

Coste del Ciclo de Vida en Elementos de la Infraestructura Ferroviaria

Fausto Pedro García Márquez

Dpto. de Administración de Empresas. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Ciudad Real.
Universidad de Castilla- La Mancha. Campus de Ciudad Real, 13071 Ciudad Real.
FaustoPedro.Garcia@uclm.es

Resumen

La Comisión Europea pretende reducir el Coste del Ciclo de Vida (Life Cycle Cost, LCC) de los elementos que constituyen la superestructura ferroviaria en un 30 % para el año 2020. En este artículo se presenta la técnica de Monitorización Remota Basada en la Condición aplicado a la mantenibilidad de los elementos críticos que constituyen la superestructura ferroviaria. Con ello se pretende aumentar el beneficio neto acumulado en este tipo de elementos y disminuir el valor del LCC. Finalmente se presenta un caso práctico y se analizan los resultados más importantes obtenidos en él.

Palabras clave: Coste del Ciclo de Vida, Superestructura Ferroviaria, Mantenimiento

1. Introducción

El transporte ferroviario esta cobrando una especial relevancia en Europa, debido fundamentalmente a políticas económicas. De este modo, la Comisión Europea ha estimado que para el año 2020 se duplicará el tráfico de pasajeros, mientras que el de mercancías se triplicará. La Comisión, en relación a estas previsiones, pretende reducir el Coste del Ciclo de Vida (Life Cycle Cost, LCC*) en un 30% en este tipo de transportes, EC White Paper (2002). En este artículo se tienen en cuenta dicha reducción de costes, y se propone para ello una mejora en el mantenimiento de los elementos claves que constituyen la superestructura ferroviaria como vía para poder alcanzar dichos objetivos. Para ello se propone la técnica de Monitorización Remota Basada en la Condición (Remote Condition Monitoring, RCM), García Márquez et al. (2006b). También se consideran aspectos como la fiabilidad, disponibilidad y seguridad de estos elementos para garantizar el buen funcionamiento de la superestructura ferroviaria. Finalmente se presenta un breve caso de estudio. En dicho estudio se analiza el caso de un desvío ferroviario situado en Inglaterra, donde se analizan las causas de fallos más comunes, el número de ocurrencias de los incidentes y sus causas, la probabilidad de fallo de cada modo de fallo, los minutos de retraso que conlleva cada fallo, etc. Se analizan los diferentes costes que componen el LCC. El estudio de la reducción del LCC se ha realizado en función del sistema de mantenimiento propuesto, donde se observa como se consiguen significativas reducciones en dicho LCC.

* Una definición y análisis del LCC, así como las diferentes etapas que constituyen su cálculo puede encontrarse en ANSI/SAE ARP 4293 (1992), IEC 300-3-3 (1996) y Stephen (1995).

3. Objetivos

El objetivo principal en este trabajo es reducir el LCC, como ya se ha mencionado anteriormente. Para ello se propone un nuevo sistema de mantenimiento predictivo aplicado a la superestructura ferroviaria.

El mantenimiento predictivo, en concreto el que se está aplicando a los elementos críticos que forman la superestructura ferroviaria, es un campo que está cobrando especial importancia hoy en día debido a la incorporación de las nuevas tecnologías y sistemas de comunicación. Algunos de los trabajos más destacados pueden encontrarse en las referencias Roberts et al. (2002), Pedregal et al. (2003), García Márquez et al. (2003, 2006a,b) y McHutchon et al. (2005).

El mantenimiento predictivo propuesto en este artículo se basa en la técnica RCM. RCM puede definirse como la medición de una variable física representativa de la condición de la máquina, y la comparación de esta variable con valores representativos del estado del equipo. Con ello se pretende determinar la condición del elemento que está siendo analizado. Actualmente, la incorporación de las nuevas tecnologías ha hecho posible que dicho concepto se extienda también a la adquisición, preprocesamiento y almacenamiento de datos, García Márquez et al. (2006b) Pedregal et al. (2004).

Así pues, con la implantación de dicho mantenimiento predictivo se pretende aumentar el tiempo entre las distintas inspecciones que se requieren actualmente en la superestructura ferroviaria, debido al aumento del ciclo de vida de los elementos claves que la constituyen. Dicho aumento del ciclo de vida se lleva a cabo garantizando la seguridad, fiabilidad y disponibilidad de dichos componentes, como se muestra en la Figura 1.

