD_p < 200$ vehículos pesados / día)	2
T32 ($50 \leq IMD_p < 100$ vehículos pesados / día)	1
T42 a T41 ($IMD_p < 50$ vehículos pesados / día)	0

Tabla 3.9. – Asignación de valoración según la categoría de tráfico soportada

- **Tipo de ambiente. Clase de exposición.**

Los efectos derivados de la durabilidad, son motivos de un importante porcentaje de los procesos de deterioro llevados a cabo en las estructuras. Por ello, la agresividad del medio en el que se encuentre la estructura será un parámetro fundamental a tener en cuenta en la priorización de estructuras. Para la clase de exposición se propone, en paralelo a los tipos de ambiente recogidos en la instrucción de hormigón estructural EHE-08, la siguiente diferenciación:

Clase general de exposición	Puntuación
IV	3
IIIa, IIIb, IIIc	2
IIa, IIb	1
I	0

Clase específica de exposición	Puntuación
Qb, Qc	2
H, F	2
E	2
Qa	1

Tabla 3.10. – Asignación de valoración según el tipo de ambiente

La puntuación debida a la exposición será suma de la obtenida por la clase general de exposición más la extraída de la clase específica.

- **Rutas alternativas.**

Como se expone en el análisis de costes de explotación y mantenimiento realizado dentro del capítulo 5, el coste imputado al usuario como efecto de la imposibilidad de utilizar un determinado itinerario por permanecer fuera de servicio temporalmente una estructura supone un elemento diferenciador de gran calado. Según las alternativas al itinerario habitual afectado por las labores de reparación y mantenimiento sobre un puente específico tendremos:

Alternativas en caso de fuera de servicio	Puntuación
Ninguna	5
Con incremento de recorrido entre el 75-100% del itinerario con la estructura en servicio	4
Con incremento de recorrido entre el 50-75% del itinerario con la estructura en servicio	3
Con incremento de recorrido entre el 25-50% del itinerario con la estructura en servicio	2
Con incremento de recorrido hasta el 25% del itinerario con la estructura en servicio	1
Sin incremento de recorrido	0

Tabla 3.11. – Asignación de valoración según recorridos alternativos

De esta forma, sumando cada una de las puntuaciones de los distintos parámetros llegaremos a una valoración global de la prioridad particular para cada puente de la red mediante un término que denominaremos **Índice de Prioridad Individual (IPI)**:

$$IPI_{(i=1,n)} = \psi_1 V_{cauce,i} + \psi_2 V_{tráfico,i} + \psi_3 V_{ambiente,i} + \psi_4 V_{alternativas,i}$$

Siendo “i” el puente estudiado, “n” el número total gestionado por el sistema y los coeficientes ψ la distribución de pesos de cada uno de los factores.

Para la obtención del valor de referencia de la prioridad, se determinará el **Índice de Prioridad Característico de Red (IPCR)**:

$$IPCR = \frac{\sum_{i=1}^n (\psi_1 V_{cauce,i} + \psi_2 V_{tráfico,i} + \psi_3 V_{ambiente,i} + \psi_4 V_{alternativas,i})}{n}$$

Los valores relativos al tipo de cauce sobre el que se interfiere (en el caso de hacerlo), la intensidad de tráfico y el tipo de ambiente pueden tener una repercusión directa sobre la capacidad portante y durabilidad de la estructura, mientras que la valoración de la posibilidad de utilizar rutas alternativas incide directamente en los costes del

usuario, en caso de puesta fuera de servicio. Los coeficientes ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 y ψ_4 deben ser calibrados para los intereses y particularidades de cada tipo de red gestionada. No obstante, y en base a los anteriores razonamientos y las estadísticas recogidas en el trabajo de investigación de Muñoz E, 2011 referente al análisis de las causas de colapso en 256 casos específicos alrededor de todo el mundo, podemos plantear una primera aproximación de los valores de partida:

Figura 3.15. – Estadística de las principales causas de colapso puentes. Muñoz E, 2011 y David Sebastián Cusba, 2011

Pesos de factores a tener en cuenta en jerarquización	Porcentaje
ψ_1 (tipo de cauce)	50%
ψ_2 (intensidad de tráfico)	20%
ψ_3 (ambiente)	20%
ψ_4 (rutas alternativas)	10%

Tabla 3.12. – Asignación de pesos de los factores de jerarquización

De la estadística podemos concluir que hay una serie de causas que pueden ocurrir en un puente o en otro, en base a que se trata de sucesos independientes, como podrían ser las deficiencias en la construcción, diseño y otros agentes de más difícil acotación (fuego, impactos, etc.) y otros claramente ligados a la propia implantación de la estructura, como sería la existencia de cauce y su alta probabilidad como causa de colapso por procesos de socavación en avenidas. Integrando todos estos datos, tendremos el razonamiento de los coeficientes planteados.

A su vez, podemos establecer una diferenciación según la importancia relativa de cada una de las estructuras, mediante un término que denominaremos **Índice de Prioridad Relativa (IPR)**:

$$IPR_i = IPI_i / IPCR \quad \text{con } i=1,n$$

A partir de la obtención de la etiqueta anterior para cada puente, podremos establecer un orden de prioridades, traducido en niveles de exigencia sobre el estado de condición mínimo a mantener en cada una de ellas. Dentro del apartado anterior hemos desarrollado los criterios bajo los cuáles se regirá nuestro sistema de gestión, atribuyendo el valor límite admisible para una estructura en una cuantificación de **3** **“Estado Grave. Pérdida de sección, deterioros, desprendimientos o abrasiones que ha afectado a componentes estructurales del sistema primario. Es necesaria rehabilitación inmediata”** momento a partir del cual, aunque no se produjese el colapso, podríamos considerar la puesta fuera de servicio del puente.

Se propone elevar esos valores mínimos, aplicado como condición de contorno dentro del sistema de optimización de las estrategias de mantenimiento y conservación, a aquellos puentes que se encuentren en la siguiente jerarquía:

Estado de condición mínimo exigible	Criterio jerarquía estado 0
5	$IPI_i \geq 4$ <p style="text-align: center;">ó</p> $\frac{IPR_i - IPR_{\min}}{IPR_{\max} - IPR_{\min}} \times 100 \geq 90\%$
4	$3 \leq IPI_i < 4$ <p style="text-align: center;">ó</p> $75\% \leq \frac{IPR_i - IPR_{\min}}{IPR_{\max} - IPR_{\min}} \times 100 < 90\%$
3	$0 \leq IPI_i < 3$ <p style="text-align: center;">ó</p> $\frac{IPR_i - IPR_{\min}}{IPR_{\max} - IPR_{\min}} \times 100 < 75\%$

Tabla 3.13. – Condiciones de contorno para nuestro SGP según Condiciones de Critico Pseudoestáticas

Por otra parte, un segundo grupo de parámetros engloba aquellos condicionantes de patrimonio histórico-artístico e incluso de estrategia interna del gestor de red, que denominaremos **Condición de Critico por Variables Histórico-Vertebradoras**. Se trataría de una serie de puentes preestablecidos por el administrador, que obligarían a una especial atención, que se traduciría en unas condiciones de contorno de índices de

estado, abiertas dentro del sistema de gestión planteado, de tal manera que el propio gestor determine los umbrales mínimos.

Finalmente, un tercer grupo de parámetros que determinaría la condición de crítico de una estructura dentro de la red gestionada sería la propia puntuación relativa de las estructuras respecto al índice de condición, que englobamos en la **Condición de Crítico por Evaluación de Estado**. Esta condición de crítico sería aplicada a los puentes y sus componentes con peor estado, y que tienen un carácter variable con el tiempo, la degradación y las actuaciones realizadas. De la misma manera, el sistema de gestión debe atribuir unas condiciones de contorno respecto al tratamiento prioritario de actuación referida a estos elementos.

3.6. Plan de mantenimiento. Alcance de operaciones programadas

El siguiente esquema muestra de manera rigurosa la **relación necesaria entre las labores de inspección y las operaciones de mantenimiento** dentro de un sistema de gestión eficaz, a partir de la determinación de un **Plan de Mantenimiento** a origen:

Figura 3.16. – Esquema de relaciones entre labores de inspección y mantenimiento.
 León González, Javier. Guía para la redacción del Plan de mantenimiento, 2014

Desde la entrada en vigor de las normativas EHE-08 y EAE-11, se presenta la obligación de la redacción de los planes de mantenimiento de cualquier estructura de nueva ejecución, dentro del proyecto. Este documento plantea un importante avance con respecto a la legislación precedente, incorporando el análisis detallado de las labores de mantenimiento que se deben llevar a cabo durante la vida útil de las estructuras.

Este requerimiento, usual en otros ámbitos del conocimiento (automoción, industrial, electrodomésticos, etc.), aún no estaba recogido formalmente en el área de la ingeniería estructural. Llegada su entrada en vigor, nos propone la necesidad de acotar una serie de actuaciones de mantenimiento ordinario preestablecido, así como una serie de operaciones de mantenimiento especializado, que deben reflejarse para cada uno de los puentes, con horizontes temporales, vidas útiles y definición de actuaciones por componente a lo largo de la vida útil global de la estructura.

Las operaciones de mantenimiento quedarían definidas según la siguiente clasificación:

- **Operaciones de mantenimiento ordinario:** Van asociadas a la propia observación de las inspecciones básicas o rutinarias, sin necesidad de evaluación previa, y deben estar totalmente definidas dentro del plan de mantenimiento. Son realizadas por los equipos de conservación integral de la red. Dentro de este tipo de operaciones entrarían las labores de limpieza general y de equipamientos, la conservación del drenaje, la reposición y la pequeña reparación.
- **Operaciones de mantenimiento especializado:** Necesitan la evaluación mediante inspecciones principales en algunos casos, y deben ser realizadas por empresas especializadas. También deben estar planificadas dentro del plan de mantenimiento. Dentro de este tipo de operaciones estarían la sustitución de juntas, apoyos, pretilas y barandillas, el repintado de elementos metálicos, reposición de impermeabilización del tablero y firme.
- **Intervenciones especializadas:** conllevan la necesidad de realizar una evaluación en profundidad mediante inspecciones especiales, y se recogen dentro del plan de mantenimiento.
- **Rehabilitación y refuerzo:** de la misma manera que las intervenciones, necesitan de la realización de una inspección especial, pero por el contrario, no están planificadas dentro del plan de mantenimiento, por lo que responderán a proyectos de rehabilitación o refuerzo que resuelvan una problemática concreta fuera del alcance de daños inicialmente esperables. Ejemplos de estas actuaciones serían la rehabilitación frente a descalce de zapatas, impactos en vigas y tablero, necesidad de aumento de capacidad de carga de la estructura frente a incremento de las solicitaciones, etc.

3.7. El caso particular de la gestión de puentes en las concesiones

Las concesiones de conservación y mantenimiento tienen diversos aspectos particulares referentes al proceso de gestión, y que desarrollamos a continuación. La visión de las empresas concesionarias debe incorporar los sistemas de gestión de estructuras dentro del planteamiento integral de la vía, pues los recursos disponibles deben llegar a todos los elementos, no exclusivamente a los puentes. Se llevan a cabo, por tanto, las siguientes operaciones:

- **Actividades de vialidad.** Deben garantizar la operación de los vehículos en la infraestructura existente en condiciones adecuadas de seguridad y fluidez. Abarca desde la atención de accidentes o incidencias hasta la reparación de urgencia de deterioros para reestablecer el servicio. Se trata de operaciones prioritarias llevadas a cabo por equipos operativos de actuación rápida. Lógicamente, no responden a ningún tipo de actuación planificada, con un único objetivo, llegar lo antes posible y reestablecer la circulación en condiciones mínimas de seguridad y fluidez en el menor tiempo. Ejemplos de este tipo de actividades, en relación con la gestión de puentes, podrían ser las reparaciones de urgencias de pretiles y sistemas de contención, restitución de elementos afectados por impactos, etc.
- **Actividades de conservación.** Tratan de mantener los elementos que conforman la vía en el mejor estado posible a lo largo de su vida útil, En primer lugar se diferencian las operaciones de conservación o mantenimiento ordinario, destinadas a retrasar el proceso de degradación de las propiedades funcionales y estructurales. Se trata de actividades muy variadas que se realizan de manera continua. En el caso de puentes, engloban actuaciones como la limpieza y pequeñas reparaciones de juntas, pavimento, paramentos, sistemas de drenajes, balizamiento y contención. En segundo lugar estarían las operaciones de rehabilitación o conservación extraordinaria, cuyo objetivo es retornar a diversos elementos tras la aproximación o finalización de su vida útil. Se trataría de reparaciones especializadas, como podría ser la sustitución de juntas, sellado de fisuras o restitución de firme y sistemas de impermeabilización.
- **Actividades de mejora.** Dentro de este tipo de operaciones están las destinadas a mejorar las condiciones de seguridad, a corregir funcionamientos o situaciones anómalas, o a mejorar las condiciones del entorno y del medio ambiente. Suelen estar relacionadas con programas de seguridad vial o con actuaciones medioambientales. Ejemplos de estas actividades serían la incorporación de hitos para alerta a máquinas quitanieves en la entrada a las

estructuras, la limpieza de cauces y vegetación anexa a pilas y estribos, la actualización de sistemas de contención y balizamiento a normativa, etc.

- **Actividades de uso y defensa.** Destinadas a la protección, regulación y defensa de los elementos de la vía frente a las actuaciones colindantes de terceros. Se trata de actividades realizadas a “demanda” de intervenciones no dependientes de la administración gestora de la red, pero que debe preservar su integridad. Relativo a la gestión de estructuras, podríamos enunciar los ejemplos del aseguramiento de condiciones mínimas en cuanto a distancia y gálibos de actuaciones de particulares e incluso de otras administraciones.
- **Actividades para abastecer a los propios sistemas de gestión.** Necesarias para nutrir de datos al proceso de programación de la conservación. Se llevan a cabo mediante campañas de auscultación, inspecciones visuales, etc. y abastecen a los diferentes sistemas de gestión (firmes, obras de paso, señalización y balizamiento) del “input” que les permite conocer el estado de sus componentes y la estrategia de actuaciones.

Las actividades de Vialidad, de Conservación y de Mejora actúan sobre los elementos de la carretera. Las de Uso y Defensa son actividades “a demanda”, mientras que las que abastecen los sistemas de gestión están supeditadas a la implantación de dichos sistemas.

Tipos de actividad	Programación	Ejecución
Vialidad	Toma de decisiones en tiempo real.	Inmediata, o en plazos muy cortos. Equipos con mucha movilidad.
Conservación Ordinaria	Planificación anual, mediante el Sistema de Gestión del Mantenimiento (GSM).	Ejecución diaria. Maquinaria generalmente ligera.
Rehabilitación	Planificación interanual, mediante Sistemas de Gestión específicos.	Tareas esporádicas, con equipos especializados.
Mejora	Planificación interanual, mediante Programas específicos.	Tareas esporádicas, a veces de construcción, con equipos especializados.
Uso y defensa de la carretera	A demanda.	A demanda.
Trabajos que abastecen los Sistemas de Gestión	Generalmente anual.	Variable, en función del Sistema de Gestión.

Tabla 3.14. – Diferentes tipos de operación en concesión de conservación y mantenimiento

Se establecen unas diferencias entre el funcionamiento de la gestión de infraestructuras realizada directamente por la administración gestora y el método de externalización mediante contratos de concesión:

1º) Los Indicadores de Estado, como valores numéricos objetivos obtenidos de las campañas de auscultación e inspección, son la herramienta que sirve no solamente para evaluar la situación en la que se encuentra un determinado componente de la red, sino que además es el baremo que establece el propio sistema de remuneración de la parte variable de la concesión, por lo que interesa al gestor que esté en niveles óptimos para mejorar sus ingresos. Existen indicadores operacionales y estructurales. Los primeros están relacionados con la vialidad, y valoran el tiempo de respuesta de los equipos y su organización para reestablecer el flujo de tráfico en condiciones de seguridad en tanto por ciento de las actuaciones realizadas dentro del plazo máximo de respuesta establecido en el pliego del contrato de conservación. Por su parte, los estructurales, muestran el estado en el que se encuentra un determinado componente en un momento dado, con una valoración numérica asociada.

2º) Carta de Servicios. En forma de pliego de prescripciones del contrato, se establecen unos límites admisibles para los indicadores, recogidos en la denominada carta de servicios, donde a su vez se determina la repercusión económica de tener un elemento en un determinado nivel de conservación o en otro. Por ejemplo, la administración puede disponer en su carta de servicios que el tiempo máximo que puede tener un bache en el tablero de un puente es de 48 horas o la reposición de una barrera afectada por impacto 24 horas.

3º) Programación y Ejecución. Se trata de la planificación y puesta en marcha de aquellas actividades necesarias para retornar dentro de la carta de servicios a aquellos elementos que en un momento dado estén fuera de los valores admisibles, llegando incluso a tener penalizaciones si el incumplimiento se prolonga en el tiempo.

Las nuevas tecnologías en la aplicación de sistemas de gestión dentro de los contratos integrales de concesión de las labores de conservación y mantenimiento pasan por la creación de los denominados “Sectores de Conservación”, que abarcan, habitualmente, entre 150 y 250 km de vía. Por otra parte, determinada información básica para los Sistemas de Gestión de Rehabilitación y de Mejora (por ejemplo, las inspecciones básicas de puentes y estructuras), también la realizan las empresas adjudicatarias de los contratos de conservación de las carreteras incluidas en estos Sectores de Conservación.

Con esta subdivisión, se gana en operatividad, pero aparece un problema de heterogeneidad entre las actuaciones e implantación de los sistemas de gestión, así como la atomización de la información, con documentación tratada incluso en sistemas incompatibles entre sí. De la misma manera, aparece un problema de comunicación y falta de transparencia entre sectores contratados a diferentes explotadores, que dificulta la coordinación de actuaciones globales. Por ello, la

tendencia de las administraciones plantea la necesidad de dotar con herramientas de gestión comunes de uso obligado para los diferentes contratistas.

CAPÍTULO 4

MODELO DE PREDICCIÓN

DEL DETERIORO

4.1. Introducción

En el marco del presente trabajo, podríamos definir el deterioro de una infraestructura, en términos medibles, como el decaimiento observado en el estado de conservación de sus componentes, como consecuencia de su funcionamiento bajo condiciones normales de servicio. Se trata de un proceso continuado a lo largo del tiempo, que incluye complejos fenómenos, tanto físicos como químicos, que si bien se dan en todos los componentes del puente, presentan velocidades diferentes de desarrollo en cada uno de ellos.

Para la correcta gestión y manejo de las operaciones de mantenimiento y reparación en una red de puentes, debemos ser capaces de predecir de forma fiable el estado de cualquier componente y su evolución a lo largo del período de planificación. Es en este contexto es donde cobra importancia el establecimiento del modelo de deterioro.

Los principales factores a tener en cuenta para ello son, según Busa et al (1985):

- La edad de la infraestructura.
- El tráfico que soporta la misma, que se puede evaluar mediante la Intensidad Media Diaria (IMD).
- El medio ambiente o entorno de exposición.
- Los parámetros de diseño del puente.
- La calidad de los materiales y de la ejecución.

En general, se pueden definir modelos de deterioro de varios tipos, que se podrían clasificar en cuatro categorías principales, según la figura 4.1:

- **Modelos Mecanicistas:** Con este tipo de modelos se trata de describir los mecanismos concretos de deterioro de cada componente del puente. Nos reportan leyes de deterioro de algunos procesos concretos como carbonatación, ataque por cloruros y corrosión, pero no se conocen los mecanismos que guían la totalidad de procesos, y mucho menos las complejas interacciones entre ellos.
- **Inteligencia Artificial:** El campo de la inteligencia artificial se compone de varias técnicas diferentes, entre las que destacan las Redes Neuronales Artificiales, que se apoyan en el razonamiento basado en casos y en el aprendizaje automático.
- **Modelos Estocásticos:** El uso de modelos estocásticos ha contribuido significativamente al campo de la modelización del deterioro de infraestructuras debido a la alta incertidumbre y a la aleatoriedad que se dan en dichos procesos. En este sentido, la técnica estocástica más comúnmente utilizada es el modelo de Cadenas de Markov.
- **Modelos Deterministas o Empíricos:** Se basan en una ley de dependencia matemática o estadística para establecer la relación entre los diferentes factores que afectan al deterioro del puente y medir el estado del mismo. Los

resultados obtenidos se expresan en términos deterministas que representan las condiciones medias previstas.

Figura 4.1.- Modelos de deterioro

Para la caracterización del deterioro de los componentes principales del puente, (plataforma, superestructura y subestructura), dada su importancia relativa, se desarrollan dos vías de análisis diferentes y complementarias:

- Por una parte, se construye un modelo probabilista estocástico de deterioro, basado en las Cadenas de Markov, que se fundamenta en la caracterización del estado de conservación de los componentes del puente mediante índices de estado y la obtención de las probabilidades asociadas a la migración de un estado a otro. Este planteamiento queda avalado ampliamente por la experiencia, ya que se han utilizado este tipo de modelos en aplicaciones avanzadas de SGP, como Pontis y Bridgit.
- De forma paralela, se desarrolla un enfoque empírico determinista, ajustando la información obtenida en las campañas de inspección a diversas expresiones matemáticas sencillas, con pocos parámetros y robustas.

Para la caracterización del deterioro en los componentes secundarios, (pavimento, juntas, apoyos y acabados), de menor importancia, se considera un esquema lineal de agotamiento, de forma que el modelo de deterioro queda definido fijando la vida útil del elemento y conocido el índice de estado observado en la última inspección.

La expresión general sería de la forma:

$$IEC_j(t) = IEC_j(i) - \frac{(9 - 3)}{V_u} \times (t - i)$$

Donde:

$IEC_j(t)$: Índice de estado del componente j en el año t .

$IEC_j(i)$: Índice de estado del componente j en el año i , en el que se realiza la inspección.

V_u : Vida útil del componente.

4.2. Desarrollo del modelo estocástico

Podemos definir un proceso estocástico de tiempo discreto como una descripción de la relación entre las variables aleatorias $Y_0, Y_1, \dots, Y_t$ que representan los vectores estado del sistema en puntos discretos en el tiempo. En general, Y_t dependerá de todos los estados previos $Y_0, Y_1, \dots, Y_{t-1}$, sin embargo, se denomina proceso estocástico de Markov a aquel cuya probabilidad de transición de un estado dado Y_t a un estado futuro Y_{t+1} sólo depende del estado actual y no de la forma en que se ha llegado a éste. Estos procesos deben satisfacer los siguientes requisitos, enunciados por Collines, (1972):

- El sistema está definido por un conjunto finito de estados de forma que, para un instante dado, se puede materializar uno y sólo uno de esos estados.
- El estado inicial y su función de distribución de probabilidad son conocidos.
- Las probabilidades de transición se asumen estacionarias e independientes de cómo se haya alcanzado el estado inicial.

Las probabilidades de transición se ordenan en una matriz cuadrada de dimensiones $r \times r$, donde r es el número de estados considerados, que se denomina matriz de probabilidad de transición (MPT). Cada elemento p_{ij} de la matriz representa la probabilidad de que un componente del puente realice una transición del estado i al j durante el incremento de tiempo considerado. Si se conoce el estado actual, se puede predecir el estado futuro para cualquier valor de tiempo t , para ello basta con multiplicar el vector de estado inicial por la MPT elevada a la potencia t . Expresando esto de forma matemática tendremos las siguientes relaciones:

$$\text{Si } E(0) = (E_1, E_2, \dots, E_r) \quad \text{entonces} \quad E(t) = E(0) \times \text{MPT}^t$$

donde:

$E(0)$: Vector estado inicial.

$E(t)$: Vector estado a tiempo t

$$MPT = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1r} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{r1} & p_{r2} & \cdots & p_{rr} \end{pmatrix}$$

Las componentes de la MPT, dado su carácter probabilístico, deben satisfacer las siguientes condiciones:

- $\sum_{j=1}^r p_{ij} = 1$ para todo i .
- $1 \geq p_{ij} \geq 0$ para todo i y todo j

Si agrupamos los estados factibles en el vector EF:

$$EF = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ n \end{pmatrix}$$

Se puede escribir la siguiente expresión, que es la base del modelo:

$$E(t)_{1 \times 1} = E(0)_{1 \times r} \times MPT_{r \times r}^t \times EF_{r \times 1}$$

Una de las hipótesis consideradas es que el proceso de deterioro no progresa más de un estado en un solo año. Siendo congruentes con ello, la MPT se reformula tal y como sigue:

$$P = \begin{pmatrix} p_1 & q_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_2 & q_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_3 & q_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_4 & q_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_5 & q_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_6 & q_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Donde p_i es la probabilidad de permanecer en el mismo estado y $q_i = 1 - p_i$ la probabilidad de migrar a un estado más degradado.

Para la determinación de los valores de las matrices de transición de probabilidad (componentes principales del puente) se propone, como método general, un ajuste a los datos observados en la campaña de inspecciones, de esta forma se adaptará el modelo de deterioro teórico a las características específicas de la red de puentes objeto de estudio. Para ello se plantea un problema de optimización consistente en obtener el valor mínimo de la función objetivo definida de la siguiente forma:

$$FO = \text{Min} \left\{ \sum_{i=1}^n (X_{jkt}^{cal} - X_{ijkt}^{obs})^2 \right\}$$

donde:

n : Número de puentes de la red.

X_{jkt}^{cal} : Índice de estado del componente tipo j , de material k y edad t , calculado mediante el modelo markoviano de deterioro.

X_{ijkt}^{obs} : Índice de estado del componente j , de material k , de edad t , perteneciente al puente i , observado en la inspección.

Las valores que se han de determinar son las probabilidades de permanencia en el mismo estado (p_i), ya que, como se expuso con anterioridad, definen completamente la estructura de la MPT.

Las restricciones a imponer son:

$$1 \geq p_i \geq 0$$

Figura 4.2. Ejemplo de ajuste del modelo de deterioro a las observaciones

En el siguiente ejemplo se describe la forma en la que se ha implementado el modelo de deterioro descrito para los componentes principales. Se debe construir la MPT de forma coherente con el sistema de valoración de la FHWA, con un rango de cero a nueve (0 a 9), de forma que se definirían diez (10) estados cada uno de los cuales representa un valor dentro del rango. No obstante, de acuerdo con FHWA (1995), el índice de estado más bajo compatible con condiciones de servicio es tres (3), resultando entonces siete (7) estados que se corresponden con los valores representados por las componentes del vector EF:

$$EF = \begin{pmatrix} 9 \\ 8 \\ 7 \\ 6 \\ 5 \\ 4 \\ 3 \end{pmatrix}$$

Si la MPT correspondiente a la superestructura viene dada por la siguiente expresión:

$$P = \begin{pmatrix} 0.478 & 0.522 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.768 & 0.232 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.848 & 0.152 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.529 & 0.471 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.424 & 0.576 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.304 & 0.696 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.000 \end{pmatrix}$$

El vector de estado inicial, cuando el índice de estado de la superestructura alcanza un valor de nueve (9), viene dado por:

$$E(0) = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$$

Para estimar el valor del índice de estado al final del período de planificación, con un horizonte de cinco años por ejemplo, bastaría operar de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} E(5) &= (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)x \begin{pmatrix} 0.478 & 0.522 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.768 & 0.232 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.848 & 0.152 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.529 & 0.471 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.424 & 0.576 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.304 & 0.696 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^5 x \begin{pmatrix} 9 \\ 8 \\ 7 \\ 6 \\ 5 \\ 4 \\ 3 \end{pmatrix} \\ &= 7.338 \end{aligned}$$

Por lo tanto, el índice de estado de la superestructura del puente objeto de estudio descenderá de 9 a 7.338 después de 5 años.

4.3. Modelo empírico-determinista

De forma complementaria al enfoque probabilista, se plantean y analizan una serie de ajustes, a expresiones conocidas, de los datos obtenidos de la campaña de inspecciones efectuada en la aplicación concreta que se explicará en el capítulo 6, y que ha servido de base de datos real sobre la que obtener tendencias y análisis de sensibilidad. Se ensayan modelos lineales, polinómicos de distinto grado, exponenciales, logarítmicos y potenciales obteniendo, en cada caso, las leyes de dependencia y los coeficientes de determinación correspondientes.

Del estudio de los resultados obtenidos, se concluye adoptar la expresión exponencial como mejor representante de grupo de los modelos empíricos, al presentar el ajuste más congruente a los datos de las inspecciones.

Obtenemos, de esta manera, un planteamiento determinista alternativo al modelo estocástico desarrollado.

4.4. Consideración de los defectos de diseño y ejecución

A la hora de establecer un modelo de predicción, de cualquier tipo, y ajustarlo a los datos registrados en la campaña de inspecciones, es necesario analizar la estructura de la información recogida.

De su análisis, se observa la existencia de una serie de índices que no se corresponden con los valores esperables dentro de un patrón de deterioro normal, dichos índices de estado pertenecen a componentes de puentes en los que se han observado defectos de diseño y ejecución, como fallos en la impermeabilización y eficacia de juntas, inexistencia o inadecuado sistema de impermeabilización de tablero, derivación de agua a paramentos estructurales, etc. y, debido a ello, presentan valores de estado de conservación inferiores a los esperados.

Esto nos hace enfrentarnos a una diatriba, ya que, por una parte, la inclusión de esta información en el modelo de deterioro introduciría una distorsión respecto al planteamiento teórico formal, que contempla un proceso de deterioro normal.

Por otra parte, se necesita resolver el problema de la gestión del mantenimiento y reparación de estos puentes, ya construidos y con un proceso de deterioro que no se rige por un patrón de comportamiento previsible.

Para superar estas dificultades, se ha procedido a discriminar los índices de estado en dos poblaciones, que se modelizarán de forma separada, ya que se considera que presentan un comportamiento diferenciado:

- Por un lado, se realiza el análisis para las componentes no afectadas por defectos de ejecución.

