

Fernando Pascual Andreu

Mantenimiento electromecánico
ferroviario: adaptación de
herramienta informática, modelado
y análisis de sensibilidad de
costes LCC en función de la
fiabilidad

Departamento
Ingeniería Mecánica

Director/es
Larrodé Pellicer, Emilio

<http://zaguan.unizar.es/collection/Tesis>

© Universidad de Zaragoza
Servicio de Publicaciones

ISSN 2254-7606



Tesis Doctoral

**MANTENIMIENTO
ELECTROMECÁNICO FERROVIARIO:
ADAPTACIÓN DE HERRAMIENTA
INFORMÁTICA, MODELADO Y
ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE
COSTES LCC EN FUNCIÓN DE LA
FIABILIDAD**

Autor
Fernando Pascual Andreu

Director/es
Larrodé Pellicer, Emilio

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA
Ingeniería Mecánica

2015

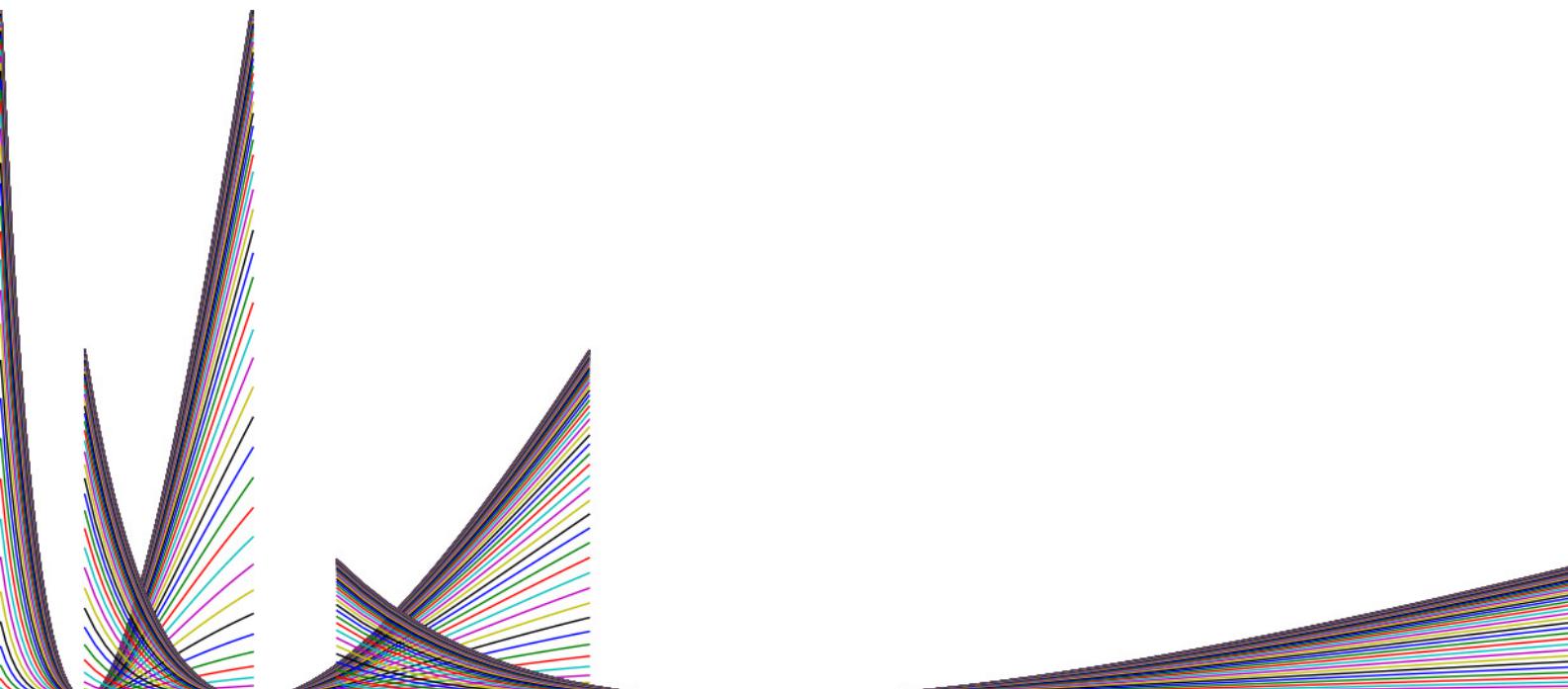
MANTENIMIENTO ELECTROMECÁNICO FERROVIARIO: ADAPTACIÓN DE HERRAMIENTA INFORMÁTICA, MODELADO Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE COSTES LCC EN FUNCIÓN DE LA FIABILIDAD.