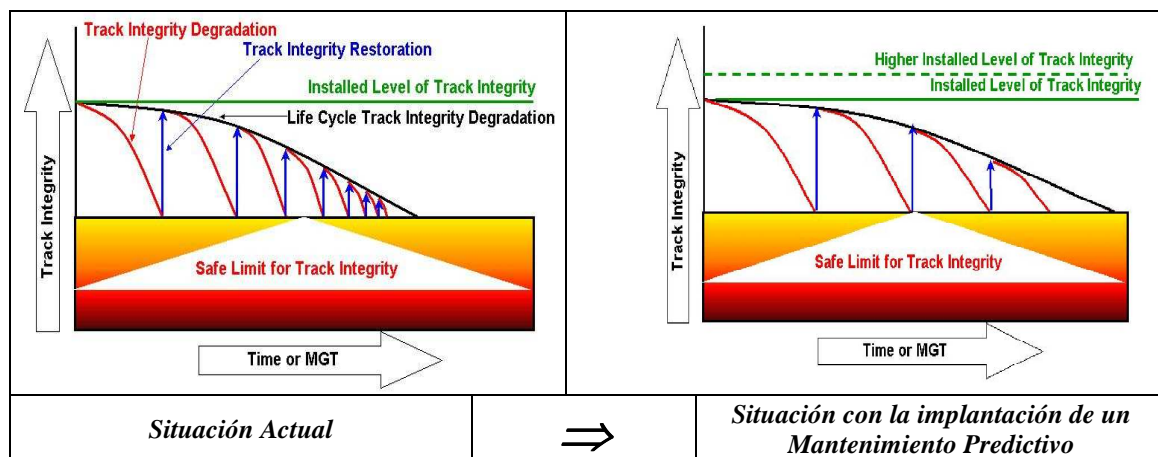


Figura 1. Esquema de degradación del ciclo de vida en la superestructura ferroviaria.

3. Caso de Estudio

El caso de estudio que se ha llevado a cabo en un desvío ferroviario, al ser éste considerado como uno de los elementos clave más importantes en la superestructura ferroviaria, García de Villegas et al. (1995). El desvío está situado en Parks Bridge, Inglaterra. Los datos relativos a este proyecto se han recogido en un periodo de tres años y medio.

La Figura 2 muestra el diagrama Pareto de los fallos. En dicho diagrama se aprecia claramente tres grupos distintos de fallos según su importancia relativa en función del conjunto. El primer grupo de fallos esta constituido por “Stretch/Tie Bar Defective”, “TOK” y “Slide Chair Dry/Seized”, los cuales representan el 42.15 % del total de los fallos. El segundo grupo de fallos representa el 33.06 % del total de los fallos. Dicho grupo lo forman los fallos “Drive Rod OOA”, “FPL OOA”, “Fuse Defective”, “Drive Rod Defective”, “Stud Bolt Defective” y “Detection Assembly Defective”. Finalmente, el tercer y último grupo está formado por los restantes 25 fallos considerados. Este tercer grupo representa el 24.79 % del total de los fallos.