- Por otro lado, se estudia el decaimiento del estado de conservación de las componentes afectadas por defectos de ejecución.

En este marco, se ha de hacer notar que la tendencia a futuro debería ir encaminada a corregir este aspecto de forma definitiva, extremando el cuidado en la ejecución y, desde el punto de vista de las administraciones, no recibiendo ninguna estructura hasta que cumpla con las especificaciones a plena satisfacción.

En las siguientes figuras se ilustra, de forma gráfica, la discriminación de datos considerada para los índices de estado de condición de plataforma, superestructura y subestructura.

Figura 4.3. Campaña de inspecciones, índices de estado de la plataforma.

Figura 4.4. Campaña de inspecciones, índices de estado de la superestructura.

Figura 4.5. Campaña de inspecciones, índices de estado de la subestructura.

4.5. Modelo de deterioro de los componentes principales

Una vez discriminadas ambas poblaciones, en el sentido de lo expresado con anterioridad, en el caso de componentes sin defectos de ejecución, se partiría de un índice de estado inicial teórico de nueve (9) y al final de la vida útil del componente se registraría un valor del índice de estado residual de tres (3), mínimo absoluto compatible con el estado de servicio. Por tanto, siendo congruente con esto, se completan los registros con los dos valores teóricos mencionados. Como vida útil o

período de servicio, se considera el valor de proyecto estipulado tomando en consideración las estrategias de durabilidad exigibles en función de la normativa bajo la que fueron diseñadas.

Como se ha mencionado con anterioridad, debido a la incertidumbre existente, se utilizan dos desarrollos de forma paralela. Por una parte, se ajusta un modelo de deterioro probabilista, con una estructura basada en las cadenas de Markov. Por otro lado, se ensaya un ajuste empírico a distintas expresiones matemáticas sencillas, con menor número de parámetros y, por tanto, más robustas y menos sensibles a la variabilidad de la información.

Ambos planteamientos se llevan a término para las dos poblaciones de componentes identificadas, afectadas y no afectadas por fallos de ejecución.

En las siguientes figuras, se muestran los modelos de deterioro markovianos considerados para plataforma, superestructura y subestructura, diferenciando entre puentes que registran defectos de ejecución en esas componentes y puentes sin fallos de construcción.

Se ofrecen, así mismo, los coeficientes de determinación (R^2) obtenidos que, como se puede observar, son bastante elevados como consecuencia de que, al discriminar ambas poblaciones, se elimina el grado de interferencia entre ambas. Lógicamente, se encuentran peores ajustes en los casos con defectos de ejecución, ya que éstos perturban el normal proceso de deterioro bajo condiciones ordinarias de servicio.

Figura 4.6. Modelo de deterioro probabilista. Plataforma.

Figura 4.7. Modelo de deterioro probabilista. Superestructura.

Figura 4.8. Modelo de deterioro probabilista. Subestructura.

En la otra vía de estudio y, tras ensayar diversos modelos empíricos, se obtienen los ajustes a una expresión exponencial correspondientes a la plataforma, superestructura y subestructura. La expresión matemática general considerada es de la forma:

$$IEC_i(t) = a \times e^{-b \times t}$$

Donde:

$IEC_i(t)$: Índice de estado del componente i a la edad t .

a, b : Constantes que definen el modelo y que se obtienen por ajuste estadístico.

t : Edad del componente considerado.

Al igual que para el caso probabilista, se realiza este proceso considerando, por un lado las componentes de puentes con defectos de ejecución y, por otro puentes con componentes libres de fallos constructivos.

Los resultados del análisis, que definen el modelo exponencial propuesto, se resumen en la siguiente tabla:

Población	Material	Componente	a	b	R ²
Puentes sin defectos de ejecución	Hormigón	Plataforma	9.087	0.011	0.9661
		Superestructura	9.450	0.011	0.9530
		Subestructura	8.907	0.011	0.9465
Puentes con defectos de ejecución	Hormigón	Plataforma	8.158	0.020	0.6950
		Superestructura	7.988	0.021	0.7828
		Subestructura	7.876	0.028	0.8208

Tabla 4.1. Modelo de deterioro exponencial definido.

Si nos fijamos en los resultados obtenidos para puentes sin defectos de ejecución, el parámetro que determina la velocidad de avance del proceso es idéntico para todos los componentes principales, variando tan sólo en cada caso el factor de escala.

Por el contrario, para puentes con defectos de ejecución, existen diferencias marcadas, que muestran un proceso de deterioro más severo en la subestructura y superestructura.

En las siguientes figuras, se muestran los ajustes obtenidos, junto con los coeficientes de determinación correspondientes.

Figura 4.9. Modelo de deterioro exponencial. Plataforma.
Puentes sin defectos de ejecución.

Figura 4.10. Modelo de deterioro exponencial. Plataforma.
Puentes con defectos de ejecución.

Figura 4.11. Modelo de deterioro exponencial. Superestructura.
Puentes sin defectos de ejecución.

Figura 4.12. Modelo de deterioro exponencial. Superestructura.
Puentes con defectos de ejecución.

Figura 4.13. Modelo de deterioro exponencial. Subestructura.
Puentes sin defectos de ejecución.

Figura 4.14. Modelo de deterioro exponencial. Subestructura.
Puentes con defectos de ejecución.

Llegados a este punto, a la hora de definir el modelo deterioro a considerar, prevalece la idea de explotar la información obtenida en los dos enfoques desarrollados de forma paralela. Es por ello que se plantea un diagrama bilineal envolvente que simplifica los cálculos y expresiones matemáticas a utilizar, quedando siempre del lado seguro y aprovechando todos los resultados obtenidos hasta el momento.

Hay que pensar que se desarrolla el modelo en una plataforma standard, Microsoft Excel, para que sea asequible y utilizable por administraciones de escasos recursos, que presenta serias limitaciones en cuanto al uso de memoria realizado por la herramienta Solver. Cada estrategia de reparación revisada requiere una actualización de todos los cálculos matemáticos, incluyendo las predicciones a partir de los modelos de deterioro. Por ejemplo, para el caso de modelos markovianos, estos cálculos comprenden productos, potencias y operaciones matriciales que consumen mucha memoria y provocan un “calentamiento” de la aplicación. Además, muchos son los casos de ingeniería estructural en los que las simplificaciones han sido incluso consideradas por las normativas como de uso extendido por su mejora conceptual y facilidad de manejo, como puede ser el caso de los diagramas tensión-deformación de los materiales, que han sido simplificados y así aceptados en la mayoría de las normativas de referencia.

Además, la simplificación realizada conduce a un ahorro de memoria significativo que hace más eficiente el proceso de cálculo y optimización, posibilitando el uso de una plataforma universal como Microsoft Excel.

La expresión general adoptada para el diagrama envolvente bilineal es de la forma:

$$IEC_i(t) = \begin{cases} a - b \times t & \text{para } t_1 \leq t \leq t_2 \\ c - d \times t & \text{para } t_2 < t \leq t_3 \end{cases}$$

Donde:

$IEC_i(t)$: Índice de estado del componente i a la edad t .

a, b, c, d : Parámetros que definen el diagrama envolvente de deterioro.

t : Edad del componente analizado.

t_1, t_2, t_3 : Límites de los intervalos de edad considerados.

Se realiza este análisis considerando, por un lado las componentes de puentes con defectos de ejecución y, por otro, puentes con componentes libres de fallos constructivos y de diseño.

Los resultados del análisis, que definen el diagrama bilineal envolvente propuesto, se resumen en la siguiente tabla:

Población	Material	Componente	a	b	c	d	t ₁	t ₂	t ₃
Puentes sin defectos de ejecución	Hormigón	Plataforma	9.00	0.100	5.00	0.036	0	40	95
		Superestructura	9.00	0.080	5.00	0.040	0	50	100
		Subestructura	9.00	0.117	3.75	0.019	0	45	85
Puentes con defectos de ejecución	Hormigón	Plataforma	8.00	0.140	3.80	0.040	0	30	50
		Superestructura	7.50	0.117	4.00	0.067	0	30	45
		Subestructura	7.60	0.165	3.30	0.020	0	20	35

Tabla 4.2. Modelo de deterioro envolvente definido.

En las siguientes figuras, se representan los modelos de deterioro adoptados para plataforma, superestructura y subestructura, como siempre, discriminando entre puentes cuyas componentes presentan o no defectos de diseño y ejecución.

Como se puede observar, en general, la vida útil de los componentes según las expresiones utilizadas está entre 85-100 años, del mismo orden que la considerada en las estrategias de durabilidad actuales. Sin embargo, en el caso de componentes afectados por un proceso constructivo inadecuado, la vida útil de los componentes presenta valores drásticamente menores, 35-50 años, debido a que éstos elementos parten de un índice de estado inferior al óptimo y, además, se observan gradientes de deterioro mucho más severos.

Figura 4.15. Modelo de deterioro envolvente. Plataforma.
Puentes sin defectos de ejecución.

Figura 4.16. Modelo de deterioro envolvente. Plataforma.
Puentes con defectos de ejecución.

Figura 4.17. Modelo de deterioro envolvente. Superestructura.
Puentes sin defectos de ejecución.

Figura 4.18. Modelo de deterioro envolvente. Superestructura.
Puentes con defectos de ejecución.

Figura 4.19. Modelo de deterioro envolvente. Subestructura.
Puentes sin defectos de ejecución.

Figura 4.20. Modelo de deterioro envolvente. Subestructura.
Puentes con defectos de ejecución.

4.6. Comparación con otras propuestas

En este apartado, se compara el modelo de deterioro definido en este trabajo con otras propuestas descritas en la literatura específica, las referencias consideradas son las siguientes:

- Modelos de deterioro de infraestructuras de transporte. TFG. Manuel G. Lidón Masiá. UPV. 2014
- The development of optimal strategies for maintenance, rehabilitation and replacement of highway bridges, Yi Jiang, Cumares C. Sinah. 1990.
- Development of a Bridge Management System for existing bridges. A. Miyamoto, K. Kawamura y H. Nakamura. 2001

Por una parte, los ajustes contemplados en los trabajos de Jiang et al (1990) y Lidón (2004) se realizan considerando una expresión general de la forma:

$$IEC_i(t) = \beta_0 + \beta_1 \times t + \beta_2 \times t^2 + \beta_3 \times t^3$$

Donde:

$IEC_i(t)$: Índice de estado del componente i a la edad t .

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$ y β_3 : Constantes que definen el modelo y que se obtienen por ajuste estadístico.

t : Edad del componente considerado.

Por otra parte, Miyamoto et al (2001) propone una curva de deterioro acorde con la siguiente expresión:

$$IEC_i(t) = \beta_0 - \beta_3 \times t^3$$

Donde:

$IEC_i(t)$: Índice de estado del componente i a la edad t .

β_0 y β_3 : Constantes que definen el modelo.

t : Edad del componente considerado.

De la comparación y análisis realizado, se observa que el modelo envolvente bilineal propuesto presenta valores coherentes con los obtenidos a partir de los modelos polinómicos cúbicos referidos en las propuestas de Jiang et al (1990) aplicada sobre una base de datos de puentes de Indiana y Lidón (2014) que explota datos publicados por el Departamento del Transporte de Florida. Se considera que la aproximación realizada es ajustada, válida y, en general, queda del lado seguro. Máxime tomando en consideración que se hace un tratamiento específico de los puentes con un proceso constructivo inapropiado, que ninguna de las alternativas estudiadas contempla.

Por otro lado, se concluye que existen diferencias marcadas con la propuesta de Miyamoto et al (2001), que se considera demasiado optimista en la mayor parte del período de servicio de los componentes analizados.

En cualquier caso, los coeficientes de determinación de los ajustes realizados son muy superiores a los encontrados en cualquiera de las propuestas de referencia.

En las siguientes figuras se representan las comparativas entre diferentes propuestas de modelos de deterioro para cada uno de los componentes principales del puente, plataforma, superestructura y subestructura.

Figura 4.21. Modelo de deterioro plataforma. Comparación con otras propuestas.

Figura 4.22. Modelo de deterioro superestructura. Comparación con otras propuestas.

Figura 4.23. Modelo de deterioro subestructura. Comparación con otras propuestas.

4.7. Modelo de deterioro de los componentes secundarios

Tal y como se ha mencionado con anterioridad, conocido el índice de estado de conservación de cada elemento, a partir de la campaña de inspecciones, se procede a estimar un valor de vida útil para cada elemento, de forma que el modelo de decaimiento lineal queda totalmente determinado. En la siguiente figura se muestran algunos ejemplos de lo expuesto.

Figura 4.24. Modelo de deterioro componentes secundarios.

4.8. Influencia de otros factores

Debido a la uniformidad observada en las condiciones locales de la red de puentes analizada, no se ha podido determinar la posible influencia en los procesos de deterioro de otros factores como el tipo de puente (hormigón o metálico), la densidad de tráfico registrada (IMD) o el tipo de ambiente de exposición.

El hecho es que las estructuras de la red local de carreteras de Castilla La Mancha están constituidas por puentes de hormigón (ausencia de estructuras metálicas), con unas características de tráficos muy similares y sometidos a unas condiciones ambientales específicas que varían dentro de un rango muy escaso.

En cualquier caso, del análisis de los resultados expuestos en las referencias del punto 4.6, se concluye que si existe influencia del tipo de puente, en cuanto al material considerado, en los procesos de deterioro asociados al funcionamiento ordinario en servicio.

En las siguientes figuras se reflejan los distintos modelos de comportamiento registrados para los componentes principales en puentes de hormigón y puentes metálicos.

Figura 4.25. Influencia tipo de puente. Plataforma.

Figura 4.26. Influencia tipo de puente. Superestructura.

Figura 4.27. Influencia tipo de puente. Subestructura.

También, considerando la jerarquía de red y su tráfico asociado, vemos que en la explotación de los datos de Jiang et al. en Indiana se puede apreciar la diferencia entre los niveles de red, lo cual nos permite concluir que este factor determina unas tendencias en las propias curvas de deterioro de los componentes principales.

Figura 4.28. Influencia intensidad de tráfico en red Indiana Department of Transportation. Componente Tablero Metálico.

4.9. Análisis de riesgos

Un nuevo planteamiento, no implementado en el sistema de gestión de puentes desarrollado dentro de la presente investigación, pero que cuenta con gran aceptación en los últimos años y sin lugar a duda forma parte de una tendencia que tendrá gran auge en futuros desarrollos normativos de gestión de infraestructuras es el **Análisis de Riesgos**.

Se trata de un sistema que evalúa la probabilidad de concurrencia de un determinado suceso en función de las consecuencias que puede producir, definiendo diferentes límites en los que se considera conveniente asumir el riesgo y otros en los que no se contempla esta posibilidad por las consecuencias que conlleva.

En la siguiente figura se muestra un gráfico que define el concepto en el que se basa el análisis de riesgos:

Figura 4.29. Representación de la tolerabilidad del riesgo mediante el modelo del semáforo.

Fuente: International Risk Governance Council, 2006.

4.10. Aspectos innovadores del modelo planteado

El estudio realizado en el presente capítulo se centra, por su mayor importancia relativa y trascendencia a lo largo de la vida útil del puente, en los denominados componentes principales, es decir, plataforma, superestructura y subestructura.

En este sentido, se adopta un modelo de deterioro lineal que caracteriza el período de servicio de los componentes secundarios, es decir, pavimento, juntas, apoyos y acabados.

Para la caracterización de los procesos de deterioro de los componentes principales, se desarrolla un análisis mucho más profundo del que se concluye lo siguiente:

- Se considera un doble enfoque, de amplio espectro, por un lado se desarrolla un modelo de deterioro probabilista, basado en las cadenas de Markov, y, por otro, se elabora un modelo determinista, basado en una relación teórica ajustada a una función exponencial.
- Para considerar las conclusiones de los dos planteamientos realizados, en toda su amplitud y sin pérdida de información, se propone un modelo de deterioro simplificado basado en un diagrama envolvente bilineal. La simplificación del aparato matemático asociado posibilita la utilización de una plataforma de uso universal como “Microsoft Excel” y en analogía con diferentes tendencias que han tenido gran aceptación en la ingeniería estructural como las aproximaciones de los diagramas tensión-deformación de materiales.
- Además de otros factores, se analiza la influencia existente entre la adecuación del proceso de diseño y constructivo de los elementos estructurales y su posterior proceso de deterioro. Se concluye que los componentes que registran defectos de congénitos, además de índices de

estado iniciales inferiores a los previstos, presentan unos gradientes de deterioro muy superiores a los componentes que se ejecutan de forma adecuada, redundando todo ello en vidas útiles drásticamente inferiores a las previstas.

- Comparando la propuesta realizada con las encontradas en la literatura técnica específica, se concluye que el modelo de deterioro presentado en este trabajo constituye una herramienta adecuada, rigurosa, válida, sencilla y eficiente a la hora de realizar la prognosis del estado de conservación de estructuras, detectando algunos puntos de encuentro y diferencias.
- Se plantea la identificación de diversas zonas principales dentro de las curvas de deterioro obtenidas en los diferentes modelos, y que se representan a continuación:

Figura 4.30. Identificación de conceptos comunes a las curvas de deterioro investigadas.

- Debido a la uniformidad de las características de la red local de puentes analizada, no ha sido posible observar la influencia en los procesos de deterioro de factores como el tipo de puente (hormigón o metálico), ambiente de exposición o densidad de tráfico soportada (IMD), algunos de los cuales si han mostrado correlación en base a datos de otros estudios revisados como han sido los casos de las publicaciones del Departamento de Transporte de Indiana y el de Florida.

CAPÍTULO 5

OPTIMIZACIÓN DE

ESTRATEGIAS DE

MANTENIMIENTO

5.1. Base metodológica

En este apartado se presenta un modelo de optimización de las operaciones de mantenimiento a realizar en la gestión de redes de puentes. El objetivo principal de la metodología descrita es desarrollar un sistema de soporte a los procesos de toma de decisiones en dos niveles que se estudian de forma sucesiva:

- Nivel de Puente: Se evalúa la estrategia óptima de actuación sobre cada puente, determinando las reparaciones a llevar a cabo sobre cada componente concreto.
- Nivel de Red: A lo largo del período de planificación, se selecciona el momento óptimo para acometer las reparaciones en cada puente.

El resultado es una planificación en la que se determina la opción de reparación más adecuada a cada puente, el momento óptimo para llevarla a cabo y una estimación del coste asociado.

Dada la escasez de recursos inherente a la sociedad actual, una de las obligaciones del ingeniero es determinar soluciones óptimas a los problemas con los que se enfrenta, pero entendiendo el óptimo referido no sólo a aspectos técnicos, sino también a económicos y sociales.

En el marco concreto del mantenimiento, reparación y rehabilitación de puentes, se ha de llevar a cabo una estrategia que permita establecer una programación de actuaciones encaminadas a limitar los desperfectos ocasionados en la red y debidos a los diferentes procesos de deterioro. Dicha planificación estará sujeta, de forma irremediable, a la disponibilidad de recursos económicos necesaria para llevarla a cabo. Para realizar esta tarea no basta con decidir si se reparará un puente o si, por el contrario, su estado de conservación aconseja no hacerlo. Habremos de discretizar el todo que representa el puente en diferentes componentes, de forma que el análisis nos permita discernir sobre qué elementos se ha de actuar y sobre cuáles no. Esta división nos permite ofrecer una solución económicamente mucho más afinada y, por otro lado, precisar de una forma más eficaz los modelos de deterioro.

Llegados a este punto, una reflexión acerca del tamaño del problema a resolver permite clarificar los motivos que impulsan al diseño de una herramienta específica, que ofrezca ayuda a los técnicos encargados de gestionar redes locales de puentes. Pensemos en un problema similar a los que se resolverán en este trabajo, es decir, una red de, por ejemplo, 20 puentes. En este marco, para cada puente se consideran siete componentes, cuatro alternativas de actuación y un período de planificación con un horizonte de 5 años. El espacio en el que se habría de buscar la estrategia óptima de reparación para todos los puentes de la red y a lo largo del período considerado comprendería 4^{700} soluciones.

5.2. Estructura

La figura 5.1 ilustra el modelo de optimización utilizado cuyos componentes principales son los siguientes:

- **Sistemas auxiliares.** Se trata de diferentes modelos cuyo objeto es proporcionar la información necesaria para llevar a cabo el proceso de optimización. En este sentido, serán necesarios sistemas auxiliares para establecer el estado de conservación del puente, para predecir su deterioro a lo largo del tiempo, para estimar los costes asociados a la gestión del mantenimiento y reparaciones en la red, para determinar el impacto de una determinada actuación sobre la infraestructura y, finalmente, para estimar los costes indirectos, ligados a los usuarios de las infraestructuras.
- **Modelo integrado de optimización:** Se trata de un análisis que comprende la resolución sucesiva de los problemas a Nivel de Puente y a Nivel de Red.
 - **Nivel de Puente:** Determina para cada puente la mejor estrategia de reparación, según ésta se efectúe durante un año u otro, dentro del período de análisis.
 - **Nivel de Red:** Usa las estrategias de reparación propuestas a Nivel de Puente y establece el momento óptimo para llevarlas a cabo.
- **Restricciones:** Se trata de las limitaciones que afectan a las posibles soluciones al reducir el espacio factible.

5.3. Sistemas Auxiliares

A continuación se procede a describir de forma individualizada los distintos sistemas que, a partir de la entrada de datos, producen la información necesaria para la ejecución del modelo.

5.3.1. Valoración del estado de conservación

Resulta evidente que cualquier actuación encaminada a definir la estrategia de mantenimiento y reparación en una red de infraestructuras necesita incorporar un sistema de valoración que permita describir el estado de conservación de cada puente en un momento determinado. Para ello se suelen utilizar los índices de estado, que tratan de sintetizar la evaluación de la infraestructura que se realiza mediante una serie de inspecciones, que se ejecutan de forma periódica y que permiten determinar el grado de deterioro (gravedad de los daños registrados y su extensión en cada componente) y las necesidades de mantenimiento para un correcto funcionamiento de la vía.

Figura 5.1. – Estructura del modelo de optimización.

En este sentido se han desarrollado diferentes aproximaciones que se llevan a cabo o bien considerando el puente en su conjunto, o bien sus componentes de forma individual. Los índices de estado de conjunto presentan el inconveniente de que la valoración resulta demasiado general para describir los diferentes grados de afección, como consecuencia, la valoración del estado de conservación se plantea a nivel de componentes. Para ello se hace necesaria la división del puente en varias categorías o elementos, en concreto, se consideran los siguientes: pavimento, juntas, plataforma, apoyos, superestructura, subestructura y acabados.

Se adopta el sistema de valoración de estado de la Federal Highway Administration (FHWA, 1989) que se ilustra en la tabla 5.1. Se caracteriza el estado de cada componente del puente mediante un índice (Índice de Estado de Componente, IEC) con una escala de cero a nueve (0-9), donde nueve (9) representa su mejor estado. Este rango de valores se considera suficientemente amplio como para describir de forma adecuada los estados de conservación de los diferentes elementos. Se asume que los componentes presentarán un estado compatible con las condiciones de servicio hasta que este índice alcance un valor de tres (3).

De manera análoga, el estado global del puente se puede caracterizar mediante otro índice (Índice de Estado de Puente, IEP), con la misma escala (0-9) y que se puede calcular mediante la expresión E. 5.1:

Valoración	Descripción del estado
9	Excelente. Nuevo. No existen deficiencias dignas de mención.
8	Muy bueno. No es necesaria ninguna reparación.
7	Bueno. Existen algunos problemas menores. Labores de mantenimiento menor.
6	Satisfactorio. Existen algunos deterioros menores. Labores de mantenimiento mayor.
5	Aceptable. Pequeñas pérdidas de sección, fisuraciones, desprendimientos o abrasiones. Se necesita rehabilitación menor.
4	Pobre. Avanzada pérdida de sección, deterioro, desprendimientos o abrasiones. Se necesita rehabilitación mayor.
3	Grave. Pérdidas de sección, deterioros, desprendimientos o abrasiones han afectado seriamente a componentes estructurales del sistema primario. Se necesita rehabilitación inmediata.
2	Crítico. Avanzado deterioro de los elementos estructurales primarios. Se precisa rehabilitación urgente. El puente puede cerrarse hasta que se tomen medidas correctivas.
1	Fallo inminente. Gran deterioro o pérdida de sección. El puente puede ser cerrado al tráfico, aunque las acciones correctivas pueden devolverlo a condiciones de servicio no exigentes.
0	Fallo. Fuera de servicio y más allá de la acción correctiva

Tabla 5.1. – Sistema de valoración de estado (FHWA, 1989).

$$IEP = \frac{\sum IEC_i x W_i}{\sum W_i}$$

E. 5.1

En la ecuación E. 5.1 W_i representa el peso asociado al componente i del puente. En principio, se han seleccionado los valores propuestos por Yanev (1997), no obstante, se trata de valores de entrada al sistema y, por lo tanto, el usuario puede modificarlos según su criterio, su experiencia o las normas de la administración para la que trabaja.

Elemento	Factor Importancia (0-10)	Peso (W_i)
Plataforma	8	0,200
Pavimento	4	0,100
Juntas	4	0,100
Apoyos	6	0,150
Superestructura	8	0,200
Subestructura	8	0,200
Acabados	2	0,005
Total	40	1,000

Tabla 5.2.- Pesos relativos de los componentes (Yanev, 1997)

5.3.2. Modelo de deterioro

De acuerdo con lo expuesto en el Capítulo 4, para las componentes principales del puente, (plataforma, superestructura y subestructura), se define un modelo de deterioro híbrido, mediante la adopción de un diagrama bilineal envolvente, que considera y agrupa los resultados obtenidos en las dos vías de estudio desarrolladas:

- Modelo estocástico, probabilista, basado en las cadenas de Markov.
- Modelo empírico, determinista, apoyado en un ajuste de forma exponencial a los datos recogidos en la campaña de inspecciones.

Para los componentes secundarios, se utiliza un modelo de agotamiento lineal, que queda determinado al fijar el valor de la vida útil del elemento y una vez conocido el índice de estado observado en la última inspección.

5.3.3. Costes de reparación

Los costes de reparación y rehabilitación en una red puentes se puede expresar como un coste unitario o como un porcentaje del coste de construcción. Los costes directos a considerar en el problema dependerán de la opción de reparación seleccionada, del componente del puente sobre el que se actúa y del material del mismo.

Un ejemplo de costes de reparación expresados como porcentaje lo encontramos en la propuesta de Seo (1994), tal y como se muestra en la tabla 5.3.

Tipo Reparación	Plataforma	Superestructura	Subestructura
Leve	28%	49%	26%
Media	65%	74%	63%
Intensa	100%	100%	100%

Tabla 5.3.- Costes de reparación de los componentes principales (Seo, 1994).

Para el presente trabajo se proponen cuatro opciones de reparación para cada componente y se codifican, atendiendo a su intensidad, tal y como sigue:

- 0: No actuar.
- 1: Reparación leve.
- 2: Reparación media.
- 3: Reparación intensa.

En la figura 5.2 se muestra un ejemplo de la estimación de costes considerada para cada uno de los distintos componentes. El alcance de la reparación asociada a cada opción se expresa en forma de porcentaje en la segunda columna de las tablas, también se ofrece una breve descripción de las estrategias de reparación junto a la estimación del coste asociado a cada estrategia. Por ejemplo, un sellado de fisuras (reparación leve: Tipo 1) en un pavimento bituminoso supondría un coste de 6 €/m².

Pavimento. Costes (€/m ²)							
Tipo Actuación	Extensión	Material: Hormigón			Material: Bituminoso		
		Opción	Coste	Unidad	Opción	Coste	Unidad
0	0%	No reparar	0 €	m ²	No reparar	0 €	m ²
1	25%	Sellado fisuras	6 €	m ²	Sellado fisuras	6 €	m ²
2	50%	Parchear	32 €	m ²	Parchear	24 €	m ²
3	75%	Sustituir	56 €	m ²	Sustituir	48 €	m ²

Figura 5.2.- Costes de reparación de los componentes.

Los costes de reparación de la red de puentes se pueden entonces obtener mediante la siguiente expresión:

$$C_R = \sum_{t=T_1}^{T_2} \frac{1}{(1+i_t)^t} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^7 CU_{jk} x D_{ij}$$

donde:

C_R Costes de reparación de la red en el período de estudio.

CU_{jk} Coste unitario de reparación del elemento j , usando una opción k .

D_{ij} Es la dimensión del elemento j , del puente i . Por ejemplo, para la plataforma D vendría fijado por su superficie, para las juntas por su longitud, mientras que para los apoyos D estaría determinado por el número total de los mismos.

i_t Tasa de descuento. Se considera el valor presente de todos los costes.

T_1, T_2 Inicio y fin de período de planificación.

5.3.4. Impacto de las reparaciones

Un aspecto relevante para el desarrollo de cualquier SGP será determinar la influencia de las distintas opciones de reparación en el comportamiento futuro de los puentes de la red. La literatura consultada concluye al respecto que la tasa de deterioro de puentes rehabilitados es mayor que la de los recién construidos. De la misma forma, también se ha observado que los puentes rehabilitados no consiguen volver a su mejor estado de conservación (Yanev y Xiaomong, 1993). Sin embargo, y a pesar de ello, la mayoría de los SGP asumen que la velocidad de desgaste tras una reparación es la misma que la que regía el comportamiento del puente tras su construcción.

Un ejemplo de lo descrito lo encontramos en la investigación de Bolukbasi et al (2006), que estudia el proceso de envejecimiento de plataformas de acero que han sido reconstruidas en puentes de carretera de Illinois. En la figura 5.3 se muestra la comparación de los procesos de deterioro de componentes nuevos y reconstruidos. Se concluye que las plataformas rehabilitadas tiene una vida útil, al menos, un 25% menor que las nuevas.