Autor:

Fernando Pascual Andreu

Director:

Emilio Larrodé Pellicer



TESIS DOCTORAL

**MANTENIMIENTO ELECTROMECÁNICO FERROVIARIO
ADAPTACIÓN DE HERRAMIENTA INFORMÁTICA,
MODELADO Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE COSTES
LCC EN FUNCIÓN DE LA FIABILIDAD.**

Autor:

Fernando Pascual Andreu

Ingeniero Industrial, MBA

Director:

Emilio Larrodé Pellicer

Catedrático de Ingeniería e Infraestructuras de los Transportes
de la Universidad de Zaragoza

MEMORIA PRESENTADA PARA OPTAR AL TÍTULO DE DOCTOR
CORRESPONDIENTE AL PROGRAMA DE DOCTORADO:
NUEVAS TECNOLOGÍAS EN AUTOMOCIÓN

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
ÁREA DE INGENIERÍA E INFRAESTRUCTURA DE LOS TRANSPORTES
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
CAMPUS RÍO EBRO

Universidad de Zaragoza

Zaragoza, septiembre de 2015



**Departamento de
Ingeniería Mecánica
Universidad Zaragoza**

A Sonia,

RESUMEN

Esta investigación presenta un modelo analítico para el estudio de la optimización de los costes de mantenimiento de flotas bajo la filosofía de Costes de Ciclo de Vida LCC, estudiando los principales parámetros de optimización del plan de mantenimiento desde la perspectiva de la ingeniería de la fiabilidad.

Inicialmente, como parte del marco teórico, se presenta el estado del arte del mantenimiento de flotas y su evolución, haciendo hincapié en su relevancia desde el punto de vista económico y discutiendo cómo la internacionalización del sector y los procesos de adquisición de material rodante en base a la comparación del Coste de Ciclo de Vida (LCC) han impulsado el campo de la optimización del mantenimiento.

Complementariamente, se examinan diferentes modelos matemáticos de optimización de costes de mantenimiento, justificando la idoneidad de los Modelos de Tiempo de Retardo para la resolución de problemas de optimización en sistemas con fallos revelados aplicados a inspecciones de seguridad de flotas ferroviarias.

La investigación demuestra la utilidad del Modelo de Tiempo de Retardo (DTM) al caso de mantenimiento de flotas, describiendo las condiciones e hipótesis para su correcta aplicación. Se ha estudiado el impacto de cada una de las variables, tanto de fiabilidad como de costes, sobre el periodo óptimos de inspección y su coste resultante.

Adicionalmente, se ha desarrollado un método gráfico para la resolución del periodo óptimo de inspección de casos prácticos, adaptando el dominio de trabajo a la casuística del sector. Los nomogramas del nuevo método gráfico permiten llevar a cabo el análisis de sensibilidad de cada sistema bajo estudio con gran sencillez y agilidad. También se ha estudiado gráficamente la influencia del uso de distribuciones exponenciales en el Modelo de Tiempo de Retardo (DTM), proponiendo una clasificación cualitativa de los equipos ferroviarios a mantener en función de su coste y riesgo.

El método gráfico desarrollado se ha validado por medio de su aplicación a casos prácticos ya resueltos por métodos analíticos, para a continuación demostrar su utilidad en un caso particular de mantenimiento de las puertas exteriores de una flota dada. Finalmente se presenta la adaptación de una herramienta informática de gestión de costes, que se ha adecuado para incorporar el modelo de optimización del mantenimiento en función de la fiabilidad.