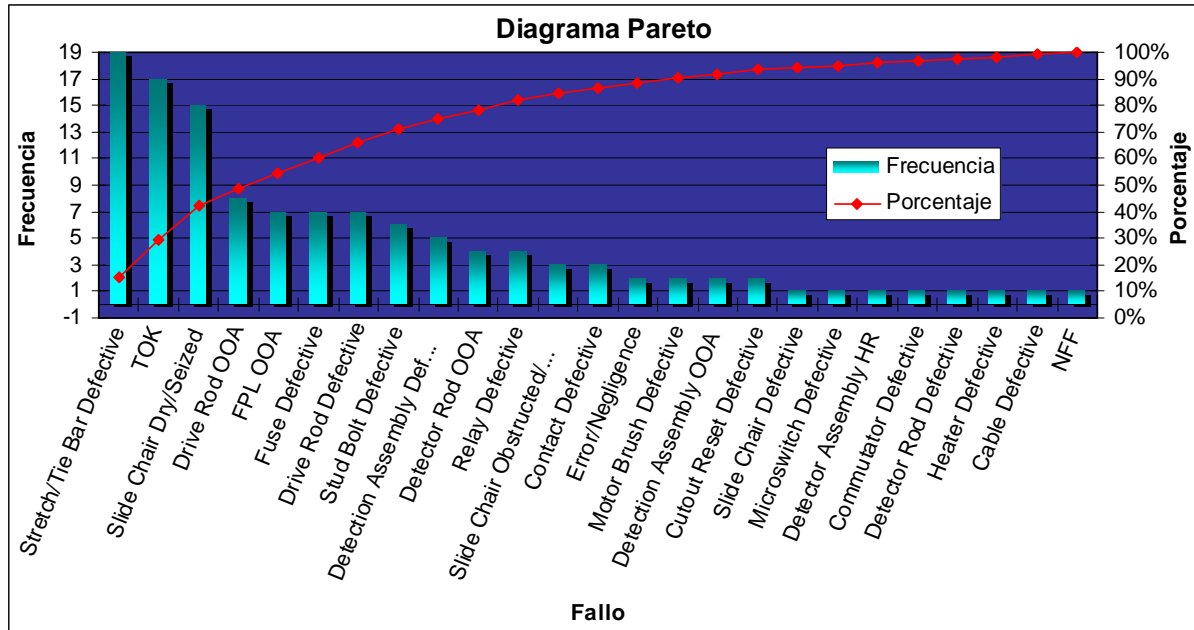


Figura 2. Diagrama Pareto de los fallos considerados en Parks Bridge.

La Tabla 1 muestra la probabilidad de fallos detectables por RCM, ec. (1), probabilidad de detección, ec. (2), y la probabilidad de prevención. La eficiencia conjunta es el resultado del producto de las probabilidades mencionadas en este párrafo.

$$P(F_{RCM}) = \sum_{j=1}^m f_j \cdot x_j \quad (1)$$

$$P(D) = \frac{\sum_{j=1}^m N_j \cdot P(tD)_j}{\sum_{j=1}^m N_j \cdot x_j} \quad (2)$$

Además de los factores mencionados anteriormente, la Tabla 1 muestra la tasa de fallo, ec. (3), la tasa de ocurrencia de falsas alarmas, y el retraso en minutos por fallo, ec. (4).

$$\bar{F} = \frac{\sum_{j=1}^m N_j}{T} \quad (3)$$

$$\bar{d} = \frac{\sum_{j=1}^m d_j}{\sum_{j=1}^m N_j} \quad (4)$$

Probabilidad de fallos detectables por RCM	77.69%
Probabilidad media de detección	50.11%
Probabilidad media de prevención	80.00%
Eficiencia total	31.1%
Radio de fallos	35
Radio de ocurrencia de falsas alarmas	3.8
Retraso en minutos por fallo	68

Tabla 1. Tasas de mantenimiento en Parks Bridge.

Nomenclatura:

$P(F_{RCM})$	Proporción de fallos detectables por RCM.
f	Probabilidad de fallo expresada en % para un modo de fallo.
x	Posibilidad de fallo o no detectable por RCM, {0,1}.
$P(D)$	Probabilidad media de detección de fallos.
N	Número de ocurrencias.
$P(tD)$	Probabilidad de detección antes de la ocurrencia del fallo.
\bar{F}	Tasa de fallo.
T	Número de años.
\bar{d}	Retraso en minutos por ocurrencia.
d	Retraso en minutos como consecuencia del modo de fallo.
j	Modo de fallo.
m	Número total de fallos considerados.

4. Modelo LCC

El modelo considerado en este artículo viene expresado por la ecuación (5).

$$Y = \sum_{i=1}^n y_i = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \mathbf{a}_i^T \cdot \mathbf{c}_i, \quad (5)$$

Donde Y es el coste total, y_i coste ocasionado por el fallo i y λ es el factor NPV, siendo NPV el valor presente neto (Net Present Value, NPV). Para el caso concreto considerado en este artículo $i = 1, \dots, 4$, por tanto $\mathbf{C} = [\mathbf{c}_1, \dots, \mathbf{c}_4]$ y $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_4]$, donde \mathbf{c}_i y \mathbf{a}_i son vectores de

tamaño 5, siendo a_{ij} es la cantidad asignada al coste por unidad c_{ji} . La descripción de los distintos elementos que constituyen las matrices, así como el concepto de NPV, se muestra en la siguiente sección.

4.1. NPV

Con el propósito de determinar el valor de flujo efectivo esperado de un determinado coste ocasionado por un fallo se calcula su valor de retorno esperado o regresivo. Para ello se aplica la tasa de descuento, r , para convertir los costes y beneficios futuros en valores presentes equivalentes.