Para el estudio que nos ocupa se adopta la propuesta de Seo (1994) para cuantificar el impacto de cada tipo de reparación en el estado de conservación de los componentes del puente (tabla 5.4). Como se puede apreciar, ningún tipo de reparación es capaz de devolver a los elementos a su mejor estado de conservación, (la máxima valoración posible tras una reparación es 7.8), coincidiendo ello con las observaciones realizadas con anterioridad.

Se consideran reparaciones leves (Tipo 1), medias (Tipo 2) e intensas (Tipo 3) de forma que la expresión matemática de la propuesta queda:

$$IEC_i = MIN(7.8, IEC_j + \Delta R)$$

donde:

- IEC_i : índice de Estado del Componente tras la reparación.
- IEC_j : Índice de Estado del Componente antes de la reparación.
- ΔR : Mejora.

$$\Delta R = \begin{cases} 0 & \text{para reparaciones leves} \\ 2.2 & \text{para reparaciones medias} \\ 4.4 & \text{para reparaciones intensas} \end{cases}$$

Figura 5.3.- Deterioro de plataformas metálicas (Bolukbasi et al., 2006).

Valoración del estado del elemento		Antes de la reparación		
		3.4	5.6	7.8
Después de la reparación	3.4	Leve	-----	-----
	5.6	Media	Leve	-----
	7.8	Intensa	Media	Leve

Tabla 5.4. Impacto de las opciones de reparación. (Seo, 1994).

En la figura 5.4 se puede apreciar de forma gráfica el diferente impacto de las opciones de reparación.

Figura 5.4.- Impacto de las reparaciones.

5.3.5. Costes de gestión

A la hora de valorar los costes incurridos en las tareas de gestión de una red de infraestructuras, nos encontramos con que, sistemáticamente, se ignoran unos insumos que, en la realidad, pueden suponer un porcentaje significativo de la inversión a realizar y que, desde luego, en ningún caso resultan despreciables.

En la presente propuesta, estos costes si que se consideran, se agrupan bajo la denominación de costes de gestión e incluyen los siguientes conceptos, que se describen de forma somera:

- Costes de implantación del sistema: Básicamente se corresponden con la adquisición de licencias necesarias para disponer del software de soporte en la toma de decisiones. En el caso que nos ocupa, como objetivo específico planteado de inicio, estos costes son muy bajos, para facilitar la adquisición de la herramienta a todos los usuarios interesados. Sin embargo, en aplicaciones como PONTIS o BRIDGIT este coste de adquisición no es, en absoluto, del mismo orden, pudiendo representar una inversión bastante notable.
- Costes de operación: En este apartado se contemplan los costes relacionados con las campañas de inspección a realizar para obtener la información necesaria para alimentar el sistema y llevar a cabo la toma de decisiones. A su vez, engloban dos tipos de gastos con estructura diferente:

- Costes de personal: Se corresponden con las horas de dedicación del personal técnico y auxiliar necesario para llevar a cabo las inspecciones de los diferentes elementos.
- Costes de permisos, equipos y medios auxiliares: Se corresponden con los costes asociados a la ejecución, de forma práctica, de las inspecciones. Representan, en todos los casos, una inversión no despreciable, llegando a ser, en ocasiones, muy elevados.

5.3.6. Costes de usuario

Como consecuencia de las deficiencias registradas en los puentes de la red, los usuarios de las infraestructuras incurren en una serie de costes denominados costes de usuario. Se considerarán los costes indirectos ocasionados por el riesgo de accidentes de tráfico, descensos de la capacidad de carga y gálibos verticales inadecuados.

Las restricciones de carga máxima y gálibo vertical obligan a que una parte de los vehículos pesados se desvíe, utilizando rutas alternativas más largas, de forma que se incrementan los costes de operación de los vehículos y los tiempos de viaje (generando a los usuarios costes por demora).

Como resultado, tenemos unos costes indirectos que, dada su magnitud y contribución, deben considerarse en el análisis.

a) Costes por riesgo accidentes.

El índice anual de accidentes se estima usando el modelo implementado en Pontis y desarrollado por Thompson et al., (1999) según se indica en la ecuación E. 5.2.

$$I_A = 0.001 \times \left(C_1 + C_2 \times N \times L + C_3 \times \frac{N}{B} \times IMD \right)$$

E. 5.2

donde:

I_A : índice anual de accidentes.

C_1 , C_3 : Constantes cuyo valor se define en las tablas 5.5 y 5.6.

C_2 : Constante de valor 0,7323

N : Número de carriles.

L : Longitud del puente.

B: Anchura del puente.

IMD: Intensidad Media Diaria registrada.

TIPO VÍA	C ₁
Interestatal	886,0098
Otros	-377,3701

Tabla 5.5.- Valores de C₁ según el Tipo de Vía.

ESTADO PLATAFORMA	C ₃
IEC _{Plataforma} > 6	0,3904
IEC _{Plataforma} < 6	0,7899

Tabla 5.6.- Valores de C₃.

Una vez estimada la siniestralidad anual, el coste de usuario asociado al riesgo de accidentes vendrá dado por la ecuación E. 5.3. Para su aplicación, se supone que el coste unitario por accidente asciende a 54.723€ (Soares, 1999), aunque se permite al usuario la flexibilidad de modificar este valor en cualquier momento.

$$CU_{RA} = I_A \times C_A \quad \text{E. 5.3}$$

donde:

I_A: Índice anual de accidentes.

C_A: Coste por accidente.

b) Costes de operación de los vehículos.

Son debidos a los desvíos que los vehículos se ven obligados a tomar por restricciones de capacidad de carga (vehículos pesados con pesos superiores al límite de carga) o en gálibo vertical (vehículos con altura superior a la máxima permitida).

Considerando el tipo de vía, se puede obtener el porcentaje de vehículos que se desvía debido a una restricción de la capacidad de carga mediante la tabla 5.7. De la misma forma, se estima el porcentaje de vehículos que se desvía debido a un gálibo vertical insuficiente según la tabla 5.8 (Sinah et al., 2007).

VÍAS INTERESTATALES	
PMA (Libras)	P _c (%)
< 10.000	100
10.000 – 80.000	$102,24 - (8,982E-05)x - (1,4336E-08)x^2$
80.000 – 91.000	$18,976 - (2,083E-04)x$
> 91.000	0

VÍAS NO INTERESTATALES	
PMA (Libras)	P _c (%)
< 3.700	100
3.700 – 85.000	$107,26 - (1,9743E-03)x + (6,5265E-09)x^2 + (2,2256E-14)x^3$
> 85.000	0

Tabla 5.7.- Porcentaje de vehículos desviados por limitaciones de carga (Sinah, K. et al, 2007).

Para la estimación del coste promedio de funcionamiento por kilómetro desviado se opta por un valor de 0,254 €/km (Soares, 1999), aunque el usuario tiene la posibilidad de cambiar este valor en cualquier momento. Los costes de operación de los vehículos, para un puente determinado, vendrán dados por la E. 4.4:

$$CU_{OV} = IMD \times C_o \times D_{d-l} \times (P_c + P_g)$$

E. 5.4

donde:

IMD: Intensidad Media Diaria.

C_o: Costes de operación por km de desvío.

D_{d-l}: Diferencia entre la longitud de desvío y la longitud del puente en km.

P_c: Porcentaje de camiones que se desvían por el límite de peso.

P_g: Porcentaje de camiones que se desvían por gálibo vertical inadecuado.

VÍAS INTERESTATALES	
Gálibo (Pies)	P _G (%)
< 9,65	100
9,65 – 13,00	$855,91 - 223,430x + 22,199x^2 - 0,74236x^3$
13,00 – 14,00	$(1,0956E+56)x^{-48,683}$
14,00 – 16,10	$14,567 - 0,9046x$
> 16,10	0

VÍAS NO INTERESTATALES	
Gálibo (Pies)	P _G (%)
< 7,30	100
7,30 – 13,50	$-26,275 + 34,692x - 2,3894x^2$
13,50 – 14,00	$138,860 - 9,886x$
> 14,00	0

Tabla 5.8.- Porcentaje de vehículos desviados por gálibo vertical insuficiente. (Sinah et al., 2007).

c) Costes por demora.

Los vehículos que se ven obligados a desviarse emplean un tiempo adicional debido a que recorren una distancia mayor. Por lo tanto, el coste del usuario por demora (CU_D) se analiza estimando la diferencia entre el tiempo empleado en cruzar el puente y el tiempo necesario para recorrer la ruta de desvío. Así, el valor del coste por demora, para un puente determinado, viene estimado por la ecuación E. 5.5:

$$CU_D = IMD \times C_{tv} \times \left(\frac{L_d}{V_{rd}} - \frac{L}{V} \right) \times (P_C + P_G)$$

E. 5.5

donde:

IMD: Intensidad Media Diaria.

C_{tv} : Coste en tiempo de viaje por hora de desvío.

Se adopta un valor de 15,47€ (valor por defecto en Pontis)

L_d : Longitud de desvío.

V_{rd} : Velocidad en la ruta de desvío que se estima en un 80% de la velocidad en el puente.

L : Longitud del puente.

V : Velocidad en el puente.

P_C : Porcentaje de camiones que se desvían debido a limitaciones de carga.

P_G : Porcentaje de camiones que se desvían por insuficiente gálibo vertical.

5.4. Modelo integrado de optimización

Como se esbozó al inicio de este capítulo, el tamaño del problema a resolver es un factor determinante, ahí reside la complejidad de la tarea de establecer las relaciones de prioridad a la hora de llevar a cabo las actividades de mantenimiento, reparación y rehabilitación de los puentes de la red. Dado que se trata de proyectos con costes muy elevados, el presupuesto destinado a reparaciones debe ser cuidadosamente asignado, ya que solamente se alcanzará a cubrir las necesidades de una proporción pequeña de puentes de la red.

El correcto planteamiento del problema resultante requiere una evaluación conjunta a los Niveles de Red y de Puente, ya que abordar los dos niveles por separado sólo conduce a la selección de estrategias no óptimas. El establecimiento de las relaciones de precedencia de unos puentes sobre otros, a la hora de asignar los presupuestos de reparación, se considera un problema a Nivel de Red, mientras que la selección de los métodos de reparación de un puente, de forma individual, se considera un problema a Nivel de Puente. En los últimos años, se ha observado una tendencia creciente a integrar los dos niveles, la mayor parte de las veces mediante el uso de técnicas basadas en Algoritmos Genéticos. La figura 5.5 presenta un breve resumen de los distintos enfoques del problema.

Figura 5.5.- Niveles en la toma de decisiones de un SGP (Herzagy et al., 2004).

En el caso que nos ocupa, el problema se acomete mediante el planteamiento de dos problemas de optimización sucesivos. En primer lugar, se realiza un proceso de optimización sobre cada puente de la red, de forma que el tamaño del problema, a este nivel, todavía es razonable en términos de tiempo de procesamiento y número de variables involucradas. Por cada puente, se resuelven n problemas, uno por cada año del período de planificación (que fija el usuario), en los que se determina el conjunto óptimo de reparaciones, si la actuación se llevara a cabo en ese año. Esta operativa nos permitirá establecer un grupo de estrategias óptimas de reparación para cada año, de forma que, ya considerando toda la red, estos resultados se pueden utilizar en el segundo escalón de optimización, para determinar el año óptimo para afrontar las reparaciones en cada puente. A continuación se desarrollarán los aspectos particulares de este sistema de ayuda en la toma decisiones, que se ilustra en la Figura 5.6.

Figura 5.6.- Esquema del modelo integrado de optimización.

5.5. Optimización a Nivel de Puente

La consideración del Nivel de Puente constituye el primer escalón dentro del análisis realizado y, como se ha expuesto con anterioridad, en él se determinan las estrategias de reparación ligadas a cada puente y su coste.

La construcción del modelo se cimenta sobre el entramado de sistemas auxiliares que proporcionan los elementos necesarios para llevar a cabo el proceso de optimización. Así, en este sentido, ha quedado definido el sistema de valoración del estado de conservación, el modelo de deterioro, el impacto de las reparaciones sobre todos los componentes y los costes considerados, tanto directos como indirectos. De esta manera, para una determinada red de puentes, en la que conoceremos los estados iniciales de sus elementos (gracias a la campaña de inspecciones realizada), mediante las herramientas descritas seremos capaces de predecir los estados de todos los componentes a lo largo del período de planificación, tanto si se actúa sobre ellos como si no. Por otra parte, cada opción de reparación tiene un coste directo asociado y proporciona unos beneficios específicos, que se estiman mediante la diferencia registrada entre los valores de los índices de estado antes y después de la reparación. De la misma forma, se considera, en su caso, el beneficio derivado de la reducción de costes de los usuarios de la vía tras ejecutar una actuación.

De todo ello se colige que, para un año determinado, es posible construir un problema de optimización para determinar la estrategia de reparación que logra alcanzar la mejor ratio B/C si las actuaciones se llevaran en ese año.

Según lo expuesto, el problema definido para el Nivel de Puente consiste en obtener la máxima ratio B/C de la forma que se indica:

$$FO_{it}^{NP} = \text{Max} \left(\frac{B}{C} \right) = \text{Max} \left[\frac{(IEP_2 - IEP_1) \times 10^5 + B_{CU}}{C_R} \right]$$

donde:

FO_{it}^{NP} : Función objetivo a Nivel de Puente para el puente i en el año t.

IEP_1 : Índice de Estado del Puente i antes de la reparación.

IEP_2 : Índice de Estado del Puente i tras la reparación (considerando la mejora).

B_{CU} : Beneficio en términos de coste del usuario.

C_R : Coste de la reparación de todos los elementos.

Las restricciones a tener en cuenta en este nivel son las que se exponen a continuación:

- El valor del índice de estado tras la reparación de cualquier componente n (en todos los puentes y a lo largo del período de planificación completo) debe ser superior a un valor mínimo definido por el usuario (el valor fijado por defecto es 3, de acuerdo con FHWA(1995):

$$IEC_n \geq IEC_{min}$$

- El índice de estado del puente i tras cualquier opción de reparación (a lo largo del período de planificación completo) debe ser igual o superior a un valor aceptable, definido por el usuario:

$$IEP_i \geq IEP_{min}$$

- Se toma en consideración una restricción que tiene que ver con las relaciones lógicas de ejecución de las reparaciones consideradas. El hecho de acometer una reparación de la plataforma trae consigo la necesidad de retirar parte del pavimento. De ahí que se imponga que la opción de reparación del pavimento deba ser igual o superior (en extensión) a la correspondiente a la plataforma.

$$OP_{it}^{Pavimento} \geq OP_{it}^{Plataforma}$$

donde:

$OP_{it}^{Pavimento}$: Tipo de reparación a realizar sobre el pavimento del puente i , en el año t ,

$OP_{it}^{Plataforma}$: Tipo de reparación a realizar sobre la plataforma del puente i , en el año t .

- Las variables de decisión han de tomar valores enteros en un rango de cero a tres (0-3), ya que son las encargadas de representar las opciones de reparación seleccionadas (0: No actuar, 1: Reparación Leve, 2: Reparación Media y 3: Reparación Intensa), mientras que no están definidas fuera de ese dominio. Por tanto, se habrán de introducir las restricciones:

$$X_{ijt} \sim \text{Entero}$$

$$3 \geq X_{ijt} \geq 0$$

donde:

X_{ijt} : Opción de reparación correspondiente al elemento j , del puente i , en el año t .

Las incógnitas de este problema de optimización (para cada puente de la red y para cada año del período de planificación) son las opciones de reparación para los siete elementos constituyentes considerados en cada puente: plataforma, pavimento, juntas, apoyos, superestructura, subestructura y acabados. Se realiza un bucle de n iteraciones, una por cada año del período de estudio, y en cada una de ellas se resuelve un problema de optimización independiente, tal y como se muestra en la figura 5.7.

5.5.1. Implantación 1^{er} nivel

Al igual que el resto del modelo, la optimización a Nivel de Puente se ha implementado en una serie de hojas de cálculo contenidas en un Libro del software comercial Microsoft Excel. La motivación latente tras esta decisión es el diseño de una herramienta que posea, de forma simultánea, las siguientes características:

- Accesible. Se busca que la herramienta pueda ser utilizada en administraciones de ámbito local, sin grandes inversiones asociadas, por lo tanto, la elección se dirige hacia un producto de Microsoft ampliamente difundido y disponible en el equipo de cualquier técnico.

- Entorno amigable: Se desea huir de los entornos oscuros propios de algunos paquetes especializados. Para conseguir esto nada mejor que un entorno al que Microsoft ha dedicado décadas de desarrollo y con el que están familiarizados la práctica totalidad de los técnicos en activo
- Fácil manejo: A tal fin se han diseñado una serie de herramientas, mediante programación en VB para objetos, cuyo objetivo es automatizar los diferentes cálculos asociados al modelo de optimización, de forma que el usuario sea capaz de manejar la aplicación sin necesidad de poseer grandes conocimientos informáticos.

HORIZONTE DE PLANIFICACIÓN	Año 1							
	Pla.	Pav.	Jun.	Ap.	Sup.	Sub.	Aca.	
	Puente 1	0	1	2	1	1	0	1
	Puente 2	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.	.
	Puente n	1	2	2	2	1	1	2
	Año 2							
	Pla.	Pav.	Jun.	Ap.	Sup.	Sub.	Aca.	
Puente 1	1	1	1	2	0	0	2	
Puente 2	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	
Puente n	2	2	2	2	1	1	3	
.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	
Año m								
Pla.	Pav.	Jun.	Ap.	Sup.	Sub.	Aca.		
Puente 1	2	2	2	0	1	2	1	
Puente 2	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	
Puente n	1	2	2	2	1	1	2	
OPCIONES DE REPARACIÓN:								
0: NO SE ACTUA.								
1: REPARACIÓN LEVE.								
2: REPARACIÓN MEDIA.								
3: REPARACIÓN INTENSA.								

Figura 5.7.- Esquematización del análisis a Nivel de Puente.

Se han programado diferentes hojas de cálculo conectadas entre sí, de forma que cada una de ellas da respuesta a un aspecto específico del problema. Los módulos considerados son los siguientes:

- Entrada de datos: Se recoge la información de partida, necesaria para que los demás módulos puedan cumplir con su cometido. La datos disponibles, referentes a todos los puentes de la red, se ordenan en columnas con el siguiente contenido, figura 5.8:
 - Columna B: Identificador del puente.
 - Columna C: Año de construcción.
 - Columna D y E: Datos de tráfico (IMD y % vehículos pesados).
 - Columna F: Número de carriles.
 - Columna G: Longitud de la ruta alternativa considerada.
 - Columnas H, I, J, M, N y P: Materiales de los diferentes componentes.
 - Columnas K y L: Dimensiones en planta de la plataforma.
 - Columnas O y Q: Número de juntas y apoyos.
 - Columnas R-X: Índices de estado de los componentes observados en la campaña de inspecciones.
 - Columna Y: Índice de estado del puente en la actualidad.
 - A: Pesos correspondientes a los componentes considerados.
 - B: Tasas de actualización para cada año del período de planificación.

Punto Nº	Año	IMD	Nº Carriles	Longitud Desvío (km)	Material Tablero	Material Superestructura	Material Subestructura	Anchura Tablero	Longitud Tablero	Material Pavimento	Material Juntas	Nº Juntas	Material Apoyos	Nº Apoyos	ECR 2014								2014 BCR
															Tab.	Pav.	Jun.	Ap.	Sup.	Sub.	Aca.		
1	1.982	2.200	2	3	Hormigon	Hormigon	Hormigon	10.00	20.00	Bituminoso	Goma	2	Elastomero	10	6.1	7.4	5.0	3.9	5.0	3.7	3.9	5.0	
2	1.974	1.600	2	5	Hormigon	Hormigon	Hormigon	12.00	30.00	Bituminoso	Goma	2	Elastomero	10	5.5	4.5	3.5	4.5	4.7	3.9	6.7	4.6	
3	1.965	1.800	2	6	Hormigon	Hormigon	Hormigon	13.00	50.00	Bituminoso	Goma	3	Elastomero	20	6.4	3.9	4.8	6.5	4.7	3.1	6.7	5.0	
4	1.989	1.200	2	4	Hormigon	Hormigon	Hormigon	11.00	40.00	Bituminoso	Goma	3	Elastomero	20	7.1	3.7	6.1	7.5	3.7	4.6	4.2	5.3	
5	1.998	1.750	2	5	Hormigon	Hormigon	Hormigon	9.50	35.00	Bituminoso	Goma	3	Elastomero	20	4.6	6.5	3.8	5.0	6.6	5.6	7.3	5.5	
6	2.004	1.500	2	2	Hormigon	Hormigon	Hormigon	11.50	24.00	Bituminoso	Goma	2	Elastomero	10	5.2	5.5	4.8	5.7	3.9	3.8	5.7	4.8	
7	1.979	1.400	2	3	Hormigon	Hormigon	Hormigon	12.25	25.00	Bituminoso	Goma	2	Elastomero	10	7.2	3.7	4.7	3.6	3.0	7.2	6.1	5.1	
8	1.963	1.350	2	8	Hormigon	Hormigon	Hormigon	10.50	20.00	Bituminoso	Goma	2	Elastomero	10	3.8	4.2	6.9	5.6	6.8	4.9	4.6	5.4	
9	1.988	1.900	2	7	Hormigon	Hormigon	Hormigon	10.00	28.00	Bituminoso	Goma	2	Elastomero	10	4.2	4.0	7.2	7.5	5.5	5.5	5.6	5.6	
10	1.969	1.582	2	9	Hormigon	Hormigon	Hormigon	10.00	20.00	Bituminoso	Goma	2	Elastomero	10	4.0	6.1	6.8	5.8	5.9	4.0	3.1	5.2	
11	1.982	1.369	2	2	Hormigon	Hormigon	Hormigon	10.00	20.00	Bituminoso	Goma	2	Elastomero	10	7.3	3.7	3.5	3.3	4.8	4.3	4.7	4.6	
12	1.974	1.258	2	4	Hormigon	Hormigon	Hormigon	12.00	30.00	Bituminoso	Goma	2	Elastomero	10	7.4	4.0	7.0	5.5	4.5	7.1	4.3	5.9	
13	1.965	1.500	2	6	Hormigon	Hormigon	Hormigon	13.00	50.00	Bituminoso	Goma	3	Elastomero	20	3.9	4.8	5.5	6.9	3.4	6.2	7.1	5.1	
14	1.989	1.600	2	5	Hormigon	Hormigon	Hormigon	11.00	40.00	Bituminoso	Goma	3	Elastomero	20	5.8	7.2	4.7	6.9	4.5	4.0	6.3	5.4	
15	1.998	2.500	2	7	Hormigon	Hormigon	Hormigon	9.50	35.00	Bituminoso	Goma	3	Elastomero	20	5.8	5.8	5.4	7.1	7.1	3.9	3.1	5.6	
16	2.004	1.289	2	8	Hormigon	Hormigon	Hormigon	11.50	24.00	Bituminoso	Goma	2	Elastomero	10	5.7	6.7	5.1	6.7	4.6	4.4	4.1	5.3	
17	1.979	1.100	2	3	Hormigon	Hormigon	Hormigon	12.25	25.00	Bituminoso	Goma	2	Elastomero	10	4.3	3.1	7.1	4.2	3.1	3.7	4.5	4.3	
18	1.963	1.680	2	2	Hormigon	Hormigon	Hormigon	10.50	20.00	Bituminoso	Goma	2	Elastomero	10	3.5	4.8	6.8	3.0	4.8	3.8	4.9	4.5	
19	1.988	1.900	2	4	Hormigon	Hormigon	Hormigon	10.00	28.00	Bituminoso	Goma	2	Elastomero	10	4.3	5.9	4.8	6.5	4.0	5.3	4.0	4.9	
20	1.969	1.850	2	5	Hormigon	Hormigon	Hormigon	10.00	20.00	Bituminoso	Goma	2	Elastomero	10	6.5	3.7	5.9	3.9	4.7	5.0	7.4	5.2	
21	1.982	2.300	2	3	Hormigon	Hormigon	Hormigon	10.00	20.00	Bituminoso	Goma	2	Elastomero	10	5.0	3.3	6.2	3.9	6.0	4.6	5.8	5.1	
22	1.974	1.500	2	4	Hormigon	Hormigon	Hormigon	12.00	30.00	Bituminoso	Goma	2	Elastomero	10	4.4	3.4	4.1	4.0	4.0	6.2	4.2	4.4	
23	1.965	1.400	2	2	Hormigon	Hormigon	Hormigon	13.00	50.00	Bituminoso	Goma	3	Elastomero	20	7.4	4.2	5.8	6.0	6.7	6.4	6.9	6.3	
24	1.989	1.350	2	1	Hormigon	Hormigon	Hormigon	11.00	40.00	Bituminoso	Goma	3	Elastomero	20	3.1	4.6	4.4	4.9	3.0	6.9	6.9	4.6	
25	1.998	1.900	2	2	Hormigon	Hormigon	Hormigon	9.50	35.00	Bituminoso	Goma	3	Elastomero	20	3.8	6.0	5.0	5.3	5.9	7.4	6.1	5.6	
26	2.004	1.582	2	5	Hormigon	Hormigon	Hormigon	11.50	24.00	Bituminoso	Goma	2	Elastomero	10	4.6	5.9	5.7	5.2	4.0	3.3	5.4	4.7	
27	1.979	1.500	2	3	Hormigon	Hormigon	Hormigon	12.25	25.00	Bituminoso	Goma	2	Elastomero	10	6.2	4.0	6.1	4.9	7.4	5.1	3.9	5.7	
28	1.963	1.400	2	4	Hormigon	Hormigon	Hormigon	10.50	20.00	Bituminoso	Goma	2	Elastomero	10	5.3	4.4	6.3	4.9	5.0	3.9	3.8	4.9	
29	1.988	1.350	2	7	Hormigon	Hormigon	Hormigon	10.00	28.00	Bituminoso	Goma	2	Elastomero	10	5.1	5.5	5.3	4.9	5.1	6.4	3.9	5.3	
30	1.969	1.900	2	8	Hormigon	Hormigon	Hormigon	10.00	20.00	Bituminoso	Goma	2	Elastomero	10	6.7	5.6	4.3	6.9	6.4	3.9	5.8	5.6	

Figura 5.8. Módulo de entrada de datos.

- Modelo de deterioro: Se realizan las aproximaciones estocástica y determinista al problema, de acuerdo con lo expuesto en el Capítulo 4. Se obtienen las expresiones correspondientes a las envolventes que caracterizan el modelo de comportamiento de los componentes principales. De igual manera, se definen las expresiones que serán utilizadas para predecir los procesos de deterioro de pavimento, juntas, apoyos y acabados.
- Costes directos: Obtiene los costes de ejecución correspondientes a todas las opciones de reparación, de todos los componentes y para todos los puentes.
- Costes de gestión: Obtiene los costes asociados a la implantación del SGP y a la realización de las campañas de inspección de estructuras en la red.

Puente Nº	Tablero			Pavimento			Juntas			Apoyos			Superestructura			Subestructura			Acabados		
	Op. 1	Op. 2	Op. 3	Op. 1	Op. 2	Op. 3	Op. 1	Op. 2	Op. 3	Op. 1	Op. 2	Op. 3	Op. 1	Op. 2	Op. 3	Op. 1	Op. 2	Op. 3	Op. 1	Op. 2	Op. 3
1	10.000	90.000	256.000	1.600	6.800	12.000	2.500	20.000	40.000	880	12.000	24.000	17.600	300.000	400.000	17.600	300.000	400.000	1.200	8.000	16.000
2	18.000	162.000	460.800	2.880	12.240	21.600	3.000	24.000	48.000	880	12.000	24.000	31.680	540.000	720.000	31.680	540.000	720.000	2.160	14.400	28.800
3	32.500	292.500	832.000	5.200	22.100	39.000	4.875	39.000	78.000	1.760	24.000	48.000	57.200	975.000	1.300.000	57.200	975.000	1.300.000	3.900	26.000	52.000
4	22.000	198.000	563.200	3.520	14.960	26.400	4.125	33.000	66.000	1.760	24.000	48.000	38.720	660.000	880.000	38.720	660.000	880.000	2.640	17.600	35.200
5	16.625	149.625	425.600	2.660	11.305	19.950	3.563	28.500	57.000	1.760	24.000	48.000	29.260	498.750	665.000	29.260	498.750	665.000	1.995	13.300	26.600
6	13.800	124.200	353.280	2.208	9.384	16.560	2.875	23.000	46.000	880	12.000	24.000	24.288	414.000	552.000	24.288	414.000	552.000	1.656	11.040	22.080
7	15.313	137.813	392.000	2.450	10.413	18.375	3.063	24.500	49.000	880	12.000	24.000	26.950	459.375	612.500	26.950	459.375	612.500	1.838	12.250	24.500
8	10.500	94.500	268.800	1.680	7.140	12.600	2.625	21.000	42.000	880	12.000	24.000	18.480	315.000	420.000	18.480	315.000	420.000	1.260	8.400	16.800
9	14.000	126.000	358.400	2.240	9.520	16.800	2.500	20.000	40.000	880	12.000	24.000	24.640	420.000	560.000	24.640	420.000	560.000	1.680	11.200	22.400
10	10.000	90.000	256.000	1.600	6.800	12.000	2.500	20.000	40.000	880	12.000	24.000	17.600	300.000	400.000	17.600	300.000	400.000	1.200	8.000	16.000
11	10.000	90.000	256.000	1.600	6.800	12.000	2.500	20.000	40.000	880	12.000	24.000	17.600	300.000	400.000	17.600	300.000	400.000	1.200	8.000	16.000
12	18.000	162.000	460.800	2.880	12.240	21.600	3.000	24.000	48.000	880	12.000	24.000	31.680	540.000	720.000	31.680	540.000	720.000	2.160	14.400	28.800
13	32.500	292.500	832.000	5.200	22.100	39.000	4.875	39.000	78.000	1.760	24.000	48.000	57.200	975.000	1.300.000	57.200	975.000	1.300.000	3.900	26.000	52.000
14	22.000	198.000	563.200	3.520	14.960	26.400	4.125	33.000	66.000	1.760	24.000	48.000	38.720	660.000	880.000	38.720	660.000	880.000	2.640	17.600	35.200
15	16.625	149.625	425.600	2.660	11.305	19.950	3.563	28.500	57.000	1.760	24.000	48.000	29.260	498.750	665.000	29.260	498.750	665.000	1.995	13.300	26.600
16	13.800	124.200	353.280	2.208	9.384	16.560	2.875	23.000	46.000	880	12.000	24.000	24.288	414.000	552.000	24.288	414.000	552.000	1.656	11.040	22.080
17	15.313	137.813	392.000	2.450	10.413	18.375	3.063	24.500	49.000	880	12.000	24.000	26.950	459.375	612.500	26.950	459.375	612.500	1.838	12.250	24.500
18	10.500	94.500	268.800	1.680	7.140	12.600	2.625	21.000	42.000	880	12.000	24.000	18.480	315.000	420.000	18.480	315.000	420.000	1.260	8.400	16.800
19	14.000	126.000	358.400	2.240	9.520	16.800	2.500	20.000	40.000	880	12.000	24.000	24.640	420.000	560.000	24.640	420.000	560.000	1.680	11.200	22.400
20	10.000	90.000	256.000	1.600	6.800	12.000	2.500	20.000	40.000	880	12.000	24.000	17.600	300.000	400.000	17.600	300.000	400.000	1.200	8.000	16.000
21	10.000	90.000	256.000	1.600	6.800	12.000	2.500	20.000	40.000	880	12.000	24.000	17.600	300.000	400.000	17.600	300.000	400.000	1.200	8.000	16.000
22	18.000	162.000	460.800	2.880	12.240	21.600	3.000	24.000	48.000	880	12.000	24.000	31.680	540.000	720.000	31.680	540.000	720.000	2.160	14.400	28.800
23	32.500	292.500	832.000	5.200	22.100	39.000	4.875	39.000	78.000	1.760	24.000	48.000	57.200	975.000	1.300.000	57.200	975.000	1.300.000	3.900	26.000	52.000

Figura 5.9. Obtención de costes de reparación.