SUMMARY

This research introduces an analytical model for rail fleet maintenance costs optimization under a Life Cycle Cost approach. The maintenance plan optimization main parameters are investigated applying a reliability engineering perspective.

The appropriate state-of-the art is presented as part of the theoretical framework. Fleet maintenance and its evolution is surveyed, focusing on its economics. Industry globalization and the viral use of a Life Cycle Cost approach as a purchasing technique are appointed as key drivers on fleet maintenance optimization on the rail industry.

Different cost optimization mathematical models are reviewed completing the required theoretical framework. A Delay Time Model is proven to be appropriate for safety inspection on rail fleets systems with revealed failures.

Research demonstrates the Delay Time Model convenience to rail fleet maintenance cases, describing the hypothesis and circumstances to comply with for the precise application of the model. System reliability variables (failure rate, delay time) and maintenance costs (inspection, corrective, penalty) impact on optimum inspection period and costs have been studied.

A new Graphical Model for analyzing Delay Time Model practical cases has been developed. The new Graphical Model yields optimum inspection period and cost; nomograms' domain is been tailored to meet the range of the main fleet maintenance parameters. The Graphical Model allows fast and easy sensitivity analysis on each system. The influence of exponential distribution on the Delay Time Model outcome is been graphically studied; a qualitative classification of maintained systems based on risk and cost from an LCC point-of-view is presented.

The new Graphical Model is been proven using Delay Time Model papers approaching industry cases. Once graphical and analytical results are benchmarked on several cases, the new Graphical Model use is demonstrated on the particular case of a fleet's exterior doors system. Finally, a cost estimating software is been adapted to integrate the Delay Time Model and re-structured for fleet maintenance cost management.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me resulta obligado y grato dar mi más sincero agradecimiento al director de mi tesis, Emilio Larrodé Pellicer, por su constante apoyo y confianza a lo largo de estos años, en los que no solo ha guiado y dirigido el trabajo científico con rigor y objetividad, sino que ha sabido imprimir en cada momento el impulso y motivación necesarios en su justo ritmo y medida. Sin su trabajo esta tesis no hubiera sido posible.

Asimismo, me gustaría agradecer al Appalachian Transportation Institute de Marshall University, (EEUU) y en particular al Dr. Richard Begley el apoyo institucional y el empuje personal inicial brindado, que constituyó la oportunidad para comenzar mi trabajo académico en el mundo ferroviario. Del mismo modo, esta tesis no sería igual sin la experiencia práctica adquirida en Talgo America, Seattle (EEUU), que permitió y fomentó la investigación en la optimización del mantenimiento ferroviario.

Resulta necesario hacer público mi agradecimiento a mi socio y compañero en Prodeo Ingeniería, D. Ángel Maza, tanto como promotor de la investigación en esta recta final como por su firme y noble dedicación en los aspectos más técnicos de la investigación.

A mis padres, Javier y Mercedes, por su incondicional apoyo, especialmente en estos últimos años en los que la investigación ha requerido su participación para suplirme donde no podía llegar.

A mis hijos Hugo y Alex, por todo el tiempo que les he robado, al que siempre han contestado con un inocente y entusiasta apoyo.

A mi mujer, Sonia, por su comprensión y apoyo en todos estos años.

Gracias a todos.