El valor de NPV para un determinado año t viene dado la ec. (6).

$$NPV_t = \frac{FC_t}{(1+r)^{t-1}}. \quad (6)$$

FC_t representa el flujo de caja en el año t y r la tasa anual de retorno. El NPV total a lo largo de la vida del activo viene expresado por la ec. (7).

$$NPV = I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{FC_t}{(1+r)^{t-1}}, \quad (7)$$

donde I_0 es la inversión inicial realizada en el proyecto. Considerando las variables I_0 , FC_t y r constantes a lo largo de la vida del activo, el factor NPV, λ , viene dado por:

$$\lambda = \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+r)^{t-1}} = 1 + \frac{1}{r} \{1 - (1+r)^{1-T}\} \quad (8)$$

siento T la vida del activo. La ec. (7), teniendo en cuenta la ec. (8), puede expresarse como:

$$NPV = I_0 + FC \cdot \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+r)^{t-1}} = I_0 + FC + FC \frac{1}{r} \{1 - (1+r)^{1-T}\} \quad (9)$$

4.2. Coste de inversión

El coste de inversión, c_1 , viene dado por los siguientes costes:

- c_{11} Coste capital.
- c_{12} Coste de instalación.
- c_{13} Coste de autorizaciones y certificaciones.
- c_{14} Coste de formación inicial.
- c_{15} Costes de suministros varios y comunicación.

4.3. Costes operativos

Los costes operativos c_2 son los relativos a RCM, siendo éstos:

- c_2 :
- c_{21} Costes de suministros varios y de operación.
- c_{22} Procesos de dirección técnica.
- c_{23} Mantenimiento anual.
- c_{24} Coste de detección por RCM.
- $c_{25} = 0$.

4.4. Reducción de costes

La reducción de costes se produce básicamente por la detección anticipada de fallos y por la reducción de costes de mantenimiento correctivo. El primer caso, la reducción de costes originados por la detección anticipada de fallos, c_3 , viene dado por:

- c_3 :
- c_{31} Coste ocasionado por el retraso por cada fallo expresado en minutos.
- $c_{32} = c_{33} = c_{34} = c_{35} = 0$.
- $a_{31} = (\text{Eficiencia total}) \times (\text{Tasa de fallo})$.

El ahorro de costes como consecuencia de las reparaciones, c_4 , está compuesto por:

- c_4 :
- c_{41} Coste de detección no esperada.
- c_{42} Coste de detección de fallos por RCM.
- $a_{41} = a_{42} = (\text{Eficiencia total}) \times (\text{Tasa de fallo})$.
- $a_{31} = a_{31} \times (\text{Retraso total en minutos por ocurrencia})$.

5. Caso de estudio y resultados

A continuación se muestran las matrices **C** y **A** correspondientes al caso de estudio descrito en las secciones anteriores:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} -300000 & -1000 & 43 & 360 \\ -60000 & -25000 & 0 & -180 \\ 0 & -15000 & 0 & 0 \\ 0 & -180 & 0 & 0 \\ -1000 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & a_{31} & a_{41} \\ 1 & 1 & 0 & a_{42} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

En este estudio se ha tenido en cuenta una tasa de descuento del 8 %. Los principales resultados obtenidos en el primer año son:

$$y_1 = \sum_{i=1}^5 a_{i,1} \cdot c_{1,i} = -361000 \text{ UKP.}$$

$$y_2 = \sum_{i=1}^5 a_{i,2} \cdot c_{2,i} = -41684 \text{ UKP.}$$

$$y_3 = \sum_{i=1}^5 a_{i,3} \cdot c_{3,i} = 31873 \text{ UKP.}$$

$$y_4 = \sum_{i=1}^5 a_{i,3} \cdot c_{3,i} = 31873 \text{ UKP.}$$

$$Y = \sum_{i=1}^4 y_j = \sum_{i=1}^4 \mathbf{a}_i^T \cdot \mathbf{c}_i = -368849 \text{ UKP.}$$

La figura 3 muestra el beneficio neto acumulado en el periodo de 10 años en función de r expresado en tantos por cien. Se observa claramente como al aumentar el valor de r , la pendiente de la curva del beneficio neto acumulado frente al tiempo incrementa de valor. Los valores considerados de r oscilan entre 1 % y 10 %.