- Costes de usuario: Analiza los costes indirectos asociados a las diferentes estrategias de reparación.
- Deterioro: Analiza los valores de los índices de estado de los diferentes componentes, (y del puente), su evolución a lo largo del período de planificación y el impacto de las estrategias de reparación planteadas.

PUENTE	ECR AÑO 2014							BCR 2014	POLÍTICAS DE DECISIÓN AÑO 2015							ECR AÑO 2015 (Repair 2015)							ECR AÑO 2015 Do Nothing							ECR AÑO 2015							BCR 2015
	Nº	Tab.	Pav.	Jun.	Ap.	Sup.	Sub.		Aca.	Tab.	Pav.	Jun.	Ap.	Sup.	Sub.	Aca.	Tab.	Pav.	Jun.	Ap.	Sup.	Sub.	Aca.	Tab.	Pav.	Jun.	Ap.	Sup.	Sub.	Aca.	Tab.	Pav.	Jun.	Ap.	Sup.	Sub.	
1	6.1	7.4	5.0	3.9	5.0	3.7	3.9	5.0	0	0	2	3	0	0	3	6.1	7.3	7.1	7.8	4.8	3.6	7.8	6.1	7.3	4.9	3.7	4.8	3.6	3.9	6.1	7.3	7.1	7.8	4.8	3.6	7.8	6.0
2	5.5	4.5	3.5	4.5	4.7	3.9	6.7	4.6	0	3	3	3	0	0	2	5.5	7.8	7.8	7.8	4.6	3.9	7.8	5.5	4.4	3.5	4.4	4.6	3.9	6.7	5.5	7.8	7.8	7.8	4.6	3.9	7.8	6.1
3	6.4	3.9	4.8	6.5	4.7	3.1	6.7	5.0	0	3	3	2	0	0	0	6.4	7.8	7.8	7.8	4.6	3.1	6.7	6.4	3.8	4.7	6.4	4.6	3.1	6.7	6.4	3.8	4.7	6.4	4.6	3.1	6.7	5.0
4	7.1	3.7	6.1	7.5	3.7	4.6	4.2	5.3	0	3	2	0	0	0	2	7.0	7.8	7.8	7.3	3.4	4.5	6.4	7.0	3.7	6.1	7.3	3.4	4.5	4.2	7.0	3.7	6.1	7.3	3.4	4.5	4.2	5.2
5	4.6	6.5	3.8	5.0	6.6	5.6	7.3	5.5	0	2	2	2	0	0	0	4.3	7.8	5.7	6.7	6.5	5.5	7.2	4.3	6.4	3.5	4.5	6.5	5.5	7.2	4.3	6.4	3.5	4.5	6.5	5.5	7.2	5.3
6	5.2	5.5	4.8	5.7	3.9	3.8	5.7	4.8	2	2	2	2	0	0	2	7.0	7.3	6.6	7.8	3.4	3.5	7.6	4.8	5.1	4.4	5.6	3.4	3.5	5.4	4.8	5.1	4.4	5.6	3.4	3.5	5.4	4.4
7	7.2	3.7	4.7	3.6	3.0	7.2	6.1	6.1	0	3	0	3	0	0	2	7.1	7.8	4.6	7.8	3.0	7.1	7.8	7.1	3.7	4.6	3.5	3.0	7.1	6.1	7.1	3.7	4.6	3.5	3.0	7.1	6.1	6.0
8	3.8	4.2	6.9	5.6	6.8	4.9	4.6	5.4	0	3	0	2	0	0	2	3.7	7.8	6.9	7.7	6.7	4.7	6.7	3.7	4.1	6.9	5.5	6.7	4.7	4.5	3.7	4.1	6.9	5.5	6.7	4.7	4.5	5.3
9	4.2	4.0	7.2	7.5	5.5	5.5	5.6	5.6	0	3	0	0	0	0	2	4.1	7.8	7.1	7.3	5.4	5.4	7.7	4.1	3.9	7.1	7.3	5.4	5.4	5.5	4.1	3.9	7.1	7.3	5.4	5.4	5.5	5.5
10	4.0	6.1	6.8	5.8	5.9	4.0	3.1	5.2	0	2	2	2	0	0	3	3.9	7.8	7.8	7.8	5.9	4.0	7.5	3.9	6.1	6.8	5.8	5.9	4.0	3.1	3.9	6.1	6.8	5.8	5.9	4.0	3.1	5.1
11	7.3	3.7	3.5	3.3	4.8	4.3	4.7	4.6	0	3	2	3	0	0	2	7.2	7.8	5.6	7.6	4.7	4.2	6.9	7.2	3.6	3.4	3.2	4.7	4.2	4.7	7.2	3.6	3.4	3.2	4.7	4.2	4.7	4.6
12	7.4	4.0	7.0	5.5	4.5	7.1	4.3	5.9	0	2	0	0	0	0	0	7.2	6.2	7.0	5.5	4.4	7.0	4.2	7.2	4.0	7.0	5.5	4.4	7.0	4.2	7.2	4.0	7.0	5.5	4.4	7.0	4.2	5.8
13	3.9	4.8	5.5	6.9	3.4	6.2	7.1	5.1	2	3	2	2	0	0	0	6.0	7.8	7.6	7.8	3.3	6.2	7.0	3.8	4.7	5.4	6.8	3.3	6.2	7.0	3.8	4.7	5.4	6.8	3.3	6.2	7.0	5.1
14	5.8	7.2	4.7	6.9	4.5	4.0	6.3	5.4	0	0	3	2	0	0	2	5.7	7.1	7.8	7.8	4.2	3.9	7.8	5.7	7.1	4.6	6.9	4.2	3.9	6.3	5.7	7.1	4.6	6.9	4.2	3.9	6.3	5.3
15	5.8	5.8	5.4	7.1	7.1	3.9	3.1	5.6	0	2	0	0	0	0	3	5.6	7.8	5.1	7.0	7.0	3.6	7.4	5.6	5.6	5.1	7.0	7.0	3.6	3.0	5.6	5.6	5.1	7.0	7.0	3.6	3.0	5.4
16	5.7	6.7	5.1	6.7	4.6	4.4	4.1	5.3	0	2	2	2	0	0	3	5.4	7.8	6.9	7.8	4.2	4.0	7.8	5.4	6.6	4.7	6.6	4.2	4.0	3.6	5.4	6.6	4.7	6.6	4.2	4.0	3.6	4.9
17	4.3	3.1	7.1	4.2	3.1	3.7	4.5	4.3	3	3	2	3	0	0	3	7.8	7.5	7.8	7.8	3.1	3.7	7.8	4.2	3.1	7.1	4.0	3.1	3.7	4.5	4.2	3.1	7.1	4.0	3.1	3.7	4.5	4.2
18	3.5	4.8	6.8	3.0	4.8	3.8	4.9	4.5	2	3	2	3	0	0	3	5.6	7.8	7.8	7.4	4.6	3.7	7.8	3.4	4.7	6.8	3.0	4.6	3.7	4.8	3.4	4.7	6.8	3.0	4.6	3.7	4.8	4.4
19	4.3	5.9	4.8	6.5	4.0	5.3	4.0	4.9	2	2	2	2	0	0	3	6.4	7.8	7.0	7.8	3.7	5.3	7.8	4.2	5.9	4.8	6.5	3.7	5.3	4.0	4.2	5.9	4.8	6.5	3.7	5.3	4.0	4.8
20	6.5	3.7	5.9	3.9	4.7	5.0	7.4	5.2	0	3	0	3	0	0	0	6.5	7.8	5.9	7.8	4.6	5.0	7.2	6.5	3.6	5.9	3.8	4.6	5.0	7.2	6.5	3.6	5.9	3.8	4.6	5.0	7.2	5.2
21	5.0	3.3	6.2	3.9	6.0	4.6	5.6	5.1	0	3	0	3	0	0	2	5.0	7.7	6.2	7.8	5.9	4.6	7.8	5.0	3.3	6.2	3.7	5.9	4.6	5.6	5.0	3.3	6.2	3.7	5.9	4.6	5.6	5.0
22	4.4	3.4	4.1	4.0	4.0	6.2	4.2	4.4	0	3	3	3	0	0	2	4.3	7.7	7.8	7.8	3.9	6.2	6.3	4.3	3.3	4.0	3.9	3.9	6.2	4.1	4.3	3.3	4.0	3.9	3.9	6.2	4.1	4.4
23	7.4	4.2	5.8	6.0	6.7	6.4	6.9	6.3	0	2	0	0	0	0	0	7.2	6.3	5.7	5.9	6.6	6.3	6.8	7.2	4.1	5.7	5.9	6.6	6.3	6.8	7.2	4.1	5.7	5.9	6.6	6.3	6.8	6.2
24	3.1	4.6	4.4	4.9	3.0	6.9	6.9	4.6	2	3	3	2	0	0	0	5.3	7.8	7.8	6.9	3.0	6.9	6.9	3.1	4.6	4.3	4.7	3.0	6.9	6.9	3.1	4.6	4.3	4.7	3.0	6.9	6.9	4.6

Figura 5.10. Evolución del deterioro.

Se ha de resolver un problema de optimación por cada puente de la red y por cada año del período de planificación. Si pensamos en una red de unos 20 puentes, con un período de estudio de cinco años, el número de problemas a resolver ascendería a 100. Este matiz hace ineludible la automatización del proceso ya que, de otro modo, se habría de implementar cada problema e introducir los parámetros y restricciones en un número muy elevado de ocasiones, (100 en el ejemplo expuesto), para llevar a cabo el proceso. Para resolver este aspecto, se programa una rutina en VB para objetos, que se ejecuta mediante un botón de comando y que resuelve, de forma consecutiva, todos los problemas de optimización planteados para el año seleccionado por el usuario, aplicando las restricciones necesarias y mostrando los resultados obtenidos en la interfaz diseñada a tal efecto.

Sistema Gestión Puentes

¿Para qué año desea ejecutar el proceso?

Aceptar

Cancelar

2016

Figura 5.11.- Selección del año de análisis.

5.5.2. Técnicas de optimización 1^{er} nivel

El software comercial Microsoft Excel, contenido en el paquete Microsoft Office 2013, dispone de una implementación básica de la herramienta de optimización Solver creada por Frontline Systems. En este punto, se procede a analizar los métodos de resolución disponibles en dicha herramienta, para seleccionar la técnica más conveniente para obtener la solución del problema planteado a este nivel. Las alternativas son las siguientes, (Sánchez et al., 1998; Frontline Solvers, 2014):

Figura 5.12.- Menú de entrada de parámetros de Solver.

- Método Simplex PL.** En un problema de Programación Lineal (PL) tanto la función objetivo como todas las restricciones son funciones lineales de las variables de decisión. Puesto que todas las funciones lineales son convexas, los problemas de PL son intrínsecamente más fáciles de resolver que los problemas no lineales de tipo general, que pueden ser no-convexos. En un problema no lineal, no-convexo, puede existir más de una región factible y la solución óptima puede encontrarse en cualquier punto dentro de estas regiones. Por contra, un problema lineal tiene a lo sumo una región factible con caras planas en su superficie externa (poliedro convexo) y una solución óptima siempre se encontrará en un vértice de dicha superficie (donde se intersectan dos o más restricciones). Esto significa que un método de resolución lineal tiene que considerar muchos puntos menos que uno no lineal y, además, siempre será posible determinar que:

- No existe solución factible, es decir, que satisfaga todas las restricciones simultáneamente.
- No existe solución porque el problema es no acotado, es decir, el valor de la función objetivo no está acotado.
- Existe una solución óptima que es única.
- La solución no es única ya que existen soluciones múltiples o alternativas.

La versión standard de Solver disponible en Microsoft Excel utiliza una implementación básica (limitada a 200 variables de decisión) del método Simplex Primal para resolver problemas de PL. Este método, desarrollado originalmente por Dantzig en 1948, ha experimentado vertiginosas mejoras en las últimas décadas, utilizando métodos avanzados de álgebra lineal numérica. El algoritmo no recorre de forma explícita todos los vértices del conjunto factible, sino que, en cada iteración, comprueba si existe un cambio de vértice que mejore la solución actual. Cuando se determina que no existe un vértice con un mejor valor de la función objetivo que el actual se detiene el proceso puesto que se ha alcanzado el óptimo. Por tanto, en un número finito de pasos puede encontrar el óptimo o bien conocer si no hay solución debido a no factibilidad o a soluciones no acotadas.

- **Método GRG Non Linear.** El algoritmo utilizado por Solver para resolver problemas no lineales es el del Gradiente Reducido Generalizado (versión GRG2) desarrollado por Leon Lasdon y Allan Waren. A grandes rasgos, al igual que otros algoritmos de Programación No Lineal (PNL), parte de una solución factible conocida como punto inicial e intenta desplazarse a través de la región factible en una dirección de forma que el valor de la función objetivo mejore. El algoritmo opera de forma iterativa, repitiendo el proceso hasta que no existe posibilidad de mejora. En ese momento la solución es un óptimo local, no necesariamente global. En este sentido, es preciso tener en cuenta dos características de las soluciones obtenidas al resolver un problema de PNL con Solver:

- El algoritmo puede finalizar en un óptimo local que puede no ser el óptimo global del problema.
- El óptimo local en que finaliza el algoritmo depende del punto inicial.

El proceso de solución del algoritmo necesita calcular valores de la primera derivada parcial de la función objetivo y de las restricciones en cada iteración. El método GRG realiza asimismo una reducción del problema original a otro sin restricciones resolviendo un sistema de ecuaciones para ciertas variables (básicas) en términos del resto (no básicas). Entonces, se elige una dirección de búsqueda (un vector n -dimensional donde n es el número de variables no básicas) a lo largo de la cual se establece una mejora de la función objetivo. Los métodos utilizados para determinar esta dirección de búsqueda son el de Newton y, como alternativa, el método del gradiente conjugado. La elección resulta irrelevante dado que Solver es capaz de cambiar automáticamente de un método a otro en función de la capacidad de almacenamiento disponible, sea cual sea la opción elegida. Por último, una vez elegida la dirección, el algoritmo realiza una búsqueda a través de dicha dirección variando la amplitud del desplazamiento para la mejora del objetivo reducido.

Figura 5.13.- Ejemplo de óptimos locales y globales en el espacio factible.

- **Método Evolutionary.** Los Algoritmos Evolutivos son métodos estocásticos de búsqueda de soluciones que tratan de imitar los principios de la evolución biológica y el comportamiento social de las diferentes especies. Entre ellos podemos destacar los Algoritmos Genéticos y otras técnicas específicas como el Algoritmo de las Ranas Saltarinas, la optimización por Cúmulo de Partículas y la Optimización

de la Colonia de Hormigas. El método evolutivo de resolución implementado en Solver se basa en Algoritmos Genéticos (AG). El algoritmo maneja un esquema de codificación, en forma de cadenas de bits (genes), denominadas cromosomas, que representa los parámetros del problema. Los genes se generan de forma aleatoria y cada uno de ellos representa una solución al problema. La figura 5.14 muestra las etapas básicas en el desarrollo de un AG (Lin at al., 1996).

Figura 5.14.- Proceso de un Algoritmo Genético (Lin at al., 1996)

El algoritmo necesita evaluar solamente la función objetivo (aptitud) para guiar la búsqueda y no sus derivadas u otros parámetros auxiliares. La aplicación de un algoritmo genético difiere de los métodos de optimización clásica de varias maneras:

Aleatoriedad. Los Algoritmos Genéticos son métodos de optimización estocástica aleatoria y, por lo tanto, pueden generar soluciones diferentes en distintas ejecuciones (incluso si no se realizan cambios en el modelo), en contraposición a los métodos deterministas (métodos de resolución lineal, no lineal y entera) que siempre conducen a la misma solución si se comienza con los mismos valores en las celdas de las variables de decisión.

Población. El algoritmo genético es capaz de operar con varias soluciones simultáneamente en lugar de hacerlo de forma secuencial como los métodos clásicos de optimización. El uso de una población de soluciones ayuda al algoritmo a evitar quedar atrapado en óptimos locales.

Mutación. Es el operador genético inspirado en el papel de la mutación del ADN de los organismos en la evolución natural. Periódicamente el algoritmo realiza mutaciones o cambios aleatorios en uno o más genes de la población actual para producir nuevas soluciones (que pueden ser mejores o peores que las actuales). El resultado de una mutación puede no ser una solución factible y el algoritmo intenta reparar esa solución para que lo sea. Este operador evita que se produzcan estancamientos en la población.

Crossover. Es el operador genético inspirado en el papel de la reproducción sexual en la evolución de los seres vivos. El algoritmo intenta combinar los elementos de las soluciones existentes para crear una nueva que posea algunas de las características de cada uno de los "padres". Los elementos (por ejemplo, valores de las variables de decisión) de las soluciones existentes se combinan en una operación inspirada en la combinación de fragmentos de ADN que ocurre en la reproducción de los organismos biológicos.

Selección. Es el operador genético inspirado en el papel de la selección natural en la evolución. El algoritmo realiza un proceso de selección en la que los miembros más aptos de la población sobreviven mientras que el resto son eliminados. En un problema de optimización con restricciones, la noción de aptitud depende, en parte, de si una solución es viable (es decir, si satisface todas las restricciones) y, en parte, del valor de la función objetivo. El proceso de selección es el paso que guía al algoritmo hacia soluciones aún mejores. Normalmente se lleva a cabo mediante las técnicas de ruleta y torneo.

Inconvenientes. Un inconveniente de cualquier algoritmo evolutivo es que la bondad de una solución sólo se entiende en comparación con otras soluciones actualmente conocidas, ya que en el algoritmo no existe el concepto de solución óptima o alguna forma de probar si una solución es óptima. Esto también significa que los únicos criterios de parada posibles son el tiempo de proceso, el número máximo de iteraciones o el número máximo de soluciones de prueba que se desea explorar.

Un problema de Programación Entera Mixta (MIP) es aquel donde algunas de las variables de decisión necesariamente deben adoptar valores enteros. Un caso particular son las variables cuyo valor está limitado a cero o uno (0/1) que se denominan variables enteras binarias y que se pueden utilizar, por ejemplo, para modelizar la conveniencia o no de llevar a cabo una cierta actuación. Las variables enteras conducen a un problema de optimización no convexo y, por lo tanto, mucho más difícil de resolver, de forma que la memoria y el tiempo necesarios puede aumentar de manera drástica a medida que se agregan más variables enteras.

Solver utiliza el método de Ramificación y Acotamiento (Branch and Bound) para resolver problemas de MIP. Sus limitaciones de velocidad lo hacen conveniente sólo para problemas con un número pequeño de variables enteras (tal vez de 50 a 100). Este método comienza con la búsqueda de la solución óptima al problema resultante de relajar las restricciones de enteros (PL o PNL). Si en esta solución, las variables de decisión sujetas a restricciones de enteros adoptan valores enteros, no se requiere más trabajo. En caso contrario, si una o más variables enteras tienen soluciones fraccionarias, el algoritmo elige una de estas variables y crea dos nuevos subproblemas en los que el valor de esa variable está sujeto a más restricciones. Estos subproblemas se resuelven y el proceso se repite, hasta que se obtiene una solución que satisfaga todas las restricciones. Es fácil darse cuenta de que se deben probar muchas combinaciones de valores enteros específicos (el número de combinaciones puede aumentar exponencialmente con el tamaño del problema) y que cada combinación requiere la resolución de un problema de optimización lineal o no lineal.

Por otro lado, los algoritmos genéticos del método evolutivo, son capaces de generar aleatoriamente soluciones que satisfagan las restricciones de enteros. Tales soluciones inicialmente estarán, por lo general, lejos del óptimo. Sin embargo, el algoritmo transformará las soluciones existentes en otras nuevas, a través de operadores genéticos como la mutación y el crossover entero, que continuarán cumpliendo las restricciones de enteros y además podrán tener valores mejores de la función objetivo. Este proceso se repite hasta que se cumpla el criterio de parada. En general, estos métodos no son capaces de probar la optimalidad de la solución.

La elección de un método de resolución está sujeta a una serie de condicionantes que se pasan a analizar a continuación. En primer lugar, el método lineal se descarta ya que el problema está fuera de su ámbito de aplicación, debido a la no linealidad de las funciones implicadas.

Por otro lado, las incógnitas de nuestro problema son las opciones de reparación para cada uno de los componentes de todos los puentes de la red. Dichas opciones de reparación se han codificado con valores numéricos enteros de cero a tres (0-3) de forma que las variables del problema han de satisfacer estas restricciones. Esto implica que el problema a resolver se encuentra dentro de la programación entera. Si nos decantamos por el método no lineal, para solventar las restricciones de enteros, se aplicará el método de ramificación y acotamiento, que conlleva la resolución consecutiva de múltiples subproblemas no lineales no restringidos, con un considerable aumento del tiempo consumido y la memoria necesaria. En contraposición, el método evolutivo es capaz de resolver el problema de variables enteras sin ninguna consideración adicional.

También se ha de tener en cuenta que la estructura del objetivo a maximizar (se establece mediante la ratio B/C, E. 5.6) y las funciones utilizadas en su definición.

$$FO = \frac{B}{C} = \frac{B}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^7 C_{ij}(x_{ij})}$$

E.5.6

Los costes directos de cada posible actuación van ligados al tipo de reparación a ejecutar sobre cada componente del puente. Queda claro, entonces, que al definir la función de costes para un componente cualquiera tendremos una expresión de la forma:

$$C_{ij}(x_{ij}) = \begin{cases} C_{0j} \times D_{ij} & \text{si } x_{ij} = 0 \\ C_{1j} \times D_{ij} & \text{si } x_{ij} = 1 \\ C_{2j} \times D_{ij} & \text{si } x_{ij} = 2 \\ C_{3j} \times D_{ij} & \text{si } x_{ij} = 3 \end{cases}$$

donde:

C_{ij} : Coste de reparación del elemento j del puente i.

x_{ij} : Opción de reparación a ejecutar sobre el elemento j del puente i.

C_{kj} : Coste unitario de reparación del elemento j considerando una reparación tipo k.

D_{ij} : Dimensiones del elemento j del puente i (superficie, longitud o número total).

Si representamos gráficamente un ejemplo de la función considerada, figura 5.15, se puede observar que se trata de una función discontinua. Esto condiciona el uso del método no lineal, ya que el algoritmo necesita obtener las derivadas parciales del objetivo (vector gradiente), mientras que la función objetivo de nuestro problema no es diferenciable. Por lo tanto, se concluye que el método no lineal no es de aplicación al caso que nos ocupa. Por el contrario, el método evolutivo sólo precisa conocer el valor de la función de aptitud (función objetivo) y, por tanto, resulta adecuado para resolver el proceso de optimización a Nivel de Puente.

Figura 5.15. Ejemplo de función de costes directos.

5.5.3. Resultados 1^{er} nivel

En las figuras 5.16.a y 5.16.b se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos en la optimización a Nivel de Puente para un año determinado. A continuación se procede a describir de forma exhaustiva la información proporcionada por el modelo a este nivel:

- Columna B: Identificador de cada puente de la red.
- Columnas C-I: Se recogen los índices de estado (IEC) de los siete (7) componentes considerados, obtenidos mediante la campaña de inspecciones realizada.
- Columnas J-P: Registran la solución del problema planteado, es decir, las opciones de reparación seleccionadas para cada componente en el año objeto de análisis.
- Columnas Q-W: Incluyen los costes directos asociados a las estrategias de reparación establecidas.

- Columnas X-AD: Se pueden consultar los valores de los índices de estado de los componentes (IEC) tras la reparación (se considera que las reparaciones se ejecutan en el año estudiado).
- Columnas AE-AK: Se ordenan los índices de estado de los componentes (IEC), suponiendo que no se efectúa ninguna reparación en el año de referencia.
- Columnas AL y AM: Se pueden consultar los índices de estado de los puentes (IEP) antes y después de la reparación propuesta.
- Columnas AN y AP: Se listan los beneficios, los costes y el ratio B/C asociados a cada una de las estrategias seleccionadas.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK		
3																																							
4																																							
5																																							
6																																							
7																																							
8																																							
9																																							
10																																							
11																																							
12																																							
13																																							
14																																							
15																																							
16																																							
17																																							
18																																							
19																																							
20																																							
21																																							
22																																							
23																																							
24																																							
25																																							
26																																							
27																																							
28																																							
29																																							
30																																							

Figura 5.16.a. Estructura de resultados de la optimización a Nivel de Puente. Implementación para un ejemplo de período de planificación de cinco años.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP
3																							
4																							
5																							
6																							
7																							
8																							
9																							
10																							
11																							
12																							
13																							
14																							
15																							
16																							
17																							
18																							
19																							
20																							
21																							
22																							
23																							
24																							
25																							
26																							
27																							
28																							
29																							

Figura 5.16.b. Estructura de resultados de la optimización a Nivel de Puente.

5.6. Optimización a Nivel de Red

La literatura específica describe la aplicación de diferentes técnicas para la optimización a Nivel de Red, entre ellas destacan los métodos de priorización (índices de suficiencia, niveles de servicio o análisis B/C), la optimización matemática y la inteligencia artificial.

En este estudio se diseña una aplicación que tiene la función de proporcionar una herramienta de ayuda a los gestores que deben optimizar el proceso de asignación de fondos en una red de puentes y elaborar una planificación de las reparaciones a llevar a cabo durante el período programado.

Las opciones de reparación de los componentes de cada puente, establecidas a Nivel de Puente, son, por tanto, conocidas y sirven para proporcionar la entrada de datos necesarios para la optimización a Nivel de Red. Ahora las variables del problema son los años seleccionados para ejecutar las reparaciones en cada puente. Tal y como se muestra en la figura 5.17, se utiliza una codificación mediante variables binarias, que precisan si cada puente se reparará o no en un año determinado.

Dado un conjunto de soluciones factibles a Nivel de Red, las opciones de reparación seleccionadas a Nivel de Puente, los costes asociados y los estados de cada puente tras la reparación resultan automáticamente conocidos.

		PERÍODO DE PLANIFICACIÓN				
		Año 1	Año 2	Año 3	...	Año m
NIVEL DE RED	Puente 1	B ₁₁	B ₁₂	B ₁₃	...	B ₁₅
	Puente 2	B ₂₁	B ₂₂	B ₂₃	...	B ₂₅
	Puente 3	B ₃₁	B ₃₂	B ₃₃	...	B ₃₅
	.	.	.	.	...	.
	.	.	.	.	...	.
	.	.	.	.	...	.
	Puente n	B _{n1}	B _{n2}	B _{n3}	...	B _{n5}

Codificación binaria de las variables de decisión:
 $B_{ij} = 0$ La reparación del puente i no se ejecutará el año j .
 $B_{ij} = 1$ La reparación del puente i se ejecutará el año j .
 Se limitan las actuaciones a un máximo de una reparación por puente en todo el período de planificación. (1)

$$\sum_{j=1}^m B_{ij} \leq 1 \text{ para todo } i \text{ (1)}$$

Figura 5.17. Esquematzación de la optimización a Nivel de Red.

A este nivel, para resolver el problema de optimización, se debe obtener el máximo de la función objetivo que se define tal y como sigue:

$$FO_{NR} = \text{Max}(IER_m + B_{CU} \times 10^{-5})$$

$$IER_m = \frac{\sum_{i=1}^n IER_i}{n}$$

$$IER_i = \frac{\sum_{j=1}^m IEP_{ij}}{m}$$

donde:

n: Número de años del período de planificación.

m: Número de puentes de la red.

IER_m: Promedio del índice de estado de la red en el período de planificación.

IER_i: Índice de estado de la red en el año i:

IEP_{ij}: Índice de estado del puente j de la red, en el año i.

B_{CU}: Beneficio en términos de reducción de costes de usuario.