Zaragoza, septiembre de 2015

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	7
SUMMARY.....	9
AGRADECIMIENTOS.....	11
LISTADO DE FIGURAS.....	16
LISTA DE ACRÓNIMOS	23
CAPÍTULO 1	24
INTRODUCCIÓN	
1.1. MOTIVACIÓN Y RELEVANCIA.....	25
1.2. OBJETIVOS Y ALCANCE	26
1.3. MÉTODO DE TRABAJO.....	30
1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.....	35
CAPÍTULO 2	
EL COSTE DE CICLO DE VIDA (LCC) EN EL MANTENIMIENTO DEL MATERIAL RODANTE: OPTIMIZACIÓN DE LA GESTIÓN DE ACTIVOS EN BASE A LA FIABILIDAD	37
2.1. EL MANTENIMIENTO DEL MATERIAL RODANTE: MAGNITUDES Y EVOLUCIÓN.....	38
2.2. EL ANÁLISIS DEL COSTE DEL CICLO DE VIDA (LCC) Y LA GESTIÓN DE ACTIVOS FÍSICOS	42
2.2.1. Definiciones	42
2.2.2. Antecedentes históricos.....	43
2.2.3. Objetivos.....	44
2.2.4. Fases de vida y sus costes	45
2.2.5. Metodología de Cálculo General: la incertidumbre de la fiabilidad.....	47
2.3. ANÁLISIS DEL COSTE DEL CICLO DE VIDA (LCC) DE VEHÍCULOS Y FLOTAS FERROVIARIAS	52
2.3.1. La idoneidad y necesidad del LCC ferroviario	52
2.3.2. Limitaciones, deficiencias y riesgos del LCC de flotas ferroviarias.....	56
2.3.3. El modelo escandinavo; REMAIN y otros trabajos de infraestructura	59
2.3.4. La aproximación europea, UNIFE-UNILIFE	61
2.3.5. La aplicación Coreana.	64
2.3.6. La experiencia Japonesa, MAGLEV.....	66
2.4. HERRAMIENTAS PARA EL CÁLCULO Y ANÁLISIS LCC.	67
CAPÍTULO 3	
MODELOS DE OPTIMIZACIÓN DE COSTES DE MANTENIMIENTO.....	68
3.1. ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO.....	69
3.2.1. Modelos de renovación basados en calendario o de intervalo fijo.....	73
3.2.2. Modelos de renovación basados en edad.....	75
3.2.3. Método Gráfico de Resolución: los ábacos de Glasser.....	77
3.3. MODELOS BASADOS EN LA INSPECCIÓN.	79
3.3.1 Modelos de inspección con fallos no revelados.....	80
3.3.2 Modelos de mantenimiento basados en la condición.	83
3.3.3 Modelos de inspección con fallos revelados: Modelo de Tiempo de Retardo	89
CAPÍTULO 4	
FORMULACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO DE OPTIMIZACIÓN DEL COSTE DE LAS OPERACIONES DE MANTENIMIENTO.....	91
4.1. MARCO METODOLÓGICO.	92

4.2. ESCENARIO GENERAL A MODELAR Y OPTIMIZAR.....	94
4.2.1. <i>El mantenimiento de una flota ferroviaria: variables principales.</i>	94
4.2.2. <i>Proceso de elaboración y optimización del plan de mantenimiento.</i>	97
4.2.2.1. Proceso de elaboración	97
4.2.2.1. Fases en la optimización del plan de mantenimiento.	100
4.2.3. <i>Aplicación de modelos matemáticos para la optimización del mantenimiento de material rodante.</i>	103
4.3. APPLICACIÓN AL MANTENIMIENTO DE FLOTAS FERROVIARIAS DE UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE COSTES DE MANTENIMIENTO CON FALLOS REVELADOS.....	106
4.3.1. <i>Descripción general del Modelo de Tiempo de Retardo</i>	106
4.3.2. <i>Variaciones sobre el Modelo General.....</i>	110
4.3.3. <i>Estimación de los parámetros del modelo</i>	110
4.3.3.1 Métodos subjetivos	111
4.3.3.2 Método objetivo.....	114
4.3.4. <i>Transformación del modelo a base anual y cálculo LCC.....</i>	116
4.3.4.1. Cálculo del coste en base anual.....	117
4.3.4.2. Cálculo del Coste de Ciclo de Vida (LCC)	119
4.4. DESARROLLO DE UN MÉTODO GRÁFICO PARA LA APLICACIÓN DEL MODELO	126
4.4.1. <i>Motivación.....</i>	126
4.4.2. <i>Hipótesis del modelo.</i>	128
4.4.3. <i>Resolución gráfica del Modelo de Tiempo de Retardo</i>	130
4.4.4. <i>Resolución gráfica del periodo óptimo de inspección</i>	134
4.4.5. <i>Resolución gráfica del ahorro máximo y cálculo del coste mínimo.....</i>	136
4.4.6. <i>Definición de los límites del dominio de trabajo</i>	141
4.4.7. <i>Estimación del riesgo: apuntamiento y asimetría de la función coste.....</i>	145
4.4.7.1. Variación cualitativa de la forma de la función coste	146
4.4.7.2. Influencia del uso de distribuciones exponenciales en el modelado.....	151
4.4.7.3. Uso del Método Gráfico General para predecir el riesgo.....	158
4.4.8. <i>Categorización en función de riesgo y coste</i>	164
4.8. DESARROLLO DEL MÉTODO GRÁFICO SIMPLIFICADO	166
4.8.1. <i>Motivación.....</i>	166
4.8.2. <i>Nomograma del Método Grafico Simplificado</i>	166