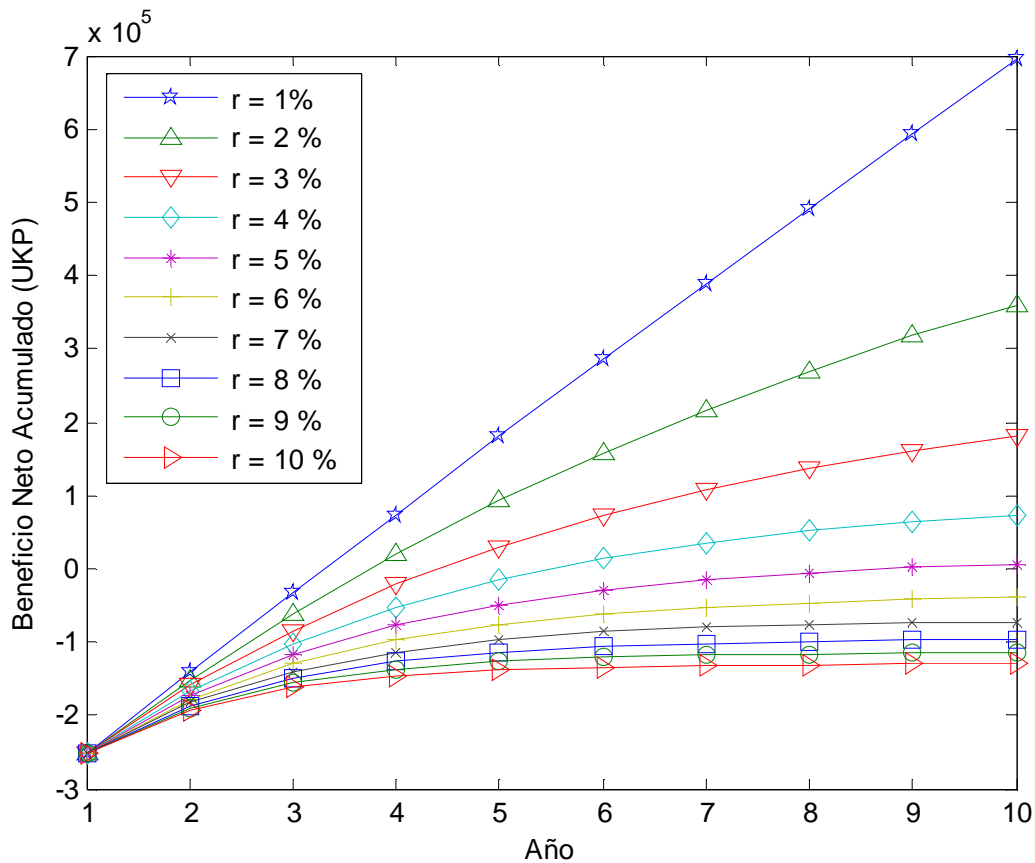


Figura 3. Beneficio neto acumulado en función de r .

En la Figura 4 se representa el beneficio neto acumulado en función de los minutos ahorrados como consecuencia a la prevención de fallos por la implantación de RCM. Dicho beneficio se ha representado en un periodo de 10 años. De la Figura 4 se pueden extraer dos importantes conclusiones. La primera de ellas es que el beneficio neto acumulado aumenta significativamente en relación al aumento de los minutos de operabilidad del sistema como consecuencia de una mejora del sistema de mantenimiento, en este caso por la implantación del sistema RCM. La segunda de ellas es acerca del gradiente de las curvas, ya que dicho gradiente aumenta proporcionalmente al tiempo de operabilidad del sistema. A diferencia de la evolución del gradiente de la curva del beneficio neto acumulado con respecto a r , esta evoluciona de forma proporcional a lo largo del tiempo en función del aumento por unidad del incremento de los minutos de operabilidad, mientras que cuando depende de r aumenta proporcionalmente al aumento por unidad de r .