Una vez fijada la función objetivo para el análisis de red, las restricciones a considerar son las siguientes:

- El valor del índice de estado de todos los puentes, a lo largo del período de planificación, debe ser igual o superior a un valor mínimo definido por el usuario.

$$IEP_{ij} \geq IEP_{min}$$

- El valor del índice de estado de todos los componentes, de todos los puentes de la red, a lo largo del período de planificación, debe ser igual o superior a un valor mínimo definido por el usuario:

$$IEC_{ijk} \geq IEC_{min}$$

- El coste de reparación en la red en cada año del período de planificación debe ser igual o inferior al presupuesto disponible para ese año:

$$C_R(i) \leq P_i$$

- Las incógnitas del problema de optimización vienen representadas mediante variables binarias, por tanto se ha de establecer la restricción de que sólo están definidas para valores de cero o uno (0/1).

- Se contempla un máximo de una actuación por puente y período de planificación, de manera que se ha de cumplir:

$$\sum_{j=1}^m B_{ij} \leq 1$$

donde:

B_{ij} : Variable de decisión asociada al puente i en el año j . Si su valor es nulo no se realizará la reparación en ese año, por el contrario, si su valor es 1 la reparación se ejecutará en el año j . Nótese que se contempla la posibilidad de las condiciones relativas del puente permitan no actuar sobre él.

5.6.1. Implantación 2º nivel

La resolución del problema de optimización a Nivel de Red se ha implementado en una hoja de cálculo del software comercial Microsoft Excel, de forma que queda ligada al resto de módulos diseñados con los que intercambia información. En la figura 5.18 se muestra la apariencia que ofrece la interfaz del análisis a Nivel de Red, en la que se facilita la siguiente información:

- A: Identificador del puente.
- B: Planificación de actuaciones en la red durante el período considerado.
- C: Restricción que limita el máximo número de reparaciones por período de estudio.
- D: Evolución del índice de estado (IEP) de todos los puentes a lo largo del análisis.
- E: Costes anuales de reparación previstos.
- F: Botón de comando instalado para facilitar el manejo del modelo al usuario. Mediante una rutina en VB para aplicaciones se ejecuta el modelo de optimización aplicando todas las restricciones de forma automática.
- G: Limitaciones de presupuesto anuales.
- H: Evolución del índice de estado de la red (IER) a lo largo del período.
- I: Valores mínimos aceptables para los índices de estado de los componentes (IEC) y del puente (IEP).
- J: Función objetivo a maximizar (FO).
- K: Costes globales de reparación y presupuesto disponible para el período.

Figura 5.18. Interfaz de usuario de la optimización a Nivel de Red.
Implementación para ejemplo de período de planificación de 5 años

5.6.2. Técnicas de optimización 2º nivel

Tal y como sucedía con la optimización a Nivel de Puente, sobre las incógnitas del problema se imponen restricciones de valor entero ya que, en este caso, se ha utilizado codificación binaria para representar las opciones de actuación en cada año. Ante la diatriba de elegir entre la técnica de ramificación y acotación y el método evolutivo de Solver, se elige el algoritmo genético, que ha producido buenos resultados a Nivel de Puente y que, además, es capaz de resolver el problema entero de forma natural y sin añadir otras consideraciones de ningún tipo. Por el contrario, el algoritmo Branch and Bound crea una serie de subproblemas no lineales relajados cuya resolución sucesiva conducirá a la solución del problema no lineal con restricciones enteras. Como consecuencia es previsible un consumo de tiempo y memoria que crece exponencialmente con el tamaño del problema. De todo lo expuesto, se concluye que la técnica de resolución más adecuada, al igual que en el Nivel de Puente, es el método evolutivo.

5.7. Informes de resultados

Para la explotación de resultados del modelo de optimización se diseña un módulo que proporciona diversos informes en los que se puede seleccionar la información que se desea consultar mediante filtros. Para ello se utilizan las tablas y gráficos dinámicos que se describen a continuación:

- IEP: Se puede consultar la evolución de los índices de estado de los puentes (IEP) a lo largo del período de planificación, se puede filtrar la información por año y por puente. En las figura 5.19 y 5.20 se muestran dos ejemplos.

BCR	Puente N°						
Año	4	5	6	7	8	Promedio	
2015	5.2	5.3	4.4	5.0	5.3	5.0	
2016	5.1	5.1	4.1	5.0	5.2	4.9	
2017	5.1	4.9	3.9	5.0	5.1	4.8	
2018	5.0	4.8	3.7	4.9	5.0	4.7	
2019	5.0	4.7	3.5	4.9	4.9	4.6	
Promedio	5.1	5.0	3.9	5.0	5.1	4.8	

Figura 5.19.- Tabla de evolución de IEP.

Figura 5.20.- Gráfico de evolución de IEP.

- IEC: Se puede consultar la evolución de los índices de estado de los componentes (IEC) a lo largo del período de planificación, se puede filtrar la información por año, por puente y por componente. En las figuras 5.21 y 5.22 se muestran dos ejemplos.

ECR	Puente N°								
	4			5			6		
Año	Apoyos	Juntas	Subestructura	Apoyos	Juntas	Subestructura	Apoyos	Juntas	Subestructura
2015	7.3	6.1	4.5	4.5	3.5	5.5	5.6	4.4	3.5
2016	7.1	6.1	4.4	4.1	3.4	5.3	5.3	4.0	3.3
2017	7.0	6.0	3.2	3.7	3.2	6.3	5.1	3.7	3.1
2018	7.0	6.0	4.2	3.4	3.2	5.0	4.9	3.5	3.1
2019	6.9	6.0	4.1	3.3	3.1	4.8	4.7	3.3	3.1
Promedio	7.1	6.0	4.1	3.8	3.3	5.4	5.1	3.8	3.2

Figura 5.21.- Tabla de evolución de IEC.

Figura 5.22.- Gráfico de evolución de IEC.

- Costes: Se pueden consultar los costes totales a lo largo del período de planificación, se puede filtrar la información por año, por puente y por componente. En las figuras 5.23 y 5.24 se muestran dos ejemplos.

5.8. Resumen, resultados y aspectos originales

En este capítulo se describe el modelo de optimización propuesto para SGP en redes locales de carreteras. El objetivo perseguido es la elaboración de un modelo que permita dotar de un sistema de soporte en la toma de decisiones relacionadas con las operaciones de mantenimiento y reparación a acometer en la gestión de una red de puentes.

Año	(Todas)			
Costes	Puente N°			
Categoría	1	6	9	Total
Tablero	0 €	88.235 €	0 €	88.235 €
Pavimento	12.944 €	6.667 €	11.765 €	31.375 €
Juntas	57.678 €	19.608 €	0 €	77.286 €
Apoyos	69.213 €	11.765 €	0 €	80.978 €
Superestructura	0 €	0 €	0 €	0 €
Subestructura	0 €	0 €	0 €	0 €
Acabados	46.142 €	7.843 €	7.843 €	61.828 €
Total	185.977 €	134.118 €	19.608 €	339.702 €

Figura 5.23.- Tabla de costes directos de reparación.

Figura 5.24.- Gráfico de costes de reparación.

La optimización de las estrategias de mantenimiento, tradicionalmente, se ha abordado mediante dos niveles de estudio inconexos:

- Nivel de puente: Estudia la definición de la estrategia óptima de reparación en cada puente.
- Nivel de red: Prioriza la inversión en cada puente. Se trata de ubicar el momento más conveniente para la actuación en cada estructura, a lo largo del período de planificación.

La presente propuesta es novedosa, ya que plantea una solución integral del problema planteado que resuelve, de forma conjunta, ambos niveles de análisis mediante un proceso de optimización secuencial, de forma que los resultados del nivel de puente se utilizan para obtener la solución al estudio a nivel de red.

Otro punto que conviene hacer notar es que, mediante la aplicación de métodos de optimización evolutivos (Algoritmos Genéticos), se consigue resolver el problema planteado, solventando el estrepitoso fracaso registrado por las técnicas tradicionales de optimización.

Además, se considera que el planteamiento es muy ambicioso en referencia al alcance del análisis. Actualmente, en España, tan sólo se sigue un planteamiento consistente en analizar y registrar el deterioro progresivo de las infraestructuras. De forma que, en todo momento, el técnico tiene la responsabilidad de decidir el momento de acometer la actuación y la definición completa de la misma. El modelo definido integra patrones de predicción del comportamiento que permiten inferir el proceso de deterioro de cada elemento y, en base a ello, propone la reparación más adecuada para cada puente de la red, ubicando, dentro del período de planificación, el mejor momento para acometer la actuación y obteniendo, por tanto, una planificación y un presupuesto estimado para el período de análisis establecido por el usuario.

En definitiva, se trata de un modelo que ofrece un enfoque global del problema y que proporciona soporte al tradicional criterio ingenieril del técnico involucrado en las tareas de gestión de estructuras.

El vehículo a través del que se implementa la aplicación es una plataforma de uso universal como Microsoft Excel, que proporciona el soporte necesario, de forma que, tras el proceso de optimización doble, se obtiene una propuesta que el técnico puede valorar y modificar, según su propio criterio y experiencia, actualizándose toda la información y resultados de forma instantánea.

La flexibilidad del sistema es una de sus principales características ya que el modelo no impone limitación alguna en cuanto a la planificación. Se da libertad al usuario para definir la duración del período de análisis y es posible considerar cualquier intervalo de tiempo entre propuestas de actuación. Por ejemplo, se podría considerar un período de análisis de seis años, acometiendo tres campañas de reparación bianuales.

En cuanto a las restricciones a imponer a los procesos de optimización, como novedad, se destaca la consideración de las limitaciones lógicas que afectan a los procesos constructivos y que racionalizan la compatibilidad de las actuaciones sobre distintos elementos.

Dado que todas las infraestructuras no tienen la misma importancia dentro de una red, es necesario ponderar el impacto del estado de cada una de ellas en el funcionamiento global. Para ello, se define un sistema de jerarquía de cada puente dentro de la red que, considerando varios parámetros, nos proporciona un índice en función de su importancia relativa. Esto nos permite realizar una diferencia del tratamiento de los distintos puentes, exigiendo un mejor estado de conservación en las infraestructuras más importantes y cuyo fallo produciría unos mayores efectos negativos.

Con respecto al tratamiento realizado en la estimación de costes se consideran los gastos de gestión de la red de puentes, constituidos por los costes de implantación del SGP y los de operación asociados a las campañas de inspección necesarias. Dichos costes son, sistemáticamente, ignorados en las diferentes propuestas técnicas revisadas, no siendo en absoluto, despreciables dentro de la inversión general a realizar.

Avanzando en este sentido, la propuesta se aleja del planteamiento tradicional de inspecciones a llevar a cabo de forma periódica, independientemente del estado de las estructuras. Dado que, como se ha visto, los costes asociados a la inspección pueden resultar considerables, se establece un planteamiento de mejora en el que las inspecciones principales se programan en función de la prognosis del estado de conservación de los distintos componentes y, de forma global, del puente a lo largo del período de planificación. De esta manera, se consigue una optimización de los costes de gestión, mejorando la utilización de los recursos existentes. Para ello, se propone como criterio programar una inspección principal cuando se cumpla alguna de las siguientes condiciones:

- El estado de conservación del puente alcance una valoración inferior a cinco. $IEP \leq 5$.
- El índice de estado de cualquiera de los componentes estructurales principales alcance un valor inferior a cuatro. $IEC_p \leq 4$.

Como mejora de lo planteado en principio, se propone la conversión de la función objetivo, considerada en el problema de optimización, de discreta a continua. Para ello se transforman las opciones de reparación de valor discreto en funciones continuas, que se establecen como proporción o porcentaje de la actuación global sobre los diferentes elementos. La consecuencia inmediata es la posibilidad de aplicar métodos de optimización no lineales a la resolución del problema. Para ello, se recomienda una estrategia híbrida, de combinación de distintos métodos de optimización, consistente en la aplicación sucesiva de:

1. Técnicas evolutivas. Mediante el recurso de los algoritmos genéticos, se obtiene una primera propuesta de solución que, en general, no será óptima, al carecer esta metodología de ese concepto. Por tanto, obtenemos una aproximación que, si bien sabemos que será buena, nunca tendremos la garantía de que se trate del óptimo buscado.
2. Técnicas tradicionales no lineales: A partir de la solución obtenida en primera iteración, mediante métodos de optimización evolutivos, se utiliza la teoría de optimización no lineal para tratar de mejorar la propuesta o, en caso contrario, comprobar que se satisfacen las condiciones del óptimo buscado.

En última instancia se propone una modificación del sistema de valoración de las componentes. Dicha propuesta tiene como objetivo una mejor representación de la importancia relativa de los componentes estructurales principales frente a los auxiliares o secundarios. Las reparaciones o actuaciones sobre plataforma, superestructura y subestructura tienen un coste directo mucho más elevado que sobre el resto de elementos. Sin embargo, dada su alta significación dentro de la estructura, el impacto de estas actuaciones sobre la vida útil global del puente es muy elevado. Para reflejar este aspecto, de forma adecuada, se propone la siguiente modificación a lo expuesto en el apartado correspondiente:

Elemento	Factor Importancia (0-10)	Peso (W_i)
Plataforma	10	0,238
Pavimento	3	0,071
Juntas	3	0,071
Apoyos	3	0,071
Superestructura	10	0,238
Subestructura	10	0,238
Acabados	3	0,071
Total	42	1,000

Tabla 5.9.- Modificación propuesta en el sistema de valoración.
Pesos de los componentes

CAPÍTULO 6

APLICACIÓN DEL MODELO

SGP-CLM

6.1. Definición de la campaña de campo

Para proceder a la aplicación del modelo teórico del sistema de gestión de puentes desarrollado en anteriores capítulos, se ha implementado en un caso real de red, dentro de la presente investigación.

Aprovechando el conocimiento de años de trabajo en asistencias técnicas y proyectos relacionados con la red de carreteras gestionada por la Dirección General de Carreteras de la Consejería de Fomento de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha, y por otro lado, la colaboración de sus técnicos, se han introducido en el modelo específico para este trabajo, SGP-CLM, una muestra de **20 puentes de la red autonómica de la provincia de Albacete**.

De manera global, esta administración gestiona un total de 8.676,313 km. de carreteras, que supone un porcentaje representativo, por encima del 5% de los kilómetros existentes en España, en el entorno de 165.361 (2013). La distribución por categorías y provincias se refleja en la siguiente imagen:

CATEGORÍA	ALBACETE	CIUDAD REAL	CUENCA	GUADALAJARA	TOLEDO	TOTAL
BÁSICA ALTA CAPACIDAD	0,000	80,958	0,000	9,260	145,510	235,728
BÁSICA	469,524	364,885	432,770	303,270	279,495	1849,944
COMARCAL	962,901	1227,499	1152,759	1060,620	1222,455	5626,234
LOCAL	143,434	95,267	53,701	60,690	317,507	670,599
TRAVESÍAS	33,740	19,980	41,474	9,421	70,973	175,588
RAMALES	3,023	16,312	38,107	27,804	32,974	118,220
TOTAL	1612,622	1804,901	1718,811	1471,065	2068,914	8676,313

Figura 6.1. – Resumen Red Autonómica de Carreteras de Castilla-La Mancha, 2015

Las principales particularidades de esta red son:

- Alto porcentaje de carreteras con calzada única, convencionales.
- Intensidad de tráfico media-baja, con categorías de tráfico pesado que en ningún caso sobrepasan la T2 (entre 800 y 2000 veh./día).
- Intersecciones entre vías de igual o inferior categoría materializadas con soluciones a nivel, tipo glorieta, T simple o T con carril central para giros a izquierda.
- Intersecciones con vías de mayor categoría materializadas con pasos a distinto nivel, con la particularidad de que en la mayoría de los casos la gestión de estos puentes se realiza por la administración de la carreteras de mayor categoría, por lo que muchas estructuras de cierta entidad no forman parte de la labor de gestión de la Consejería de Fomento de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha.

- Utilización de estructuras para casos muy específicos de cruce con cauces, barrancos, cañadas, infraestructuras especiales, etc.
- Red relativamente “actual”, al partir de la redistribución de la división territorial realizada en España en 1978.
- Proceso de ensanche y acondicionamiento de gran parte de los kilómetros gestionados, llevado a cabo desde la incorporación de las autonomías, que pasaron a gestionar antiguas vías del Ministerio de Obras Públicas.

Por su parte, otras características relacionadas con las estructuras existentes y con el proceso de gestión previo nos han influido a la hora de desarrollar el modelo específico de gestión de puentes:

- Inexistencia total de datos de inventario e inspecciones de puentes a partir de los cuales desarrollar la herramienta de gestión.
- Gestión directa llevada a cabo por los técnicos y vigilantes de los Servicios Periféricos de cada una de las provincias, sin incorporación de apoyos externos ni contratos específicos para campañas de actualización de inventarios e inspecciones.
- Densidad de estructuras por kilómetro de red en valores por debajo de 1 cada 10 km.
- Estructuras básicas, principalmente de tableros prefabricados de vigas-losa, vanos simples y luces máximas por debajo de 30 m en todos los casos y medias en torno a 20 m.
- Integración de algunas obras de drenaje en el sistema de gestión, como consecuencia de la difícil limitación entre puente y ODT.
- Orografía llana en gran parte de la provincia de Albacete, lo que conlleva disposición de estribos y pilas de alturas reducidas, por debajo de los 8,00 m. en la mayoría de los casos.
- Existencia de itinerarios alternativos de características similares a la red afectada por la hipotética puesta fuera de servicio de alguna de los puentes.

Todo ello, junto con la interpretación de los presupuestos anuales destinados a labores de conservación y mantenimiento, nos lleva a clasificar la **red** como de **escasos recursos en su gestión**. De este modo, la aplicación de diversos modelos existentes en el mercado, ideados para redes principales con recursos y medios humanos adecuados, no podrían implementarse directamente sobre este tipo de redes, sin acometer las calibraciones y restricciones pertinentes.

La red autonómica de la provincia de Albacete se divide en tres zonas dirigidas por sus correspondientes jefes de área, con un vigilante asignado a su vez, que comparte las labores de gestión ordinaria con el seguimiento de las actuaciones de su zona, por lo que plantea una tarea difícilmente abordable.

Figura 6.2. – Zonificación red autonómica provincia Albacete

Dentro de esta distribución, se ha intentado seleccionar una muestra de puentes que recoja las diversas problemáticas de cada zona, desde las zonas con una orografía más llana (zonas 1 y 2) hasta la zona más complicada (zona 3), que incorpora la Sierra del Segura y la de Alcaraz. La muestra de 20 puentes incorporados en el sistema de gestión de puentes tiene un peso representativo respecto de la totalidad de estructuras gestionadas en la red autonómica de la provincia de Albacete, que dispone de un parque de no más de 60 puentes, por lo que estaría en torno a una tercera parte de los elementos gestionados, permitiéndonos extraer tendencias y conclusiones de aplicación extrapolable al resto de la red.

Se incorpora, a continuación, el listado de puentes introducidos en la herramienta de gestión, abarcando las tipologías características de la red, aportando datos referentes a:

- Código estructura, carretera, punto kilométrico
- Principales características geométricas (ancho, longitud total, luz máxima, etc.)
- Tipología y materiales constitutivos
- Existencia de juntas y/o apoyos
- Vista general del puente

SGP-CLM 1.0 LISTADO PUENTES INTRODUCIDOS EN EL SISTEMA DE GESTIÓN

Cód. Estructura	Anchura (m)	Longitud (m)	Material plataforma	Material superestructura	Material subestructura	Tipo pavimento	Tipo de junta	Tipo apoyo	Nº Juntas	Nº Apoyos	Comentarios	Vista general
CM-0313-0060+200	27,50	8,60	Hormigón armado prefabricado	Hormigón armado prefabricado	Hormigón armado prefabricado	2,00 m. relleno tierras+MBC	No existen	No procede	0	0	Cajón simple de dimensiones interiores 5,50x8,00 m, y longitud de desarrollo 27,50 m con aletas módulos prefabricados
CM-0313-0062+900	8,00	27,00	Prelosa pretensada prefabricada+hormigón armado "in situ"	Hormigón pretensado prefabricado	Hormigón armado "in situ"	MBC	Betún modificado	Neopreno zunchado	2	4	Tablero vigas artesa+losa, 1 vano de luz 26,20 m. prelosas pretensadas+ losa in situ. Estribos flotantes de hormigón in situ con muros frontales y acompañamiento de tierra reforzada
CM-0332-0019+040	20,00	6,80	Hormigón armado prefabricado	Hormigón armado prefabricado	Hormigón armado prefabricado	2,50 m. relleno tierras+MBC	No existen	No procede	0	0	Cajón doble de dimensiones interiores 3,00x2,50 m, y longitud de desarrollo 20,00 m con aletas "in situ"
CM-0332-0044+400	14,00	18,75	Prelosa pretensada prefabricada+hormigón armado "in situ"	Hormigón pretensado prefabricado	Hormigón armado "in situ"	MBC	Elastómero armado	Neopreno zunchado	2	12	Tablero vigas doble T+losa, 1 vano de luz 18,00 m. prelosas pretensadas+ losa in situ. Estribos cerrados de hormigón in situ con muro frontal hormigón armado y protecciones con muros mampostería
CM-0332-0049+500-1	13,80	27,00	Prelosa pretensada prefabricada+hormigón armado "in situ"	Hormigón pretensado prefabricado	Hormigón armado "in situ"	MBC	Elastómero armado (E-1)/Betún modificado (E-2, reparada recientemente, inicialmente era igual que la de E-1)	Neopreno zunchado	2	10	Tablero vigas doble T+losa, 1 vano de luz 26,20 m. prelosas pretensadas+ losa in situ. Estribos hormigón in situ con aletas y muro frontal tierra reforzada
CM-0332-0049+500-2	40,00	11,80	Hormigón armado "in situ"	Hormigón armado "in situ"	Hormigón armado "in situ"	0,50 m. relleno tierras+MBC	No existen	No procede	0	0	Cajón doble de hormigón armado "in situ" de dimensiones interiores 5,00x5,00 m. y desarrollo 40,00 m, con aletas de acompañamiento
CM-0412-0167+350	10,70	37,00	Prelosa pretensada prefabricada+hormigón armado "in situ"	Hormigón pretensado prefabricado	Hormigón armado "in situ"	MBC	Elastómero armado	Neopreno zunchado	2	24	Tablero vigas doble T+losa, 2 vanos de luces 18,00 m.Prelosas pretensadas, losa in situ. Estribos cerrados de hormigón in situ y pila central muro rectangular con dintel martillo
CM-0412-0268+000	16,40	16,40	Hormigón armado "in situ"	Hormigón armado "in situ"	Hormigón armado "in situ"	MBC	No existen	No procede	0	0	Pórtico de hormigón armado "in situ" de dimensiones interiores 15,00x3,00 m. y desarrollo 16,00 m, con aletas de acompañamiento
CM-0412-0272+800	9,00	27,00	Prelosa pretensada prefabricada+hormigón armado "in situ"	Hormigón pretensado prefabricado	Hormigón armado "in situ"	MBC	Elastómero armado	Neopreno zunchado	2	4	Tablero vigas artesa+losa, 1 vano de luz 26,20 m. prelosas pretensadas+ losa in situ. Estribos flotantes de hormigón in situ sin muros de acompañamiento
CM-3106-0043+900	7,20	20,50	Losa hormigón armado "in situ" sobre alas de vigas	Hormigón pretensado prefabricado	Hormigón armado "in situ"	MBC	Junta marcada naturalmente, es decir, inexistente, se ha ido marcando, y no se ha sellado con betún modificado	Neopreno zunchado	2	12	Tablero vigas doble T+losa, 1 vano de luz 19,70 m. losa in situ sobre alas de viga. Estribos cerrados hormigón in situ
CM-3201-0088+600	6,00	30,00	Prelosa pretensada prefabricada+hormigón armado "in situ"	Hormigón pretensado prefabricado	Hormigón armado "in situ"	MBC	Betún modificado	Neopreno zunchado	2	4	Monocajón de 1 vano de 29,20 m. de luz, prelosas para vuelos de sección rematadas con hormigón armado "in situ". Estribos cerrados de hormigón armado protegidos con escollera
CM-3203-0032+230	11,00	9,50	Losa hormigón armado "in situ" sobre alas de vigas	Hormigón pretensado prefabricado	Hormigón armado "in situ"	MBC	Elastómero armado	Neopreno zunchado	2	36	Tablero vigas doble T+losa, 1 vano de luz 9,00 m. losa in situ sobre alas de viga. Estribos flotantes con muro frontal de módulos de contrafuertes prefabricados de hormigón armado
CM-3213-0028+250	9,70	12,70	Prelosa pretensada prefabricada+hormigón armado "in situ"	Hormigón pretensado prefabricado	Hormigón armado "in situ"	MBC	Elastómero armado	Neopreno zunchado	2	8	Tablero vigas doble T+losa, 1 vano de luz 12,00 m. prelosas pretensadas+ losa in situ. Estribos hormigón in situ con aletas y muro frontal hormigón prefabricado
CM-3216-0002+500	8,20	19,50	Prelosa pretensada prefabricada+hormigón armado "in situ"	Hormigón pretensado prefabricado	Hormigón armado "in situ"	MBC	Elastómero armado	Neopreno zunchado	2	8	Tablero vigas doble T+losa, 1 vano de luz 19,00 m. prelosas pretensadas+ losa in situ. Estribos hormigón in situ
CM-3218-0010+400	10,60	18,60	Prelosa pretensada prefabricada+hormigón armado "in situ"	Hormigón pretensado prefabricado	Hormigón armado "in situ"	MBC	Elastómero armado	Neopreno zunchado	2	10	Tablero vigas doble T+losa, 1 vano de luz 18,00 m. prelosas pretensadas+ losa in situ. Estribos cerrados de hormigón in situ
CM-3218-0021+400	9,00	58,00	Chapa colaborante encofrado perdido+hormigón armado "in situ"	Hormigón pretensado prefabricado	Hormigón armado "in situ"	MBC	Betún modificado	Neopreno zunchado	2	16	Tablero vigas doble T+losa, 2 vanos de luces 28,00 m. Chapa colaborante encofrado perdido, losa in situ. Estribos cerrados en ladera hormigón in situ y pila central doble fuste cilíndrico con dintel martillo
CM-3222-0011+160	19,30	8,20	Hormigón armado "in situ"	Hormigón armado "in situ"	Hormigón armado "in situ"	2,50 m. relleno tierras+MBC	No existen	No procede	0	0	Cajón de hormigón armado "in situ" de dimensiones interiores 7,00x5,50 m. y desarrollo 19,30 m, con aletas de acompañamiento
CM-3222-0012+730	7,80	16,80	Prelosa pretensada prefabricada+hormigón armado "in situ"	Hormigón pretensado prefabricado	Hormigón armado "in situ"	MBC	Elastómero armado	Neopreno zunchado	2	4	Tablero vigas artesa+losa, 1 vano de luz 16,00 m. prelosas pretensadas+ losa in situ. Estribos flotantes de hormigón in situ con muros frontales y acompañamiento contrafuertes prefabricados de hormigón
CM-3263-0008+700	6,00	5,50	Prelosa pretensada prefabricada+hormigón armado "in situ"	Arco semicircular de hormigón "in situ"	Hormigón "in situ"	MBC	No existen	No procede	0	0	Puente bóveda de hormigón de diámetr interior 4,50 m sobre muros verticales. Típanos y aletas de acompañamiento de mampostería. Ampliación de ancho mediante losa volada prelosas+HA.
CM-3263-0011+500	6,00	4,00	Prelosa pretensada prefabricada+hormigón armado "in situ"	Arco semicircular de hormigón "in situ"	Hormigón "in situ"	MBC	No existen	No procede	0	0	Puente bóveda de hormigón de diámetr interior 3,00 m sobre muros verticales. Típanos y aletas de acompañamiento de mampostería. Ampliación de ancho mediante losa volada prelosas+HA.

La ubicación de cada una de las estructuras se muestra en el siguiente esquema:

Figura 6.3. – Ubicación estructuras introducidas en el SGP

6.2. Aplicación del SGP-CLM

Como aplicación práctica del trabajo, hemos introducido los datos de la campaña de campo anteriormente definida dentro del sistema de gestión de puentes específicamente elaborado para el caso de redes locales de escasos recursos, como es el caso de la Red Autonómica de Carreteras de la Comunidad de Castilla-La Mancha, respondiendo, de esta manera, las siglas completas al caso particular en el que hemos implementado nuestra herramienta ***Sistema de Gestión de Puentes de Castilla-La Mancha (SGP-CLM)***.

No perdiendo de vista en ningún momento que se trata de un trabajo de ingeniería civil, no de computación ni de sistemas informáticos, hemos procedido a desarrollar el sistema bajo un entorno de software sencillo y unas bases de programación asequibles, pues se trata, como hemos señalado, de aplicar los conceptos del desarrollo de un SGP partiendo de la inexistencia total de datos, llegando a entrar en

materias de optimización, principal fuente de discusión e investigación en el estado actual del conocimiento. Por ello, se utilizaron versiones autorizadas para uso no comercial de Microsoft Excel, como núcleo de bases de datos de inventarios e inspecciones, procediendo a potenciar dicha herramienta con aplicaciones de programación básica como Visual Basic y matemáticas como el complemento Solver.

Todo ello, desarrollando los conceptos teóricos y criterios reflejados en los anteriores capítulos, nos ha llevado a la materialización de una herramienta de valor simplemente académico, pero que podría ser el embrión, con los estudios y experimentaciones necesarias, de futuros sistemas de gestión de puentes aplicados sobre redes locales de escasos recursos, similares al caso particular sobre el que se ha aplicado.

De manera general, el **SGP-CLM cuenta con cuatro módulos principales**, que responden al proceso lógico objeto de la exposición de la presente investigación; en concreto:

- **Módulo 1.- Inventario**
- **Módulo 2.- Inspecciones**
- **Módulo 3.- Optimización de estrategias de mantenimiento**
- **Módulo 4.- Informes del proceso**

Figura 6.4. – Menú de inicio herramienta SGP-CLM

El primer módulo, caracteriza mediante los parámetros geométricos, tipológicos y constitutivos los puentes que forman parte de la red estudiada. El arranque de toda creación de un sistema de gestión, dado por pre-existente en muchas ocasiones, con un grado de desarrollo muy por debajo de lo esperable en países desarrollados como España, más aún al tratarse de redes autonómicas o locales. Los resultados de la toma de datos sobre la muestra seleccionada para el contraste práctico se incorporan en el **Anexo B “Fichas de Inventario”**.

En lo que respecta a las inspecciones, segundo de los módulos, aprovechando la campaña para la realización del inventariado, como suele suceder en redes con una ausencia total de datos previos, se han realizado en paralelo ambos trabajos durante el periodo de octubre de 2014 a mayo de 2015. Se ha procedido según los criterios y sistemática planteada en el correspondiente capítulo, reflejando los resultados y valoraciones del estado de condición por componentes y general de cada puente en el **Anexo D “Fichas de Inspección”**.

A partir de la aplicación de los filtros necesarios dentro de los módulos 1 y 2, obtendremos una jerarquización por “condición de crítico” de los puentes de la red, que determina unas condiciones de contorno a imponer dentro del tercer módulo de optimización de estrategias de mantenimiento. Queda justificada su elaboración dentro del capítulo 3 del presente documento, reflejando los valores obtenidos dentro de la aplicación práctica a la muestra de red estudiada dentro del **Anexo C “Aplicación de criterios condición de crítico”**.

Por su parte, el **Módulo 3** plantea una propuesta justificada de actuación, utilizando técnicas matemáticas de optimización mediante métodos evolutivos, de cara a llevar a cabo una estrategia de mantenimiento que permita maximizar el beneficio (estado de condición de la red de puentes) frente a los costes, tanto directos (costes de reparación) como indirectos (producidos al usuario). Se cuenta con la implementación del modelo de deterioro calibrado específicamente con los datos obtenidos de las propias inspecciones de la muestra de la red, bajo un doble análisis envolvente de los sistemas de cadenas de Markov y una perspectiva empírico-determinista. La discusión y descripción de la propuesta técnica queda plasmada dentro del capítulo 5 reflejando las observaciones, recomendaciones, conclusiones y líneas de investigación, dentro de los apartados de análisis de resultados obtenidos en su aplicación a la red estudiada que se desarrollan a continuación en los siguientes apartados del presente capítulo.

Finalmente, y como apoyo a la justificación documental de la toma de decisiones, fin último del sistema de gestión, se incorpora el **Módulo 4** que proporciona los reportes de datos, gráficas, informes, etc. referidos al estado de condición del puente, sus curvas de evolución, el análisis de coste nivel componente, puente y red, con la determinación de las estrategias óptimas para las tareas de conservación y mantenimiento.

6.3. Análisis de resultados obtenidos en la implementación

Con el fin de estudiar la red de puentes sobre la que se ha llevado a cabo la campaña de inspecciones, se introducen en el sistema los insumos necesarios para el análisis. Entre otros datos necesarios para el proceso se consideran: el año de construcción de la estructura, la velocidad permitida en el tramo, la Intensidad Media Diaria (IMD) de la carretera, el crecimiento previsto para el tráfico, el porcentaje de vehículos pesados, la longitud de la ruta alternativa, las dimensiones del puente, las características de los componentes y su cuantificación, el índice de estado del puente mínimo (IEP_{min}) a considerar (según su jerarquía dentro la red), los índices de estado de los componentes (IEC), según la campaña de inspecciones, el índice de estado de cada puente (IEP) en el año cero, el sistema de pesos considerado en la valoración, las tasas anuales de actualización de costes, la vida útil de los componentes para los que se asume un modelo de deterioro lineal y los parámetros de valoración del modelo de costes indirectos (coste del usuario). En la figura 6.5 se muestra la ordenación de toda la información en la pantalla de introducción de datos.

Identificador	Año Const.	Características del Tráfico					Dimensiones		Características de los componentes.										Índices de estado 2014										Sistema de pesos	Tasa actualización
		Vel. perm. (km/h)	IMD 2014	ΔIMD_5 (%)	% VP	L_a (km)	Anchura (m)	Longitud (m)	Mat. Pla.	Mat. Sup.	Mat. Sub.	Tipo Pav.	Tipo Jun.	Tipo Ap.	Nº Jun.	Nº Ap.	IEP_{min}	IEC					IEP							
																		Pla.	Pav.	Jun.	Ap.	Sup.	Sub.	Aca.						
CM0313-0060+00	2.006	50	1.196	1%	36%	0,0	27,50	8,60	Horm.	Horm.	Horm.	Bitu.	Goma	Elasto.	0	0	3	9,0	9,0	9,0	9,0	7,5	6,9	7,6	8,2	Pla.	8	0,20	2015 2,0%	1,02
CM0313-0062+00	2.006	50	1.196	1%	36%	0,0	8,00	27,00	Horm.	Horm.	Horm.	Bitu.	Goma	Elasto.	2	4	3	8,6	7,6	8,5	9,0	9,0	8,6	8,6	8,6	Pav.	4	0,10	2016 2,0%	1,04
CM0332-0019+02	2.001	90	1.779	1%	6%	9,0	20,00	6,80	Horm.	Horm.	Horm.	Bitu.	Goma	Elasto.	0	0	3	8,2	9,0	9,0	9,0	6,8	4,2	7,6	7,4	Jun.	4	0,10	2017 2,0%	1,06
CM0332-0084+00	2.001	40	620	1%	1%	0,0	14,00	18,75	Horm.	Horm.	Horm.	Bitu.	Goma	Elasto.	2	12	3	7,8	7,8	5,4	9,0	7,7	7,3	6,2	7,5	Ap.	6	0,15	2018 2,0%	1,08
CM0332-0049+00-1	2.002	70	935	1%	2%	1,0	13,80	27,00	Horm.	Horm.	Horm.	Bitu.	Goma	Elasto.	2	10	3	6,6	9,0	6,4	9,0	7,5	6,2	6,2	7,3	Sup.	8	0,20	2019 2,0%	1,10
CM0332-0049+00-2	2.002	40	935	1%	2%	1,0	40,00	11,80	Horm.	Horm.	Horm.	Bitu.	Goma	Elasto.	0	0	3	6,2	9,0	9,0	9,0	7,5	7,8	8,4	7,9	Sub.	8	0,20		
CM0412-0167+350	2.000	80	622	1%	17%	18,0	10,70	37,00	Horm.	Horm.	Horm.	Bitu.	Goma	Elasto.	2	24	4	7,4	7,4	6,4	8,2	6,9	7,7	8,2	7,4	Aca.	2	0,05		
CM0412-0269+00	2.008	70	1.565	1%	25%	0,8	16,40	16,40	Horm.	Horm.	Horm.	Bitu.	Goma	Elasto.	0	0	3	7,4	8,4	9,0	9,0	6,9	7,1	8,0	7,8	Total	40	1,00		
CM0412-0272+00	2.008	40	1.222	1%	22%	6,0	9,00	27,00	Horm.	Horm.	Horm.	Bitu.	Goma	Elasto.	2	4	3	7,8	7,2	7,7	8,0	9,0	7,0	8,6	8,0					
CM03106-0043+00	1.979	40	1.453	1%	37%	0,5	7,20	20,50	Horm.	Horm.	Horm.	Bitu.	Goma	Elasto.	2	12	3	5,4	5,2	2,6	5,8	3,3	4,9	6,6	4,7					
CM03201-0084+00	2.003	60	334	1%	1%	0,7	6,00	30,00	Horm.	Horm.	Horm.	Bitu.	Goma	Elasto.	2	4	3	7,4	5,8	4,9	7,9	7,9	8,2	7,6	7,3					
CM03203-0032+00	1.998	40	856	1%	5%	0,5	11,00	9,50	Horm.	Horm.	Horm.	Bitu.	Goma	Elasto.	2	36	3	7,4	5,6	5,9	8,6	8,4	7,3	7,8	7,4					
CM03213-0028+250	1.998	60	453	1%	11%	0,8	9,70	12,70	Horm.	Horm.	Horm.	Bitu.	Goma	Elasto.	2	8	3	5,4	7,4	6,9	9,0	8,4	7,1	8,4	7,4					
CM03216-0002+00	2.011	40	324	1%	13%	6,0	8,20	19,50	Horm.	Horm.	Horm.	Bitu.	Goma	Elasto.	2	8	3	7,4	5,0	6,9	7,9	6,7	8,2	8,4	7,2					
CM03218-0010+00	2.001	90	1.122	1%	5%	0,7	10,60	18,60	Horm.	Horm.	Horm.	Bitu.	Goma	Elasto.	2	10	3	7,4	7,4	6,9	9,0	8,6	8,2	8,0	8,0					
CM03218-0021+00	1.982	40	1.122	1%	5%	20,0	9,00	58,00	Horm.	Horm.	Horm.	Bitu.	Goma	Elasto.	2	16	5	6,2	4,8	3,3	6,6	7,3	3,2	4,8	5,4					
CM03222-0011+00	2.011	90	2.407	1%	7%	0,0	19,30	8,20	Horm.	Horm.	Horm.	Bitu.	Goma	Elasto.	0	0	3	7,8	9,0	9,0	9,0	6,3	6,6	7,6	7,7					
CM03222-0012+00	2.011	40	240	1%	10%	0,9	7,80	16,80	Horm.	Horm.	Horm.	Bitu.	Goma	Elasto.	2	4	3	9,0	5,8	6,9	9,0	9,0	6,3	8,6	7,9					
CM03263-0005+00	2.011	50	150	1%	2%	20,0	6,00	5,50	Horm.	Horm.	Horm.	Bitu.	Goma	Elasto.	0	0	3	7,0	6,2	9,0	9,0	7,1	6,9	7,0	7,4					
CM03263-0011+00	2.011	50	150	1%	2%	20,0	6,00	4,00	Horm.	Horm.	Horm.	Bitu.	Goma	Elasto.	0	0	3	7,0	6,2	9,0	9,0	7,1	7,3	7,0	7,5					

Restricciones

IEC_{min} = 3

IER_{med min} = 5

Vida útil estimada componentes:

Pavimento	Apoyos
Horm. Bitu. 20 15	Ace. Elast. 25 20
Juntas	Acabados
Ace. Goma 20 15	15

Costes de usuario

Coste por accidente = 54,723 €

Coste de operación = 0,254 €/km

Coste tiempo viaje = 15,47 €/h

Figura 6.5. – Pantalla de introducción de datos.

Como se explicó en el Capítulo 4, para definir los modelos de deterioro de los componentes estructurales principales, (plataforma, superestructura y subestructura), se ha adoptado la hipótesis de un proceso de deterioro envolvente de los procesos estocásticos Markovianos y un ajuste exponencial empírico-determinista. Para fijar el valor de los parámetros que gobiernan el proceso de envejecimiento, se realiza un ajuste a las observaciones obtenidas en la campaña de inspecciones llevada a cabo. En la figura 6.6 se representa el ajuste de uno de los modelos asumidos, definido a partir

de la combinación de componentes del modelo combinado. De este análisis se pueden extraer varias conclusiones útiles:

- Naturalmente, existe un número limitado de registros, que se corresponden con la campaña realizada para este trabajo. Esto propicia que existan lagunas en las que no se dispone de información para el análisis. De ahí la necesidad de prolongar en el tiempo, de forma regular, las inspecciones en los puentes de la red, de forma que se alimente al modelo con un volumen de información suficiente, que reduzca el grado de dispersión y mejore la significancia estadística de los resultados. De hecho, lo más riguroso sería categorizar las observaciones en rangos de edad de la estructura, para poder capturar la influencia de este factor. Para este trabajo, y debido al limitado volumen de información disponible, se ha relajado esta condición.
- En todos los modelos de envejecimiento, ajustados a las observaciones de campo, se aprecia un grado de deterioro inicial, que provoca que los componentes correspondientes no partan del valor máximo de valoración (IEC = 9), sino de uno inferior. Este hecho se puede explicar por la existencia, de forma sistemática, de defectos o fallos de ejecución, que ocasionan deterioros en la estructura, a tiempo cero, por una mala praxis constructiva. Lo expuesto se ilustra en las figuras 6.6 y 6.7. En esta última se compara uno de los modelos de deterioro adoptados para este trabajo con el análogo propuesto por Jiang et al. (1989) para el departamento de autopistas de Indiana (IDOH).

Figura 6.6. – Ajuste del modelo de deterioro.

Figura 6.7. – Efectos de los defectos de ejecución.

Como primer paso, ya dentro del proceso de optimización, se opera a Nivel de Puente y se obtiene la reparación que maximiza la relación beneficio-coste. En la figura 6.8 se pueden observar los resultados obtenidos, para toda la red, en el año 2017.

OPTIMIZACIÓN A NIVEL DE PUENTE														Resolver Problema a Nivel de Puente.														2017						
Id. Puente	IEC AÑO 2014							OPCIONES DE REPARACIÓN AÑO 2017							COSTES DE REPARACIÓN AÑO 2017							IEP1	IEP2	B	Cr	Bcu	B/C							
	Pla.	Pav.	Jun.	Ap.	Sup.	Sub.	Aca.	Pla.	Pav.	Jun.	Ap.	Sup.	Sub.	Aca.	Pla.	Pav.	Jun.	Ap.	Sup.	Sub.	Aca.													
CM-03-13-006-0+200	9,0	9,0	9,0	9,0	7,5	6,9	7,6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	891	7,7	7,8	0,05	891 €	- €	0,56						
CM-03-13-006-2+900	8,6	7,6	8,5	9,0	9,0	8,6	8,6	0	1	0	0	0	0	0	0	1018	0	0	0	0	0	0	7,7	7,8	0,10	1.018 €	- €	0,98						
CM-03-32-0019+040	8,2	9,0	9,0	9,0	6,8	4,2	7,6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	513	6,9	6,9	0,05	513 €	- €	0,98						
CM-03-32-0044+400	7,8	7,8	5,4	9,0	7,7	7,3	6,2	0	1	0	0	0	0	0	0	1237	0	0	0	0	0	0	7,0	7,1	0,10	1.237 €	- €	0,81						
CM-03-32-0049+500-1	6,6	9,0	6,4	9,0	7,5	6,2	6,2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2471	0	0	0	0	0	6,5	6,6	0,10	2.471 €	- €	0,40						
CM-03-32-0049+500-2	6,2	9,0	9,0	9,0	7,5	7,8	8,4	1	0	0	0	0	0	1	17791	0	0	0	0	0	0	1779	7,4	7,6	0,23	19.570 €	963 €	0,17						
CM-04-12-0167+380	7,4	7,4	6,4	8,2	6,9	7,7	8,2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1916	0	0	0	0	0	6,8	6,9	0,10	1.916 €	2.395 €	1,77						
CM-04-12-0268+000	7,4	8,4	9,0	9,0	6,9	7,1	8,0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1014	7,4	7,5	0,05	1.014 €	- €	0,49						
CM-04-12-0272+800	7,8	7,2	7,7	9,0	9,0	7,0	8,6	0	1	0	0	0	0	0	0	1145	0	0	0	0	0	0	7,3	7,4	0,10	1.145 €	- €	0,87						
CM-31-06-0043+900	5,4	5,2	2,6	5,8	3,3	4,9	6,6	0	1	3	1	0	0	0	0	695	5116	792	0	0	0	0	3,7	4,4	0,65	6.603 €	- €	0,98						
CM-32-01-0088+600	7,4	5,8	4,9	7,9	7,9	8,2	7,6	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	264	0	0	0	0	6,7	6,9	0,12	264 €	- €	4,60						
CM-32-03-0032+230	7,4	5,6	5,9	8,6	8,4	7,3	7,8	0	1	0	0	0	0	0	0	492	0	0	0	0	0	0	6,8	6,9	0,10	492 €	- €	2,03						
CM-32-13-0028+260	5,4	7,4	6,9	9,0	8,4	7,1	8,4	0	1	0	0	0	0	0	0	580	0	0	0	0	0	0	6,5	6,6	0,10	580 €	- €	1,72						
CM-32-16-0002+500	7,4	5,0	6,9	7,9	6,7	8,2	8,4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	528	0	0	0	0	6,6	6,7	0,12	528 €	- €	2,30						
CM-32-18-0010+400	7,4	7,4	6,9	9,0	8,6	8,2	8,0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1898	0	0	0	0	0	7,3	7,4	0,10	1.898 €	4.361 €	2,82						
CM-32-18-0021+400	6,2	4,8	3,3	6,6	7,3	3,2	4,8	0	0	3	1	0	0	0	0	0	6395	1055	0	0	0	0	4,7	5,2	0,55	7.450 €	- €	0,74						
CM-32-22-0011+160	7,8	9,0	9,0	9,0	6,3	6,6	7,6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	597	7,2	7,3	0,05	597 €	- €	0,84						
CM-32-22-0012+730	9,0	5,8	6,9	9,0	9,0	6,3	8,6	0	1	0	0	0	0	0	0	617	0	0	0	0	0	0	7,0	7,1	0,10	617 €	- €	1,62						
CM-32-63-0008+700	7,0	6,2	9,0	9,0	7,1	6,9	7,0	0	1	0	0	0	0	0	0	155	0	0	0	0	0	0	7,0	7,1	0,10	155 €	1.030 €	13,06						
CM-32-63-0011+500	7,0	6,2	9,0	9,0	7,1	7,3	7,0	0	1	0	0	0	0	0	0	113	0	0	0	0	0	0	7,1	7,2	0,10	113 €	1.030 €	17,95						

Figura 6.8. – Solución del problema a Nivel Puente, para el año 2017.

Una vez realizado el análisis a Nivel de Puente, para todos los años del período de planificación, conocemos las reparaciones a considerar y los costes derivados en todo el período. Es entonces cuando estamos en condiciones de abordar la optimización a Nivel de Red. En esta segunda fase de análisis, se decide en qué año se actuará sobre cada puente.

OPTIMIZACIÓN A NIVEL DE RED

Resolver Problema a Nivel de Red

Coste total = 57.727 €

$B_{CU} = 22.889 €$

$MAX(IER_{med} \times 10^5 + B_{CU}) = 711.700$

	2015	2016	2017	2018	2019
Costes	17.925 €	24.975 €	2.242 €	2.675 €	9.912 €
Presupuestos	22.000 €	25.000 €	50.000 €	25.000 €	15.000 €
IER	7,2	7,1	6,9	6,7	6,6

Restricciones:

IEC _{min} =	3,00	≥	3
IEP _{min} =	3,90	≥	3
IER _{med} =	6,89	≥	5

Id.	OPCIONES DE REPARACIÓN						PLANIFICACIÓN						Σ	IEP						COSTES REPARACIÓN ANUALES					AHORROS EN COSTES DE USUARIO				
	Pla.	Pav.	Jun.	Ap.	Sup.	Sub.	Aca.	2015	2016	2017	2018	2019		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2015	2016	2017	2018	2019	2015	2016	2017	2018	2019
CM-0313-0060+200	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	8,2	8,0	7,9	7,8	7,7	7,6	0€	909€	0€	0€	0€	0€	0€	0€	0€	0€
CM-0313-0062+900	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	8,6	8,1	7,9	7,7	7,5	7,4	0€	0€	0€	0€	978€	0€	0€	0€	0€	5.920€
CM-0332-0019+040	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	7,4	7,2	7,0	6,9	6,8	6,7	0€	0€	513€	0€	0€	0€	0€	0€	0€	0€
CM-0332-0044+400	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	7,5	7,4	7,2	7,1	6,9	6,7	0€	0€	1.237€	0€	0€	0€	0€	0€	0€	0€
CM-0332-0049+500-1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	7,3	7,0	6,9	6,7	6,4	6,1	0€	2.520€	0€	0€	0€	0€	2.847€	0€	0€	0€
CM-0332-0049+500-2	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	7,9	7,7	7,8	7,7	7,5	7,4	0€	20.415€	0€	0€	0€	0€	982€	0€	0€	0€
CM-0412-0167+350	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	7,4	7,2	7,0	6,8	6,7	6,5	0€	0€	0€	1.552€	0€	0€	0€	0€	0€	0€
CM-0412-0268+000	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	7,8	7,7	7,5	7,4	7,3	7,2	0€	0€	0€	0€	1.218€	0€	0€	0€	0€	0€
CM-0412-0272+800	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	8,0	7,7	7,5	7,3	7,2	7,0	0€	0€	0€	1.122€	0€	0€	0€	0€	5.485€	0€
CM-3106-0043+900	0	1	3	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	4,7	5,0	4,7	4,4	4,1	3,9	6.869€	0€	0€	0€	0€	0€	0€	0€	0€	0€
CM-3201-0088+600	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	7,3	7,1	6,9	6,7	6,5	6,6	0€	0€	0€	0€	1.286€	0€	0€	0€	0€	0€
CM-3203-0032+230	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	7,4	7,2	7,0	6,9	6,7	6,5	0€	0€	492€	0€	0€	0€	0€	0€	0€	0€
CM-3213-0028+250	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	7,4	7,1	6,9	6,7	6,4	6,2	0€	592€	0€	0€	0€	0€	0€	0€	0€	0€
CM-3216-0002+500	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	7,2	7,0	6,8	6,7	6,4	6,1	0€	538€	0€	0€	0€	0€	0€	0€	0€	0€
CM-3218-0010+600	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	8,0	7,7	7,5	7,3	7,1	7,2	0€	0€	0€	0€	5.712€	0€	0€	0€	0€	4.192€
CM-3218-0021+400	0	1	2	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	5,4	5,7	5,4	5,0	4,9	4,7	10.133€	0€	0€	0€	0€	0€	0€	0€	0€	0€
CM-3222-0011+160	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	7,7	7,5	7,4	7,2	7,1	7,0	0€	0€	0€	0€	717€	0€	0€	0€	0€	0€
CM-3222-0012+730	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	7,9	7,5	7,3	7,1	6,9	6,7	642€	0€	0€	0€	0€	1.319€	0€	0€	0€	0€
CM-3263-0008+700	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	7,4	7,4	7,3	7,1	7,0	6,8	162€	0€	0€	0€	0€	1.072€	0€	0€	0€	0€
CM-3263-0011+500	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	7,5	7,5	7,4	7,2	7,1	6,9	118€	0€	0€	0€	0€	1.072€	0€	0€	0€	0€

Figura 6.9. – Solución del problema a Nivel de Red.

Como resultados, se obtienen las opciones de reparación en cada puente, el año en que se afrontará cada actuación, los costes directos asumidos y los ahorros en costes indirectos (costes de usuario), debidos al mantenimiento realizado. De la misma forma, se obtienen los valores sujetos a restricciones y se comprueba su validez.

Una vez obtenidos los resultados del análisis, la gestión de la información correspondiente permite obtener todo tipo de gráficos comparativos, como los que se muestran en las figuras 6.10 y 6.11.

Figura 6.10. – Comparación de índices de estado de los componentes.

Si bien el análisis representado en el documento ha sido para una hipótesis de planificación a 5 años, la herramienta permite la total flexibilidad para tener en cuenta el periodo como una variable que ajusta el usuario. Además, las propuestas de actuación son simplemente eso, propuestas, con la total libertad para el gestor de

llevarlas a cabo o no, en función de criterios que sobrepasan el mero análisis técnico, ya que como sabemos, estamos ante un área en el que pueden influir desde las restricciones económicas más severas hasta las decisiones políticas más exóticas.

Figura 6.11. – Evolución de estados de condición a lo largo del período de planificación.

Del análisis de los resultados obtenidos, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- En la figura 6.12 se reflejan las distribuciones de operaciones de reparación y las inversiones previstas por componente. Se puede observar como la gran mayoría de las reparaciones se concentran en el pavimento, los apoyos, las juntas y los acabados. Esto se debe a que las reparaciones de componentes estructurales principales tienen una repercusión económica muy elevada y, por tanto, penalizan mucho la relación B/C. Debido a ello, el modelo sólo las selecciona en casos singulares o en aquellos que opera una restricción de índice de estado mínimo. Un ejemplo de lo expuesto se muestra en la primera columna de la figura 6.12 (Plataforma) en la que a un 3.57% de las operaciones de reparación le corresponde un 31.44% de la inversión. Para solventar este aspecto, se propone adoptar las siguientes consideraciones:
 - Reevaluar los valores de los pesos, que representan la importancia que se concede a los componentes principales, para adecuar las mejoras conseguidas con actuaciones sobre estos elementos y los costes de reparación involucrados (es decir, la relación B/C).
 - Otra forma de jerarquizar la importancia de los componentes es considerar los valores mínimos del índice de estado (IEC) para elementos principales y secundarios de la siguiente forma:

$IEC_{\min} > 5$ para Plataforma, Superestructura y Subestructura.

$IEC_{\min} > 3$ para Pavimento, Juntas, Apoyos y Acabados.

Figura 6.12. – Distribución de operaciones de reparación e inversión prevista por componente.

- Otra conclusión, extraída tanto del análisis realizado como de la campaña de inspecciones, es la elevada incidencia de deterioros sistemáticos en las juntas. Además, de forma paralela, la presencia de estos elementos propicia y favorece la proliferación de multitud de defectos y desperfectos en otros componentes adyacentes como el pavimento, los apoyos y la subestructura. En la figura 6.12 se puede observar que un 17.86% de las reparaciones afectan a las juntas y un 17.86% adicional a los apoyos, es decir, en conjunto, un 35.76% de las actuaciones van dirigidas a estos componentes, que aglutinan un 38.79% de la inversión en la red. A ello hay que sumar su corta vida útil, a menudo por debajo de la esperada, y el frecuente mal comportamiento durante una parte significativa de su período de funcionamiento. La conclusión de todo ello, máxime teniendo en cuenta el tamaño de las estructuras de la red estudiada, es que se debería valorar la implantación paulatina de puentes integrales, pues los mayores costes de construcción pueden ser compensados por menores costes de mantenimiento y reparación a lo largo del período de servicio. En la figura 6.13 se ilustra este punto de vista, basándonos en la planificación obtenida, el coste de reparación en puentes con juntas y apoyos resulta

alrededor de un 40% superior al registrado para puentes integrales. De forma adicional, los puentes integrales presentan mejores estados de conservación y, por tanto, un mejor comportamiento frente al envejecimiento inherente al paso del tiempo. Un ejemplo, basado en los resultados obtenidos, se ofrece en la figura 6.14.

Figura 6.13. – Costes de reparación para puentes integrales y para el resto.

Figura 6.14. – Comparación del estado de condición de puentes integrales y el resto.

6.4. Reflexiones prácticas de la aplicación al caso real

En definitiva, se ha diseñado un **sistema de análisis válido para el estudio de priorización de inversiones** de reparación en redes de puentes y concebido para su **explotación en administraciones locales o autonómicas de carreteras**, en las que la **escasez de medios** impide la disponibilidad de recursos para adquirir un software especializado y de alto coste, así como respetar el periodo de inspecciones principales establecido en las guías y recomendaciones del Ministerio de Fomento, difíciles de asumir en el contexto económico en el que se mueven este tipo de administraciones. Al mismo tiempo, se aprovechó para desarrollar la aplicación sobre una plataforma EXCEL con aplicaciones de programación básica como Visual Basic y matemáticas como el complemento Solver, conocidas y de uso extendido a todos los niveles. En este sentido, se ha llevado a cabo la automatización de todo el proceso, mediante la programación de rutinas que ejecutan todos los cálculos necesarios. El resultado pretende ser una herramienta útil, sencilla, de coste asequible y con exigencias de aprendizaje mínimas para el usuario, permitiendo a su vez la flexibilidad propia de los procesos de gestión, que como bien es conocido por los agentes intervinientes, están muy condicionados por decisiones políticas, restricciones económicas, y cambio constante de prioridades que no responden en muchas ocasiones a criterios técnicos, debiendo ser el sistema capaz de adaptarse a estos condicionantes.

En primer lugar, cabe remarcar la importancia de procedimientos adecuados de construcción y una ejecución cuidada de las estructuras en sus mecanismos de durabilidad. Como se ha podido determinar en el modelo de predicción del deterioro, defectos congénitos de la estructura, procedentes del propio diseño y construcción, pueden afectar de manera importante en la limitación de la propia vida útil del componente, y en última instancia del propio puente.

Del mismo modo, se ha de hacer hincapié en la importancia determinante de implementar campañas de inspección en nuestras redes de puentes, capaces de detectar las necesidades de mantenimiento y reparación, sistematizar la recogida de información y la caracterización de daños y establecer las bases de datos que proporcionen una entrada válida para la aplicación de nuestros modelos.

De la información obtenida de la campaña de inspecciones realizada y su análisis a través de la herramienta de optimización y planificación, se constata el mejor comportamiento, a lo largo del tiempo, y la menor necesidad de conservación y reparación de los puentes integrales. Como futura línea de investigación, se propone evaluar los condicionantes económicos existentes para su implantación, es decir, si el ahorro en costes de conservación, a lo largo de la vida útil de la estructura, compensa un mayor coste inicial de construcción.

Finalmente, destacamos diversas conclusiones obtenidas de la campaña de inspecciones realizadas, detectando la reiteración de daños y deterioros correspondientes a puntos críticos habituales de las tipologías de estructuras estudiadas. En concreto, cabe reflejar la aparición de los siguientes daños:

- **Fallo sistemático en impermeabilización de juntas con afección subestructura**

Figura 6.15. – Filtraciones en paramentos de estribo por falta de impermeabilización juntas.

Este tipo de deterioro se ha ***constatado en prácticamente el 80-90%*** de los puentes inspeccionados que disponen de juntas, tanto en el caso de encuentro con estribo como en pilas intermedias. Aunque podría considerarse inicialmente como un daño menor, se ha podido verificar que en puentes con apenas 30-35 años de vida, los deterioros que van produciendo a los elementos principales que se ven afectados pueden llegar a ser de gran importancia, como se muestra en las siguientes imágenes:

Figura 6.16. – Efectos en componentes principales debidos a la ineficaz impermeabilización de la junta en estribo.