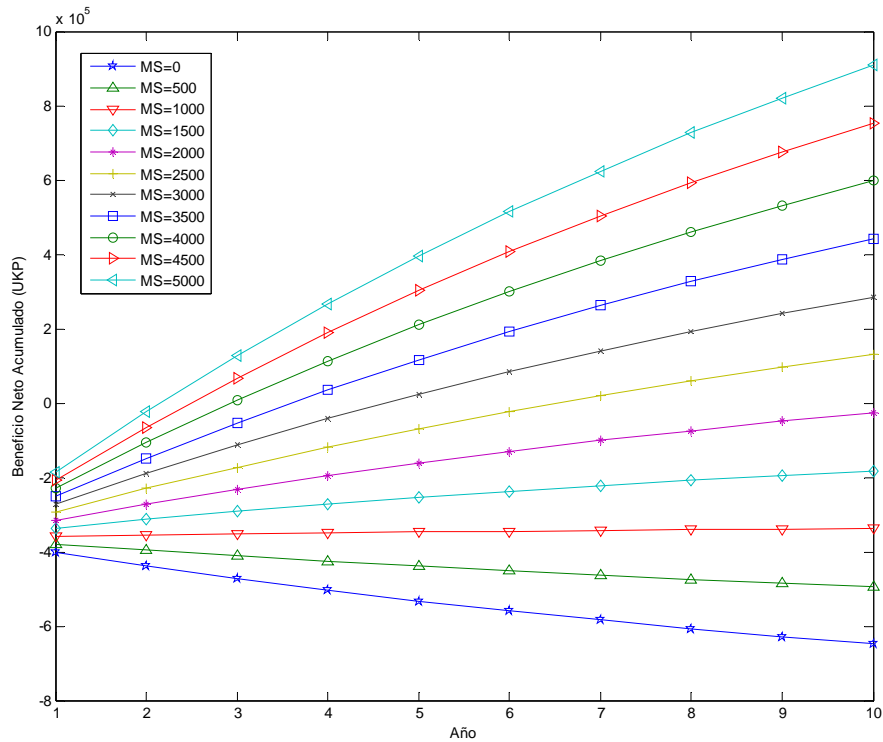


Figura 4. Beneficio neto acumulado en función del tiempo ahorrado en minutos por RCM.

6. Conclusiones

En estos últimos años la monitorización remota basada en la condición está cobrando una especial importancia debido a la incorporación de nuevas tecnologías y a la exigencia de un incremento de la seguridad, fiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de los sistemas. En el caso concreto del transporte ferroviario, y en concreto al de alta velocidad, esto se ve reflejado en las nuevas directivas europeas. Todo ello ha de llevarse a cabo intentando minimizar los costes con el fin de maximizar beneficios.

En este artículo se ha tenido en cuenta la técnica de RCM como alternativa para poder reducir estos costes, aumentando el tiempo de operabilidad del sistema a lo largo del ciclo de vida del mismo. Se ha presentado un caso práctico llevado a cabo en Parks Bridge, Inglaterra.

Finalmente se ha demostrado como se pueden conseguir incrementos del beneficio neto acumulado mediante el empleo de RCM, y se analiza la relación proporcional que tiene éste con el valor de la tasa de descuento, así como con los minutos de operabilidad del sistema.

Agradecimientos

El autor agradece al grupo de investigación de Railway Research UK, de la Universidad de Birmingham (Inglaterra) los datos suministrados para realizar este estudio. Asimismo agradece a la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha y a la Universidad de Castilla-La Mancha la financiación de dicho trabajo.

Referencias

ANSI/SAE ARP 4293 (1992). *Life Cycle Cost-Techniques and Applications American Society*, Milwaukee, Wisconsin.

EC White Paper, *European transport policy for 2010: time to decide*. September 2002.

García Díaz de Villegas, J.M. and Rodríguez Bugarín, M. (2005). *Desvíos Ferroviarios*. Ingeniería Cántabra, S.A.

García Márquez, F.P., Schmid F. and Collado J.C. (2003). A reliability centered approach to remote condition monitoring. A railway points case study". *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 80, Issue 1, pp. 33-40.

García Márquez, F.P.; Pedregal D.J. Schmid, F. (2006a) Unobserved Component Models Applied To The Assessment Of Wear In Railway Points: A Case Study. To appear in *European Journal of Operational Research*.

García Márquez, F.P.; Pedregal D.J. Schmid, F. (2006b), Digital Filter Based Approach to the Remote Condition Monitoring of Railway Turnouts. To appear in *Reliability Engineering & System Safety*.

International Standard, IEC 300-3-3 (1996). *Dependability Management – Part 3: Application Guide – Section 2: Life Cycle Costing*, IEC. First Edition.

McHutchon M.A., Staszewski W.J. and Schmid F. (2005) Signal Processing for Remote Condition Monitoring of Railway Points. *International Journal of Strain Measurement*, Vol. 41 Issue 2 Page 71.

Pedregal D.J., García Márquez, F.P.; Schmid, F. (2004). RCM² predictive maintenance of railway systems based on unobserved components models. *Reliability Engineering & System Safety*, Jan. 2004, Vol. 83, Issue 1, pp. 103-110.

Roberts C., Dassanayake H.P.B., Lehasab N. and Goodman C.J. (2002) Distributed quantitative and qualitative fault diagnosis: railway junction case study, *Control Engineering Practice*, 10, pp. 419-429.

Stephen J.K. (1995) Life Cycle Costing for Design Professional. *Hardcover - 2nd edition*, McGraw-Hill Companies, ed. Irwin / McGraw-Hill.