- **Degradación de aparatos de apoyos**

Aunque de manera menos acuciante, la degradación de los aparatos de apoyo plantea un porcentaje importante de los deterioros detectados, ***cerca del 20% para puentes***

con menos de 25 años de edad y por encima del 50% cuando se sobrepasan estos años, en los cuales se comienza a poner de manifiesto su proximidad al fin de la vida útil del componente. El problema añadido de esta problemática es la especialización necesaria para acometer el proceso de sustitución de estos elementos y su elevado coste en aquellos casos de difícil acceso. La vida útil puede plantearse cercana a los 30-40 años, aunque en redes locales se prolonga su utilización por encima de estos valores, pudiendo afirmar que en la red estudiada, a día de hoy, no se tiene constancia de que se hayan llevado a cabo este tipo de operaciones, aunque como anunciábamos anteriormente, se trata de una red relativamente joven, a la par de la creación de las autonomías en 1978.

Figura 6.17. – Deterioros en aparatos de apoyo próximos a la finalización de su vida útil.

- **Descalce de cimentación por socavación**

Si bien la concienciación de proteger los elementos principales de cimentación frente a la socavación está cada vez más aceptada a todos los niveles, su aplicación en elementos secundarios, como en muros de acompañamiento y sistemas de contención adyacentes a la estructura principal, siguen siendo **fuentes de daños reiterativos**, como hemos podido detectar en algún caso del trabajo de campo realizado.

Figura 6.18. – Socavación de cimentación de muros de acompañamiento.

- **Inexistencia o defectuoso sistema de drenaje de la plataforma**

Cerca del 20% de los tableros inspeccionados carecen de un sistema de evacuación y drenaje adecuado, traduciéndose en deterioros posteriores por difusión de cloruros y posterior corrosión de la armadura pasiva. La disposición y ubicación de sumideros plantea en muchas ocasiones, cerca del 25% de los casos inspeccionados, problemas para los elementos principales situados bajo su punto de evacuación. De la misma manera, las vigas de borde y losas suelen sufrir deterioros asociados a la escorrentía del flujo de agua evacuado transversalmente y mal direccionado por la ausencia o ineficacia de los goterones, planteando un daño habitual observado en 70% de los puentes de vigas-losa.

Figura 6.19. – Implantación y materialización inadecuada de imbornales.

Figura 6.20. – Afección sistemática a vigas de borde y losa.

- **Deterioro en culatas de vigas**

En su categoría de zonas con alta concentración de tensiones, suelen aparecer deterioros en forma de desconchones o desprendimientos de material, acompañados de diversos tipos de fisuras, que deben vigilarse pues tienden a propagarse debido a tratarse de la ***zona de transmisión del pretensado, además justo debajo de las juntas***, de las que ya hemos comentado sus problemas de estanqueidad.

Figura 6.21. – Deterioros habituales en culatas de vigas.

- **Asientos diferenciales losa de transición**

Se ha podido observar que la mayor parte de los deterioros detectados en el pavimento se localizan en las zonas de la losa de transición entre el trasdós de la estructura y el relleno del terraplén de acceso, por adaptación a los asientos relativos de ambos elementos. Son ***zonas de difícil compactación, y en un alto porcentaje, de entre un 10-15%*** de los casos observados, presentan ***problemas de diferente magnitud.***

Figura 6.22. – Asiento de losas de transición reflejado en pavimento y aceras.

- **Descalce de elementos auxiliares sustentados en relleno de terraplén**

Muy habitual también es el descalce de la sustentación de los elementos de drenaje de la carretera y protección de taludes, como las bajantes de terraplén o los encachados. La ***escorrentía por la interfase entre el apoyo de este tipo de elementos y el relleno de terraplén*** supone en muchos casos un punto de paulatino lavado de material, con los daños que ello conlleva a la superficie de contacto, que poco a poco se va reduciendo, aumentando la tensión transmitida y disminuyendo la fricción. En un porcentaje cercano al ***5-10% de los casos***, se han observado este tipo de deterioros en la campaña realizada.

Figura 6.23. – Descalce de elementos sustentados en terraplén de acceso.

- **Estribos flotantes y relleno frontal**

Se identifica esta tipología de estribo como punto crítico habitual, y hemos podido determinar que el estribo que se encontraba en peor estado de entre todos los estudiados en la campaña de inspecciones realizada en la red de referencia respondía a esta tipología, y más en concreto con la combinación de estribo flotante y pila con cimentación profunda, es decir, alternancia de condiciones de apoyo. De la misma manera, el relleno frontal suele presentar problemas de erosión mediante la aparición de cárcavas.

Figura 6.24. – Importante grado de deterioro en estribo flotante.

- **Aterramiento, bloqueo y deterioros en material de juntas**

Las falta de impermeabilidad de las juntas, como se ha comentado anteriormente, son uno de los tipos de deterioro más habituales dentro de la red de puentes estudiada. Sin embargo, no es menor el **grado de deterioro** que las juntas tienen en lo referente a la **colmatación de la carrera de desplazamiento, su bloqueo y la pérdida o rotura de los elementos que la forman**. El porcentaje de incidencia es elevado, rondando el **80-90% de los casos observados**, y aunque estructuralmente puedan no tener una incidencia indirecta elevada, pueden llegar a condicionar extraordinariamente la seguridad de la circulación de los vehículos.

Figura 6.25. – Deterioros frecuentes dentro de las juntas.

- **Sistemas de contención con impactos y fuera de normativa**

Habituales son los ***impactos sobre elementos de contención, como pretilas y barandillas***, que normalmente se reponen por medio de la conservación especializada. No obstante, adicionalmente a este tipo de deterioro, nos hemos encontrado con diferentes dispositivos con buen estado de conservación, que no computarían como deterioros desde el punto de vista estricto de la aplicación del sistema de gestión, pero que estarían ***fuera de la reglamentación vigente*** y que, por tanto, deberían pasar a su reposición para adaptación a criterios normativos.

Figura 6.26. – Elementos de contención fuera de reglamentación y deterioros por impacto.

Soluciones prácticas a la problemática detectada en la red estudiada:

Concluimos que, en términos generales, los ***daños detectados en la red son bastante reiterativos y presentan un origen principalmente congénito***, con un nivel de deterioro moderado, y grandes posibilidades de atajar los problemas a tiempo sin la necesidad de grandes esfuerzos económicos. De hecho, sería necesaria una pequeña dedicación que mejorase los siguientes aspectos:

- ***Asegurar la impermeabilización correcta de todas las juntas*** y la restitución de aquellas que han llegado al final de su vida útil.
- Pequeñas labores de ***mejora de los sistemas de drenaje y evacuación*** en desagües e imbornales.
- Planificación de la ***sustitución de aparatos de apoyo que vayan aproximándose a los 40 años***, o en los que se determinen incidencias en edad temprana.
- Introducción de ***goterones y elementos de desagüe*** ajustados a las necesidades y pendientes del tablero, que ***eviten la escorrentía por vigas y paramentos***.
- ***Actualización de sistemas de contención*** a reglamentación.

Por otra parte, hemos podido comprobar que los puntos críticos que ya enunciábamos en el capítulo 3 han sido corroborados en el presente apartado. Por ello, debemos realizar **una reflexión acerca de la importancia de no volver a caer en los errores de diseño y construcción del pasado**, uniendo de una vez todas las fases que forman parte de la vida de la estructura, que comienza desde el momento en el que se concibe, hasta su demolición, integrado todo el proceso dentro de un plan de mantenimiento. Como ejemplo de ello, y en ánimo de ir concretando las certezas que vamos extrayendo de la experiencia en materia de gestión, proponemos que se introduzca en futuras revisiones de la normativa de diseño estructural (EHE-08) la ***eliminación de detalles constructivos*** con tal nivel ***de dificultad para su conservación y mantenimiento***, que difícilmente serían justificables por razones de diseño o proceso constructivo, como es el caso de los **apoyos a media madera**, que reúne todos los inconvenientes de apoyos, juntas y drenaje de la plataforma en un punto que denominaríamos hipercrítico, como la experiencia nos demuestra.

Figura 6.27. – Proceso global de la vida de un puente. Insostenibilidad de detalles hipercríticos.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES,

APORTACIONES Y FUTURAS

LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

7.1. Conclusiones

En el Capítulo 1. Introducción y Objetivos de la presente investigación se fijaban unos objetivos que tras el desarrollo de los diferentes documentos, se estiman cumplidos, en la medida en la que:

- Se ha realizado un minucioso estudio del estado del arte con la identificación, análisis y definición pormenorizada de las diferentes herramientas de gestión de puentes existentes, extrayendo una idea clara del estado actual, los avances conseguidos por la ciencia y la acotación de las tareas pendientes dentro de la materia de los sistemas de gestión de puentes.
- Establecimiento de un planteamiento de planificación y formato de inspección de puentes específico y adaptable a las particularidades de la red gestionada, que de manera homogénea y sistematizada, establecen el inventariado y determinación del estado de cada una de las estructuras de manera relativa al conjunto de la red, mediante la realización de inspecciones.
- Desarrollo de un modelo de predicción de evolución del deterioro, conocido el estado de condición de cada puente, justificando el óptimo ajuste mediante un método envolvente combinado de modelos empírico-deterministas y modelos markovianos, como una buena herramienta para la determinación de la evolución del deterioro, con una componente aleatoria y otra más adaptable a tendencias y estudios de sensibilidad a partir de la observación de nuestros puentes, que son modelos a escala 1:1 sobre los que podemos obtener una gran cantidad de información totalmente indiscutible. Se ajusta el modelo propuesto partiendo de los datos obtenidos de las propias inspecciones y de las acciones de conservación y mantenimiento llevadas a cabo entre dos fases de seguimiento.
- Análisis detallado de las diferentes alternativas para establecer las estrategias de actuación dentro de la gestión de red, utilizando para ello técnicas de optimización de recursos, determinando la adecuación de cada una de ellas a la problemática específica de cada tipología estudiada.
- Desarrollo completo de un caso práctico real particularizado en el estudio de 20 puentes de la Red Comarcal de Carreteras de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha en la provincia de Albacete, base del modelo de deterioro propuesto calibrado para este tipo de redes, de escasos recursos y nivel de operaciones de mantenimiento y conservación bajo, aplicando la herramienta informática sobre la que se plasman en diversos módulos los elementos principales del sistema de gestión (inventario, inspecciones, ayuda a la toma de decisiones y extractos e informes) y la definición del sistema de optimización orientado y adaptado según las necesidades propias de la administración gestora de la red sobre la que se ha implementado el caso práctico.

La presente investigación plantea **diversas e interesantes conclusiones**, que podemos englobar en tres grandes temáticas:

a) Estado del Arte de los Sistemas de Gestión de Puentes (S.G.P.):

- El tema de estudio, en sí mismo, plantea un escaso nivel de desarrollo en la mayoría de los países, incluso en los más desarrollados como el caso español, habiendo dirigido los principales esfuerzos inversores y científicos hacia la expansión y mejora de la red de infraestructuras, dejando a un margen la aplicación de los sistemas de gestión de puentes. Es difícil encontrar implementaciones fuera del ámbito de las redes principales estatales de los países punteros de Europa o Estados Unidos de América. Quizás en estos países se comienza a realizar un verdadero ***“salto desde los congresos a la práctica”*** como enunciaba el artículo de Tanner, P. et al. en el IV Congreso ACHE celebrado en 2008 en Valencia, aunque la delicada situación económica de estos países ha frenado el desarrollo que iba adquiriéndose en los últimos años.
- En países en vías de desarrollo, e incluso en aquellos emergentes que están experimentando un gran auge en la realización de infraestructuras, no se aprecia una transmisión de conocimientos por parte de las sociedades que cuentan con la experiencia previa de la problemática de la ausencia de labores de gestión y mantenimiento, por lo que se encaminan a situaciones similares, que plantean un total desconocimiento, en algunos casos, de la envergadura y características de la propia red, pues ni siquiera se están realizando labores de inventariado, punto de partida común a cualquier sistema de gestión de puentes
- La creación de los sistemas, plantean por sí mismo un nivel intermedio del estado del arte. Corresponde a un grado de evolución dentro del cual, tareas como el desarrollo de inventarios y realización de inspecciones forman parte de los trabajos cotidianos llevados a cabo. Se trata de una labor de ordenación de la información en bases de datos y registros, pero sin asistencia a la toma de decisiones, prevaleciendo, por tanto, los criterios puramente ingenieriles de los responsables de la gestión.
- Los modelos de predicción del deterioro son la base de cualquier sistema de gestión, y sin embargo, actualmente, todavía no se tienen identificados modelos de predicción de deterioro totalmente fiables, por lo que detectamos una importante laguna en el estado del conocimiento.
- De la misma manera, los criterios de evaluación, inventariado e inspección siguen siendo objeto de discusión, sin un consenso generalizado, por lo que son objeto de análisis y justificación de aportaciones.
- Finalmente, el grado máximo de evolución reside en el desarrollo de sistemas inteligentes con ayuda a la toma de decisiones, actual materia de investigación e innovación, y objeto del desarrollo del presente documento técnico. La

integración de las redes principales en países desarrollados de América del Norte (Canadá, Estados Unidos y México), Europa, Japón y Rusia dentro de un sistema de gestión genera una cantidad de datos de tal magnitud, que la optimización de la distribución de recursos para las estrategias de mantenimiento y conservación pueden convertirse en una tarea de gran complejidad, siendo extremadamente difícil que puedan ser llevadas a cabo sin el apoyo de herramientas matemáticas e informáticas que faciliten la toma de decisiones.

- Dentro de la aplicación práctica incorporada en nuestra investigación, se pone de manifiesto la inexistencia total de aplicación de los sistemas de gestión en redes locales con recursos limitados, como se observa en un alto porcentaje de las autonomías y diputaciones de las redes viarias españolas.

b) Modelos de predicción del deterioro:

- Se valoran modelos físicos, probabilistas, empírico-deterministas e inteligencia artificial. Dentro de los físicos, apenas conocemos procesos de deterioro como la corrosión por carbonatación o cloruros, por lo que actualmente, no vemos que en un corto-medio plazo pueda ser la mejor vía para mejorar los modelos de deterioro. Estamos muy lejos de poder conocer todos los mecanismos de deterioro y sus relaciones físicas, y mucho menos la combinación entre todos los procesos. Por su parte, la inteligencia artificial, basada en el aprendizaje de casos reiterativos, puede ser una buena herramienta para “rellenar” el histórico de la red de puentes gestionada con una propagación hacia el pasado de los datos obtenidos en la actualización de las labores de gestión, pero no se plantean competitivos frente a herramientas como los modelos empírico-deterministas y los modelos estocásticos, sobre todo en su caso particular de cadenas de Markov.
- La tendencia general de los S.G.P. implementados en la actualidad, así como de la mayoría de las investigaciones (Informe BRIME, 2001), apuntan hacia el uso de los modelos markovianos como herramienta matemática de referencia para la predicción del deterioro. Sin embargo, consideramos que no se debe desaprovechar la enorme información que nos puede reportar la adecuada observación de los modelos a escala 1:1 que suponen los miles de puentes que tenemos en nuestras redes.
- No obstante, no se pierde de vista la visión crítica de las limitaciones del modelo de predicción del deterioro de Cadenas de Markov, que supone un nivel de aleatoriedad al proceso que no siempre es tal.
- Se considera, por tanto, un doble enfoque, de amplio espectro, por un lado se desarrolla un modelo de deterioro probabilista, basado en las cadenas de

Markov, y, por otro, se elabora un modelo empírico-determinista, basado en una relación teórica ajustada a una función exponencial.

- Para tener en cuenta las conclusiones de los dos planteamientos realizados, en toda su amplitud y sin pérdida de información, se propone un modelo de deterioro simplificado basado en un diagrama envolvente bilineal. La simplificación del aparato matemático asociado posibilita la utilización de una plataforma de uso universal, sin grandes requerimientos computacionales y en analogía con diferentes tendencias que han tenido gran aceptación en la ingeniería estructural como las aproximaciones de los diagramas tensión-deformación de materiales, que como bien sabemos no sería ningún problema a nivel de cálculo con los equipos con los que contamos hoy en día, pero se entiende que la simplificación que realiza mejora su acercamiento a la difusión conceptual y normativa.
- Además de otros factores, se analiza la influencia existente entre la adecuación del proceso de diseño y constructivo de los elementos estructurales y su posterior proceso de deterioro. Se concluye que los componentes que registran defectos congénitos, además de índices de estado iniciales inferiores a los previstos, presentan unos gradientes de deterioro muy superiores a los componentes que se ejecutan de forma adecuada, redundando todo ello en vidas útiles drásticamente inferiores a las previstas.
- También se detecta, mediante revisión de datos publicados por diferentes administraciones americanas y japonesas, una clara influencia en las curvas de deterioro en función del material constitutivo del puente, el tipo de administración y la carga asociada.
- Comparando la propuesta realizada con las encontradas en la literatura técnica específica, se concluye que el modelo de deterioro presentado en este trabajo constituye una herramienta adecuada, rigurosa, válida, sencilla y eficiente a la hora de realizar la prognosis del estado de conservación de estructuras, detectando algunos puntos de encuentro y algunas diferencias.
- Se identifican diversas zonas principales dentro de las curvas de deterioro obtenidas en los diferentes modelos, que se plantean a continuación:
 - Coeficiente de deterioro defectos de diseño y ejecución: se detecta de nuestros propios datos, y de modelos existentes, que en $t=0$ no siempre el índice de estado es el óptimo. Se debe tender a que la propia normativa no permita la recepción en el sistema de gestión de este tipo de puentes con deterioros congénitos.
 - Periodo de propagación de los daños iniciales detectados, que dependiendo de las características del componente, supone un periodo en los primeros 20-30 años de vida en los que se van desarrollando los procesos asociados a los deterioros congénitos.

- Estabilización: pasado esta fase inicial, la curva se estabiliza hasta que comienzan los procesos propios de degradación de materiales, asociados al tiempo t establecido por la metodología mecanicista, en paralelo al concepto de inicio de la fase de propagación establecida por Tuutti, 1982.
- Fase de propagación proceso de deterioro de materiales, dentro de la cual se produce una acusada disminución de los índices de estado hacia su puesta fuera de servicio. Llegado este punto, se debe valorar en profundidad la conveniencia de las actuaciones de mejora o el desmantelamiento.

c) Inventarios, inspecciones y estado de condición:

- El inventario, con la definición completa de la red objeto de gestión debe ser el punto de partida de la correcta elaboración de cualquier S.G.P. No se entiende el resto del proceso sin la elaboración de esta base de datos. A pesar de ello, no se trata de un caso fuera de lo común el encontrarse con administraciones a nivel autonómico y local de países desarrollados en los que no existe prácticamente ninguna información de los puentes que integran la red gestionada. Nuestra propuesta de modelo de inventario pasa por la simplificación máxima de datos, ya que la aplicación de recomendaciones y guías nos llevan a inventarios con gran cantidad de huecos en blanco en los que se pierde la noción práctica de su uso. De la misma manera, reivindicamos la necesidad de incorporar datos de la condición crítica del puente y de su índice de estado en los inventarios. No deben ser elementos “inertes” que se crean inicialmente y no se vuelven a actualizar, sino que deben ser un documento vivo de la realidad de las estructuras gestionadas.
- De la misma manera que los inventarios, las inspecciones suelen ser inexistentes o estar bastante desfasadas en el tipo de jerarquía de red en el que se centra la presente investigación. Tanto la sistemática de las campañas, su periodicidad, tipología y alcance, así como la determinación de la evaluación final a realizar tanto a nivel componente como a nivel de puente, se encuentra integrado en la mayoría de los países en recomendaciones específicas para cada tipo de inspección, así como en publicaciones técnicas de diferentes empresas concesionarias. No obstante, el concepto de integración de los componentes del sistema es objeto de discusión, ya que la tradicional propuesta jerárquica de inspecciones plantea diversas lagunas y fallos funcionales. Nuestra propuesta sitúa a las inspecciones principales como núcleo central de los sistemas de gestión, considerando a las inspecciones básicas o rutinarias como subsidiarias y dependientes de las primeras. De la misma manera, no entendemos que las inspecciones principales formen parte de los sistemas de gestión, ya que se trata de tareas especializadas orientadas a

proyectos de rehabilitación o reparación, que apenas suponen la finalización del 1-2% de las tareas previas de inspección principal.

- Consideramos que la periodicidad entre inspecciones planteadas por las guías y recomendaciones no están totalmente justificadas, y en muchos casos plantean unos periodos totalmente inasumibles por administraciones de escasos recursos. Proponemos una propuesta basada en un sistema de alertas con umbrales de aceptación por componente, que bajo el conocimiento de las curvas de deterioro adoptadas, pueden justificar una relajación en la cadencia de inspecciones o una intensificación, pero no disponer de un rasero constante como determinan la documentación existente, con el despilfarro de medios económicos que ello supondría.
- El estado de condición se plantea como la herramienta fundamental para clasificar el estado del puente mediante una valoración del alcance del deterioro, su tipología, intensidad, extensión y gravedad, expresado en los diferentes sistemas de gestión con diversas terminologías y baremos de medición, pero con un fondo conceptual común. Su aplicación parte de un nivel de componente, según la subdivisión realizada del puente, llegando tras la aplicación de las correspondientes ponderaciones al nivel de puente. Se trata de un trabajo que determina el resto del proceso de gestión, por lo que debe asegurarse que se realiza de manera:
 - Objetiva
 - Homogénea
 - Comparable
 - Fiable

Siempre a partir de inspecciones principales realizadas por personal que pueda ver (tenga acceso físico), sepa ver (especialistas con suficiente experiencia) y sea capaz de planificar que quiere ver.

- Condiciones de contorno. Muchas herramientas de ayuda a la gestión plantean la introducción dentro de la determinación del estado de condición de restricciones de partida que se traducen en limitaciones en el nivel de degradación de un componente o puente. Otra manera de actuar, que plantea unas ventajas asociadas a la independencia del proceso de inspección, sería el planteamiento de una jerarquización de la red, que introduciría unas condiciones de contorno o limitaciones, que denominamos como condición de crítico de la estructura, estableciendo una jerarquía de los puentes gestionados a partir de parámetros básicos de intensidad de tráfico, desvíos provisionales, interferencia con cauce, la afección a la durabilidad en función del tipo de ambiente, la importancia estratégica e histórico-patrimonial y el índice de estado relativo.

- Importancia de la determinación de puntos críticos de estructura. Introducimos este concepto como herramienta de optimización de las labores de inspección, ya que en función de la tipología y naturaleza del entorno, hay deterioros que sistemáticamente se producen y a los que hay que prestar una especial atención.
- Aplicación de Plan de Mantenimiento. Si bien la EHE-08 y la EAE-11 determinan la necesidad de que toda nueva estructura dispongan de un plan de mantenimiento específico, todavía estamos lejos de su total incorporación en proyectos, y mucho menos de su aplicación. Además, este concepto debería ser exigido a todos los niveles, no sólo a las nuevas estructuras. Se puede concluir que este plan es el que de una vez, y en adelante, debe aunar todos los procesos que forman parte de la vida de una estructura, sin el muro infranqueable que actualmente se pone entre la fase de diseño y ejecución y la posterior conservación y mantenimiento.
- El plan de mantenimiento debe plantear una serie de tareas programadas, labores de mantenimiento ordinario y especializado, en función del tipo de actuación, siendo operaciones que deben acompañar en todo momento al proceso de gestión de manera implícita.
- Las concesiones de conservación y mantenimiento representan un caso particular dentro del cual se insta de manera indirecta a que la empresa explotadora realice una autogestión motivada por el reporte económico variable que suponen los indicadores de estado en los que se encuentren los elementos de la red gestionada. Creemos que el concepto es bueno, similar a la propuesta de dirección por objetivos en el ámbito empresarial.

d) Optimización de estrategias de mantenimiento:

- Tras el salto del concepto de S.G.P. como base de datos a sistema de apoyo para la toma de decisiones, se establece la necesidad de la utilización de algoritmos y herramientas matemáticas para la optimización de estrategias de mantenimiento, que tanto por el volumen de parámetros manejados como por la complejidad se traducirían en un problema de difícil resolución sin la aplicación de técnicas matemáticas y apoyo computacional.
- La optimización de las estrategias de mantenimiento, tradicionalmente, se ha abordado mediante dos niveles de estudio inconexos:
 - Nivel de puente: Estudia la definición de la estrategia óptima de reparación en cada puente.
 - Nivel de red: Prioriza la inversión en cada puente. Se trata de ubicar el momento más conveniente para la actuación en cada estructura, a lo largo del período de planificación.

- Los principales criterios de optimización, recogidos en la literatura existente, abarcan un análisis de las técnicas de programación lineal o no lineal, dinámica, multi-objetivo, orientada a metas, control óptimo y entera. Estas investigaciones, descartan muchas de estas técnicas por sus prestaciones poco competitivas por la dificultad de operación computacional, así como el tiempo y viabilidad en la convergencia hacia unas soluciones de resolución de la optimización.
- Planteamiento de nuevas tendencias en materia de gestión de puentes y problemas de optimización en ingeniería, basadas en los métodos evolutivos, principalmente dirigidos hacia la aplicación de los algoritmos genéticos.
- Análisis de costes, planteando la incorporación de diferentes tipologías, más allá del propio derivado de la reparación, como sería el caso de los costes por riesgo de accidente, operación de los vehículos y demora. Además, ningún sistema de gestión tiene en cuenta en su proceso de optimización los costes de las propias labores de implantación y actualización de inspecciones, que puede llegar a ser bastante importante.
- Desarrollo de Modelo Integrado de Optimización mediante herramienta específica elaborada como parte de la investigación. Parte de la necesidad de la evaluación conjunta de los Niveles de Puente y Red, ya que adoptar de manera independiente ambos nos conduce a estrategias que no optimizan el problema.
- A su vez plantea estrategias de optimización en periodos flexibles para tener en cuenta las habituales decisiones no basadas en criterios técnicos ante los que el sistema debe ser capaz de adaptarse.
- Resolución del primer problema de optimización, a nivel de puente, que trata a su vez de cinco sub-problemas, uno por cada año del periodo de planificación, obteniendo un óptimo de reparaciones si la actuación se llevase a cabo en cada uno de los años. Dentro del segundo escalón de optimización, considerando toda la red, el sistema determina el año óptimo para afrontar las reparaciones de cada puente.
- Los algoritmos genéticos del método evolutivo son capaces de generar aleatoriamente soluciones que inicialmente estarán, por lo general, lejos del óptimo, Sin embargo, el algoritmo transforma las soluciones existentes en otras nuevas, a través de operadores genéticos como la mutación y el crossover entero, que continuarán cumpliendo las restricciones y además podrán tener valores mejores de la función objetivo repitiendo el proceso hasta que se cumpla el criterio de parada. Otros métodos de optimización crean una serie de sub-problemas no lineales con restricciones enteras que plantean un consumo de tiempo y computacional que crece exponencialmente con el tamaño del problema, concluyendo que no son competitivos frente a los métodos evolutivos, tanto a nivel de puente como a nivel de red.

- Además, se considera que el planteamiento es muy ambicioso en referencia al alcance del análisis. Actualmente, en España, tan sólo se sigue un planteamiento consistente en analizar y registrar el deterioro progresivo de las infraestructuras. De forma que, en todo momento, el técnico tiene la responsabilidad de decidir el hito de acometer la actuación y la definición completa de la misma. El modelo definido integra patrones de predicción del comportamiento que permiten inferir el proceso de deterioro de cada elemento y, en base a ello, propone la reparación más adecuada para cada puente de la red, ubicando, dentro del período de planificación, el mejor momento para acometer la actuación y obteniendo, por tanto, una planificación y un presupuesto estimado para el período de análisis establecido por el usuario, con total flexibilidad ante las limitaciones presupuestarias, políticas de cambio masivo de componentes (por ejemplo, campañas de actualización de señalización, barreras y pretilos)

e) Implementación del modelo SGP-CLM, caso práctico, ejemplo de red de carreteras de escasos recursos:

- Según el análisis de datos obtenidos y las justificaciones correspondientes reflejadas dentro del desarrollo de la presente investigación, se considera que se ha diseñado un sistema de análisis válido para el estudio de priorización de inversiones de reparación en redes de puentes y concebido para su explotación en administraciones locales o autonómicas de carreteras, en las que la escasez de medios impide la disponibilidad de recursos para adquirir un software especializado y de alto coste, y que a su vez ha sido realizado con las calibraciones y particularidades específicas de la red estudiada, por lo que se podría considerar como el germen punto de partida de futuros desarrollos e implantaciones generalizadas en el tipo de red al que va dirigido.
- Las características principales de la aplicación son su vocación hacia la utilidad, sencillez, coste de adquisición asequible, si en un futuro se comercializa, y con exigencias de aprendizaje mínimas para el usuario.
- Identificación de la importancia de los procesos de diseño y constructivos en los procesos de durabilidad.
- Importancia de realización de campañas de inspección de puentes, capaces de detectar las necesidades de mantenimiento y reparación, sistematizar la toma de datos y la evaluación de daños, estableciendo las bases de datos que proporcionen una entrada válida para la aplicación de nuestros modelos.
- Aparición sistemática de diferentes deterioros ligados a las juntas, que nos llevan a la reflexión de posibles estudios de los costes de ejecución de puentes integrales frente a los costes ligados al mantenimiento de estos elementos y los deterioros que pueden producir de manera indirecta:

- Fallo sistemático en la estanqueidad de juntas
 - Degradación de aparatos de apoyo
 - Descalce de cimentaciones de componentes secundarios
 - Inexistencia o defectuoso sistema de drenaje de la plataforma
 - Deterioro en culatas de vigas
 - Asientos diferenciales losa de transición
 - Descalce de elementos auxiliares sustentados en relleno de terraplén
 - Problemas en estribos flotantes y relleno frontal
 - Aterramiento, bloqueo y deterioros en material de juntas
 - Sistemas de contención con impactos y fuera de normativa
- Concluimos que, en términos generales, los daños detectados en la red son bastante reiterativos y presentan un origen principalmente congénito, con un nivel de deterioro moderado, y grandes posibilidades de atajar los problemas a tiempo sin la necesidad de grandes esfuerzos económicos. De hecho, sería necesaria una pequeña dedicación que mejorase los siguientes aspectos:
 - Asegurar la impermeabilización correcta de todas las juntas y la restitución de aquellas que han llegado al final de su vida útil.
 - Pequeñas labores de mejora de los sistemas de drenaje y evacuación en desagües e imbornales.
 - Planificación de la sustitución de aparatos de apoyo que vayan aproximándose a los 40 años, o en los que se determinen incidencias en edad temprana.
 - Introducción de goterones y elementos de desagüe ajustados a las necesidades y pendientes del tablero, que eviten la escorrentía por vigas y paramentos.
 - Actualización de sistemas de contención a reglamentación.
 - Se propone que se introduzca en futuras revisiones de la normativa de diseño estructural (EHE-08) la eliminación de detalles constructivos con tal nivel de dificultad para su conservación y mantenimiento, que difícilmente serían justificables por razones de diseño o proceso constructivo, como es el caso de los apoyos a media madera, que reúne todos los inconvenientes de apoyos, juntas y drenaje de la plataforma en un punto que denominaríamos hipercrítico, como la experiencia nos demuestra.

7.2. Aportaciones

Actualmente, las limitaciones del conocimiento en materia de gestión de puentes son importantes, restando un largo camino en la búsqueda de respuestas a cuestiones que a día de hoy se encuentran en pleno proceso de desarrollo, experimentación y verificación, y que por tanto, identificamos como lagunas del estado del conocimiento.

- No tenemos formatos estandarizados ni totalmente definidos de manera común para la programación de inspecciones e inventariado, así como las relaciones funcionales de sus elementos son objeto de discusión.
- El análisis de la evaluación del deterioro sigue siendo una temática difusa y poco mecanizada. Realmente, tratamos de encasillar mediante modelos matemáticos una realidad muy abierta.
- Todavía tenemos una dependencia de la subjetividad de las labores de inspección importante, ante la falta de herramientas de unificación mediante codificación y apoyo en catálogo y valoración de daños.
- Queremos encontrar la fórmula o modelo inequívoco y mecanicista para la evolución del deterioro, cuando tal vez el planteamiento de detectar la sensibilidad del proceso sea más adecuado.
- No sabemos cómo evolucionan las estructuras tras las actuaciones de mejora.
- Nos encontramos ante fracasos reiterados al resolver un problema de optimización que, además de las propias variables y dificultades matemáticas, lleva implícitas consideraciones de limitación presupuestaria y decisiones meramente políticas. Encorsetar el proceso puede ser una mala estrategia hacia la que muchas líneas de investigación conducen.
- En otros ámbitos, para el correcto funcionamiento de muchos electrodomésticos o equipos domésticos existen planes de mantenimiento que se siguen con cierta rigurosidad e incluso normativa de aplicación para la realización de inspecciones periódicas, no siendo así para el caso de un puente sobre el que circularán durante su vida útil miles de vehículos.
- Cuando diseñamos una estructura planteamos todo lujo de detalles en el proceso de montaje. ¿Por qué no hay ni un párrafo dedicado a los medios contemplados para el proceso de inspecciones durante su vida útil y su posterior desmantelamiento?

Podemos considerar, por tanto, que ante la inexistencia de respuestas totalmente definidas para las preguntas formuladas, nos encontramos con diversas líneas de investigación que delimitan el límite del conocimiento actual.

Ante esta situación, nuestro trabajo de investigación ha realizado un salto inexplorado en lo referente a:

- Planteamiento de una **metodología integral para el desarrollo de la implantación de un sistema de gestión, inédita en la literatura existente**, abordando todas las etapas, desde su creación hasta la ayuda a la toma de decisiones para la distribución de recursos, en función de todos los datos previos obtenidos mediante la conformación de inventarios, inspecciones y evaluación a nivel de componente y red.
- **Innovadora** propuesta del **esquema funcional de gestión, centralizando el proceso en torno a las inspecciones principales**, de cuyo resultado dependerá, además de la propia formación de los inventarios, las **inspecciones básicas o rutinarias (subsidiarias de las principales)** y las **especiales**, consideradas estas últimas como un elemento **fuera del alcance de los sistemas de gestión**. Pues bien, esta perspectiva, enfrentada al clásico y comúnmente aceptado concepto establecido en guías y recomendaciones de jerarquía rígida y encadenada en el orden -inventario, inspección rutinaria, inspección principal e inspección especial- supone un arriesgado análisis frente a los criterios preestablecidos, pero que tiene su justificación en la necesidad de introducir los propios costes de inspección dentro del proceso de optimización, y que produce un enfoque en el que a partir de la detección de puntos críticos dentro de las inspecciones principales, se pueda realizar el seguimiento mediante órdenes transmitidas a las inspecciones básicas o rutinarias, que realizarán la función de ser los ojos del técnico que ha detectado las incidencias, permitiéndole continuar el seguimiento de manera indirecta hasta la siguiente inspección, reduciendo la necesidad de periodicidades excesivamente bajas entre dos principales consecutivas, con la mejora de recursos que esto supone.
- **Condición de crítico y puntos críticos de componentes**. Introducimos estos originales conceptos no aplicados en los sistemas de gestión existentes y necesarios para la adecuada labor de inspección y evaluación de las estructuras de la red. Respecto al análisis global de red, podríamos afirmar que un puente por sí mismo es un elemento crítico dentro de la vía en la que se encuentra, ya que una puesta fuera de servicio dejaría, inevitablemente, sin circulación a los usuarios de la infraestructura. Además, parece razonable determinar qué serie de puentes presenta características críticas, por ser estratégicos con respecto a mantener la accesibilidad, formar parte de un conjunto considerado patrimonio histórico-artístico, encontrarse en un entorno especialmente exigente con la existencia de cauces o ambientes agresivos, estar sometidos a un nivel de solicitaciones importante, tener un índice de estado cercano a los límites admisibles, etc. De la misma manera, identificamos una serie de deterioros habituales asociados a tipologías y componentes del puente, denominados

puntos críticos, que deben ser objeto inevitablemente de profundización y seguimiento en el proceso de inspección y mantenimiento.

- Consideramos que el **proceso real de la evolución del deterioro** tiene una **importante componente aleatoria y otra más previsible basada en una evolución predecible bajo la mera observación**, fruto de la combinación de una gran cantidad de parámetros, cuya conexión causa-efecto estamos actualmente lejos de conocer en la actualidad. En la analogía con el propio proceso biológico que el ser humano sufre a lo largo de su vida, ¿alguien se atrevería a representar el proceso de evolución del estado de salud válido para diversos grupos de personas? Pues en una línea similar de planteamiento estaríamos en el caso de los puentes. Lógicamente, entendemos que en la mayoría de las personas al igual que en los puentes, el tiempo es un factor determinante, con una relación que tiende a la reducción del bienestar según avanzan los años. De la misma manera, los cuidados y hábitos que las personas hayan tenido, influirán positiva o negativamente en el proceso. Hasta este punto, incluso podríamos plantear un patrón de evolución orientativo al que buena parte de la población de un determinado país, en función de su nivel de desarrollo, tienden a ajustarse. Todo ello, en cierta medida, se refleja en los estudios de esperanza de vida, que no deja de ser un análisis obtenido de la propia observación metódica de la realidad. Sin embargo, aceptando de manera general que en nuestro país, por ejemplo, la evolución de una persona puede tener varias fases, acelerándose el proceso de deterioro en los últimos años próximos a la esperanza de vida, también es cierto que desgraciadamente, existe una inmensa casuística basada en hechos de puro azar que pueden truncar el desarrollo normal del proceso biológico.
- Tras las anteriores reflexiones, nos hemos aventurado a **proponer un modelo que combina la parte estocástica del proceso y los datos de las observaciones realizadas con un ajuste empírico-determinista**, tanto en el caso particular de la red estudiada como en las llevadas a cabo por otras **administraciones valientes y comprometidas con las sociedad** que ponen a disposición sus estudios de valoración de los deterioros detectados en sus correspondientes redes. Nuestro modelo plantea una identificación de las virtudes y defectos de ambos métodos, el estocástico según las cadenas de Markov y el empírico-determinista obtenido con la campaña experimental, con la **aplicación de la combinación mediante un ajuste envolvente y unas simplificaciones del lado de la seguridad** que se explican en el Capítulo 4 “Modelo de Predicción del Deterioro”, resolviendo el primero de los problemas necesarios para poder establecer un sistema de gestión de puentes: **tener una buena aproximación de la manera en la que van a evolucionar las estructuras de la red gestionada.**

- No entendemos en base a qué criterios los únicos documentos de referencia en España (Guía para la realización de inspecciones principales de obras de paso en la Red de Carreteras del Estado 2012 e ITPF-05) fijan la periodicidad para los procesos de inspección principal. Por ello, una vez que tenemos nuestro modelo de deterioro definido, con una buena aproximación a la evolución del índice de estado con el tiempo, **introduciremos el periodo entre las inspecciones como una variable del proceso de optimización de la toma de decisiones, no como un valor fijo e inamovible.** Se trata de minimizar las campañas necesarias de este tipo de inspección, que dependiendo del tipo de estructura, condiciones de acceso y nivel de interferencia al usuario, puede llegar a ser un valor muy significativo de los costes totales del ciclo de vida de la estructura. Quizás, queremos pensar que no de manera premeditada, **los sistemas de gestión existentes desprecian el término de costes de las inspecciones,** cuando realmente si la realización de la inspección conlleva el corte de carriles, la necesidad de medios especiales para el acceso como plataformas o camiones pasarela, podemos encontrar que en muchas ocasiones dicho coste sea superior incluso a la labor de mantenimiento que se desprenda de la aplicación de las recomendaciones del sistema de gestión. Por tanto, **ajustemos nuestras campañas a las necesidades reales que se obtienen de nuestro modelo de predicción del deterioro, no a plazos preestablecidos sin justificación alguna.**
- Utilización de **métodos alternativos a las técnicas clásicas de optimización,** que si bien son adecuadas en otros campos de la ingeniería, **fracasan estrepitosamente en la resolución de problemas de asignación de recursos en materia de gestión de infraestructuras.** Seleccionamos y adoptamos, por tanto, una potente herramienta matemática mediante la **aplicación de algoritmos evolutivos como novedoso ejemplo en el que se puede identificar su gran adaptación para la resolución de este tipo de problema, con el contraste basado en la campaña experimental llevada a cabo.** Su idoneidad viene justificada por la capacidad de generar soluciones de tipo entero ante una función objetivo a optimizar de componentes discretos, no diferenciable, con posibilidad de atacar por diferentes flancos el problema mediante los procesos de mutación, reproducción y crossover, evitando así caer en óptimos locales. Además, al descubrir las limitaciones de los análisis de optimización realizados por la literatura y sistemas implantados actualmente, que centran sus esfuerzos, bien con una concepción global de la red, decidiendo globalmente si actuar o no sobre una determinada estructura, bien en un planteamiento parcial de componentes de puente, que en ningún caso llevan a una asignación adecuada de recursos. Ante esto, **proponemos un innovador**

sistema que realiza una doble optimización secuencial nivel de puente (llegando a analizar cada componente durante el plazo para el que fijemos nuestra estrategia de mantenimiento) y nivel de red, determinando la conveniencia de actuación o no sobre cada uno de los puentes a partir de los datos del primer nivel de componentes.

- El problema teórico de optimización en particular, y el proceso global de gestión en general, deben dejar la suficiente flexibilidad para adaptarse a los plazos reales de inspección, tipos de actuación, restricciones presupuestarias, decisiones políticas, etc. La rigidez de las propuestas existentes en el mercado llegan a hacer pensar que los desarrolladores de los sistemas han vivido poco o nada la realidad del funcionamiento de las administraciones y de los propios ciclos económicos de los países. Por ello, ajustar un plazo de estrategia sin la flexibilidad necesaria, es un error que la mayoría comete. No dejar la suficiente amplitud para ajustar el tipo de actuación, determinando la medición sobre la que se va a llevar a cabo, las condiciones de acceso para llevarla a cabo y el grado de intensidad con el que se va a realizar, puede llevar a un planteamiento excesivamente encasillado del problema, no útil para el gestor. Por otra parte, como lamentablemente hemos vivido de manera especialmente aguda en nuestro país en los últimos años, las condiciones socioeconómicas del momento pueden llegar a plantear unas limitaciones presupuestarias para las cuales el sistema debe estar preparado, tal y como hemos planteado en nuestra propuesta, y que no es habitual en otras herramientas de gestión. Finalmente, conocido por todos los que compartimos nuestro desarrollo profesional con el contacto continuo con las administraciones, hemos podido comprobar que decisiones políticas por convenios con algún alcalde o municipio, pueden cambiar radicalmente los criterios de actuación, sin ningún tipo de fundamento técnico, siendo ésta una variable ante la cual el sistema debe dejar al usuario reflejar, por ilógicas que sean, las políticas de mantenimiento acordadas. Dejamos abierta nuestra herramienta para que el usuario realimente el sistema con las decisiones realmente llevadas a cabo, y sea capaz de volver a recalcular todo el problema.

7.3. Futuras líneas de investigación

El área objeto de estudio presenta un grado de evolución moderado en el estado del conocimiento, ya que se trata de un área con una historia relativamente reciente, comenzada formalmente tras diversos acontecimientos, en concreto colapsos de puentes producidos a finales de los años sesenta en Estados Unidos, con trágicas consecuencias.

Por tanto, diversas son las líneas de investigación de gran interés que quedan abiertas para futuros trabajos:

- Análisis de las lagunas que plantean los modelos de predicción de deterioro mediante técnicas de las Cadenas de Markov y los empíricos, basadas en la monitorización de la estructura y la evolución de sus parámetros de rigidez, como plantean las líneas de investigación de “Sintonización de Modelos” (A.Güemes et al., 2003) a partir de las propiedades modales.
- Estudios y conclusiones referentes a la aplicación de sistemas de optimización, aplicando criterios más allá del propio coste del ciclo de vida de la estructura.
- Integración de los fallos de ejecución en los modelos de deterioro existentes para, de este modo, reflejar la probabilidad de que el estado inicial de la estructura no sea el óptimo, como se ha podido comprobar en la campaña experimental llevada a cabo.
- Realización de trabajos de recopilación y análisis de las bases de datos de inspección y evolución del deterioro por año y tipología, que puedan nutrir a cada uno de los países de entradas válidas para los modelos, ante la total ausencia de publicaciones al respecto, como ocurre en el caso español.
- Evaluar los condicionantes económicos existentes para la erradicación de problemáticas de deterioro sistemáticas atribuibles a diseños y procesos constructivos históricamente implantados, como podría ser el caso de las juntas en puentes, valorando si el ahorro en costes de conservación, a lo largo de la vida útil de la estructura, compensa un mayor coste inicial de construcción en el caso de haberla planteado como puente integral.
- Se propone la investigación de la conversión de la función objetivo para el proceso de optimización, de discreta a continua. Para ello se deben transformar las opciones de reparación de valor discreto en funciones continuas, que se establecen como proporción o porcentaje de la actuación global sobre los diferentes elementos. La consecuencia inmediata es la posibilidad de aplicar métodos de optimización no lineales a la resolución del problema. Para ello, se recomienda una estrategia híbrida, de combinación de distintos métodos de optimización, consistente en la aplicación sucesiva de:
 1. Técnicas evolutivas. Mediante el recurso de los algoritmos genéticos, se obtiene una primera propuesta de solución que, en general, no será óptima, al carecer esta metodología de ese concepto. Por tanto, obtenemos una aproximación que, si bien sabemos que será buena, nunca tendremos la garantía de que se trate del óptimo buscado.
 2. Técnicas tradicionales no lineales: A partir de la solución obtenida en primera iteración, mediante métodos de optimización evolutivos, se utiliza la teoría de optimización no lineal para tratar de mejorar la

propuesta o, en caso contrario, comprobar que se satisfacen las condiciones del óptimo buscado.

- Análisis de riesgos de estructuras: aplicación de sistemas que evalúen la probabilidad de concurrencia de un determinado suceso en función de las consecuencias que puede producir, definiendo diferentes límites en los que se considera conveniente asumir el riesgo y otros en los que no se contempla esta posibilidad por las consecuencias que conlleva. Aplicado en otros elementos como presas y centrales nucleares, pueden pasar a ser parte de la futura propuesta en gestión de puentes, máxime cuando desgraciadamente aparecen incesantes amenazas terroristas y dramáticos atentados como el ocurrido durante la fase final de redacción de la presente tesis el 13 de noviembre de 2015, cuyo objetivo apuntaba hacia el estadio de fútbol “Stade de France”. Los puentes, en su condición de elemento crítico de la red, pueden ser el objetivo de estas acciones, por lo que en un futuro, no sería descartable que se eliminen por normativa tipologías de puente proclives a colapsos por mecanismos parciales, como podría ser el caso de vanos isostáticos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONSO FARRERA, F.A. *Tesis doctoral: Optimización conjunta de las políticas de mantenimiento y rehabilitación en puentes mediante algoritmos genéticos*. Aplicación al sistema de gestión de puentes del estado de Chiapas (México). Barcelona 2006.

ANDERSEN, M., GOLTERMANN, P., JENSEN, F. VIRUM, R. Y THØGERSEN, F. *Optimised Bridge Management with Permanent Monitoring Systems*. Proceedings of the 4th International Conference on Bridge Management. University of Surrey. United Kingdom 2003.

BAKKER, J.D., H.J. VAN DER GRAAD, and J.M. VAN NOORTWIJK. *Modelo of lifetime-Extending Maintenance*. In M.C. Forde, editor. *Proceedings of the 8th International Conference on Structural Faults and Repair*. London. United Kingdom 1999. Edinburgh: Engineering Technics Press.

BARLOW, R.E. AND F. PROSCHAN. *Mathematical Theory of Reliability*. New York. Wiley and Sons 1965.

BISHOP, CH. M. *Neural Networks for Pattern Recognition*. Clarendon Press. Oxford 1995.

BOLUKBASI, M., ARDITI, D., AND MOHAMMADI, J., *Deterioration of Reconstructed Bridge decks*. Structure and Infrastructure Engineering 2006, 2 (2), pp. 23-31.

COMMISSION UNDER THE TRANSPORT RTD PROGRAMME OF THE 4TH, *"Deliverable D14, Final Report"*, Framework Programme BRIME. Project funded by the European, Enero 2004, www.trl.co.uk/brime/d14.pdf

BUSA, G., CASSELLA, M., GAZADIA, W., AND HORN, R., *A National Bridge Deterioration Model*, Report to the U.S. Department of Transportation, Research and special Programs Administration. Transportation Systems Center Kendall Square. Cambridge, MA 1985.

CARLOS CASAS NAGORE. *"Conservación por Indicadores"*. Ponencia nº14 Curso Coex Demarcación CICCOP Valencia - Conservación y Explotación de Carreteras. Abril 2013

CATTAN, J. Y MOHAMMADI, J. *Analysis of Bridge Condition Rating Data Using Neural Networks*. Microcomputers in Civil Engineering 1997.

CHRISTIAN P.E. GEORGE A. *Lessons learned from Bridge Failure // Bridge Engineering Course*. University of Buffalo : [s.n.] 2010.

CLEMENTE TIRADO, JUAN JOSÉ. *Modelos de predicción del deterioro en sistemas de gestión de puentes*. Enero 2011.

COLLINES, L., *An introduction to Markov Chain Analysis*. Catmog. Geo Abstracts Ltd. University of East Anglia. Norwich 1972.

EUROPEAN COMMISSION DIRECTORATE GENERAL TRANSPORT 2003. *“Procedures Required for Assessing Highway Structures”*. Working group WG 2 and WG 3 report, COST 345, 2003.

DEL CUVILLO, R ; GALINDO, J. *Inspecciones principales de puentes de carretera*. 1988.

ITPF-05 *“Instrucción sobre las inspecciones técnicas en los puentes de ferrocarril”*. Dirección General de Ferrocarriles. 2005.

ELBEHAIRY, H., *Bridge management system with integrated life cycle cost optimization*. Ph. D. Thesis. University of Waterloo. Ontario. Canada 2007.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA), *“Bridge Management Systems”*, Report FHWA-DP-71-01R, US. Department of Transportation, Washington 1989.

INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE (FIB). *Model Code 2010 for Concrete Structures*, chapter 9, pages 366-385, Octubre 2013

FRANGOPOL, D. Y ESTES, A. *Optimum Lifetime Planning of Bridge Inspection and Repair programs*. Structural Engineering International, Vol. 9, No. 3, 1999.

FRANGOPOL, D.M. AND P.C. Das *Management of bridge stokes based on future reliability and manteinance cost*. Bridge Design. Construction and Maintenance. Institution of Civil Engineers. Thomas Telford. London 1999.

FRANGOPOL, D.M. J.C. KONG, AND E.S. GHARAIBEH DAS. *Reliability-based life-cycle management of highway bridges*. Journal of computing in Civil Engineering. ASCE 2001. Vol.15

FRANGOPOL, D.M., E. BRÜHWILER, M.H. FABER, AND B. ADEY, EDITORS, *Life-Cycle Performance of Deteriorating Structures: Assessment, Design and Management*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers. ASCE 2004.

FRONTLINE SOLVERS, *“Optimization Methods”*, 2014, www.solver.com.

FURUTA, H., HIROKANO, M., OTANI, Y., SAITO, M. Y DOGAK, M. *LCC based Bridge Management System of Infrastructure Systems consisting of Multiple Facilities*. Proceedings of the 2nd International Workshop on Life-Cycle Cost Analysis and Design of Civil Infrastructure Systems. Ube. Yamaguchi. Japan 2001.

GLOVER, F. *Future paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence*. Computers and Operations Research 1986, Vol. 13, No. 5: pp. 533-549.

GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley Publishing Co., Inc. Reading. Mass. USA 1989.

GOLDBERG, D., BURNS, S. y PARTHASARATHY, P. *Structural Design using a Hybrid Genetic Algorithm*. National Science Foundation 2000.

GÜEMES, A., LÓPEZ, J., CUERNO, C., MARCO, V. *Direct Updating Techniques Applied to Damage Detection in Spacecraft Equipment Panel*. Memorias del 4o Taller Internacional en Structural Health Monitoring. Stanford. Estados Unidos 2003.

HEGAZY, T., ELBELTAGI, E., AND ELBEHAIRY, H., *Bridge Deck Management System with Integrated Life Cycle Cost Optimization*, Transportation Research Record 2004, 1866, pp. 44-50.

JIANG, Y., Y SINHA, K., *The Development of Optimal Strategies for Maintenance, Rehabilitation and Replacement of Highway Bridges, Final Report Vol. 6: Performance Analysis and Optimization*, Joint Highway Research Project FHWA/IN/JHRP-89/13 1989.

KUMARES C. SINHA ET AL. *Updating and enhancing the Indiana Bridge Management System (IBMS)*. Joint Transportation Research Program. FHWA/IN/JTRP-2008/30. Final report. Indiana, 2009

LEE, J. , GUAN, H. and BLUMENSTEIN, M. *An ANN-Based Backward Prediction Model for Reliable Bridge Management System Implementations Using Limited Inspection Records – Case Studies*. Griffith University of Australia. 2008.

LEÓN GONZÁLEZ, J. *El caso de los puentes*. 4ª Jornada Técnica Análisis de Riesgos para Gestión de Infraestructuras. Madrid, 2014.

LEÓN GONZÁLEZ, J. et al. *Inspección y evaluación de estructuras existentes: una tarea para ingenieros valientes*. Revista de Obras Públicas (n. 3492); pp. 29-38 2009. Madrid, 2009.

LEÓN GONZÁLEZ, J. *Reflexiones en torno a la inspección de puentes*. 2007.

LIDÓN MASIÁ, MANUEL. *Modelos de deterioro de infraestructuras de transporte*. TFG. Universidad Politécnica de Valencia, 2014.

LIN, C. Y LEE, C., *Neural Fuzzy Systems*. Prentice Hall Inc.. USA 1996.

LIU C., HAMMAD A. E ITOH, Y. *Cost Optimization of Bridge Maintenance using Genetic Algorithm*. Proceedings of the 15th Congress IABSE. Copenhagen. Denmark 1996.

LOUNIS, Z. Y VANIER D.J. *Optimization of Bridge Maintenance Management using Markovian Models*. Proceedings of the International Conference on Short and Medium Span Bridges., v.2. Calgary. Alberta 1998.

MINISTERIO DE FOMENTO. *Guía de cimentaciones en obras de carretera*. Dirección General de Carreteras. Madrid, 2009.

MINISTERIO DE FOMENTO. *Guía de inspecciones básicas de obras de paso*. Dirección General de Carreteras. Madrid, 2009.

MINISTERIO DE FOMENTO. *Guía para la realización de inspecciones principales de obras de paso en la Red de Carreteras del Estado*. Dirección General de Carreteras. Madrid, 2012.

MINISTERIO DE FOMENTO. *Guía para la realización del Inventario de Obras de Paso*. Dirección General de Carreteras. Madrid, 2009.

MINISTERIO DE FOMENTO. *Inspecciones de Nivel Básico en Obras de Fábrica*. Dirección General de Carreteras. Madrid, 2007.

MIYAMOTO A., KAWAMURA K. Y NAKAMURA H. *Development of a bridge management system for existing bridges*. Japan, 2001.

MIYAMOTO, A., KAWAMURA, K. Y NAKAMURA, H. *Practical Bridge Management System in Japan*. Proceedings of the First International Conference on Bridge Maintenance. Safety and Management. IABMAS'02. Barcelona. Spain 2002.

MOHAMED, H., ABD EL HALIM, A. Y RAZAQPUR, A. *Use of Neural Networks in Bridge Management Systems*, Transportation Research Record, No. 1490, 1998.

MUÑOZ, E. E., NUÑEZ, F., & MOHAMMADI, J. *Investigation of Common Causes of Bridge Collapse in Colombia*. ASCE American Society of Civil Engineers , 14, 2009.

MUÑOZ, E. *Estudio de las causas del colapso de algunos puentes en Colombia*. Publicación semestral de la Facultad de Ingeniería Pontificia Universidad Javeriana , 6 (1) 2002.

MUÑOZ, E. *Ingeniería de Puentes*. En G. d. Javeriana, Ingeniería de Puentes (Vol. Tomo I y II). Bogotá D.C., Colombia: Javeriana 2011.

PANETSO, P., LAMBROPOULOU S. *Life –cycle maintenance cost prediction for concrete bridges based on inspection data*. Transport Research Arena Paris, 2014.

PÉREZ MÉNDEZ, L.R. *Vida útil residual de estructuras de hormigón armado afectadas por corrosión*. TFM Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, 1990.

PRESS, W. H., TEUKOLSKY, S. A., Vetterking, W. and Flannery, B.P. *Numerical Recipes: The art of scientific computing*. Third Edition. Cambridge University Press 2007. ISBN978-0-521-88068-8. QA297.N866.

RESENDE, M.G.C. Y RIBEIRO, C.C. *Greedy randomized adaptive search procedures*. Inteligencia Artificial. Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial. No.19. 2003.

SÁNCHEZ ÁLVAREZ, I. Y LÓPEZ ARES, S., *Optimización con Solver*, Comunicación VI Jornadas Asociación Española de Profesores Universitarios de Matemáticas para la Economía y la Empresa 1998.

SÁNCHEZ DE LEÓN, A.B., *Presentación Sistemas de Gestión de Puentes GEOCISA*. Madrid 2010.

S. A. SCHUMM, *The fluvial system*, New York, Wiley 1977.

SEO, J., *Lagrangean Relaxation and Network Approach to Large-Scale Optimization for Bridge Management Systems*, Ph.D. thesis Texas A&M University 1994.

SINHA, K., PATIDAR, V., LABI, S. Y THOMPSON, P., *Multi-Objective Optimization for Bridge Management Systems*, Transportation Research Board, National Cooperative Highway Research Program, Report 590. 2007.

SIMÓN-TALERO, J.M. *Los sistemas de gestión de puentes. Criterios generales, grado de implantación y ejemplos de aplicación*. CEMCO 2004.

SOARES, R., *User Cost Customization for a Florida Bridge Management System*, Ph.D., University of Florida 1999.

T. ADEY, KLATTER, L., S. KONG. *The IABMAS Bridge Management Committee Overview of existing Bridge Management Systems*. July 2010.

THOFT-CHRISTENSEN, P. *On reliability Based Optimal Design of Concrete Bridges*. Proceedings of the 2000 Structures Congress. Philadelphia 2004.

THOMPSON, P., NAJAFI, F., SOARES, R. AND KERR, R., *Development of Pontis User Cost Models for Florida*. Eighth International Bridge Management Conference. Transportation Research Board, Denver. Colorado. 1999.

TROIVE, S. *Optimization of LCC of Concrete Bridges*. Symposium on Nordic Concrete Research in Elsinore, Denmark at 12th to 14th June 2002.

TUUTTI, K. *Corrosion of steel in concrete*. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982

YANEV, B., *Life-Cycle Performance of Bridge Components in New York City*, in Recent advantages in Bridge Engineering, Ed. U. Meier and R. Betti, pp. 385-392. 1997.

YANEV, B. AND XIAOMONG, C., *Life Cycle Performance of the New York City Bridges*, New York Department of Transportation: New York, NY. 1993.

YI JIANG, CUMARES C. SINHA. *The development of optimal strategies for maintenance, rehabilitation and replacement of highway bridges*. Indiana, 1990.