CAPÍTULO 5

VALIDACIÓN DEL MÉTODO GRÁFICO DE OPTIMIZACIÓN Y APLICACIÓN A UN CASO PRÁCTICO DE MANTENIMIENTO DE FLOTAS FERROVIARIAS

169

5.1. VALIDACIÓN DEL MÉTODO GRÁFICO MEDIANTE RESOLUCIÓN DE CASOS PRÁCTICOS RESUELTOS ANÁLITICAMENTE5	170
1.1. <i>Metodología.....</i>	170
5.1.2. <i>Caso de mantenimiento de flota de carretillas.....</i>	172
5.1.3. <i>Caso de mantenimiento de unidades de ventilación.....</i>	181
5.2. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA A LAS PUERTAS EXTERIORES DE UNA EXPLOTACIÓN FERROVIARIA	188
5.2.1. <i>Metodología.....</i>	188
5.2.2. <i>Descripción del caso</i>	189
5.2.3 <i>Resolución analítica del caso.</i>	192
5.2.4. <i>Aplicación del Método Gráfico Simplificado.....</i>	198
5.2.5. <i>Aplicación del Método Gráfico General.....</i>	200
5.2.6. <i>Estimación de la tasa de tiempo de retardo.....</i>	204
5.2.7. <i>Cálculo de Coste de Ciclo de Vida (LCC).....</i>	206
5.3. ADAPTACIÓN DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE COSTES DE MANTENIMIENTO DE FLOTAS DESARROLLADO.	209
5.3.1. <i>Motivación y utilidad</i>	209
5.3.2. <i>Presentación de la herramienta</i>	211
5.3.2.1. Los programas de gestión de costes y el estándar FIEBDC	211

5.3.2.2. El software de gestión de costes "Arquímedes"	214
5.3.3. Proceso de adaptación de la herramienta al mantenimiento ferroviario.....	218
5.3.3. Caso de las puertas exteriores.....	232
CAPÍTULO 6	
APORTACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	238
6.1. APORTACIONES ORIGINALES	239
6.1.2. Revisión del estado del arte sobre modelos matemáticos de optimización de costes de mantenimiento aplicados al mantenimiento de flotas.	239
6.1.3. Aplicación del Método de Tiempo de Retardo al mantenimiento de flotas ferroviarias	240
6.1.4. Desarrollo del Método Gráfico General para la resolución del modelo.....	241
6.1.5. Estudio cualitativo de la variación de forma de la función coste.	243
6.1.6. Análisis de la influencia del uso de exponenciales en el Modelo de Tiempo de Retardo.	246
6.1.8. Desarrollo del Método Gráfico Simplificado	249
6.1.9. Determinación del rango de aplicación del Método Gráfico Simplificado.	251
6.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	252
REFERENCIAS	255
ANEXO I RUTINAS DE PHYTON UTILIZADAS	261

LISTADO DE FIGURAS

- 2.1 Fases de la evolución del mantenimiento.
- 2.2 Fases del ciclo de vida.
- 2.3 Estructura de coste en el ciclo de vida de un activo.
- 2.4 Diferentes roles en la relación cliente-proveedor de material rodante
- 2.5 Modelo LCC de UNILIFE.
 - 3.1 Objetivos de la gestión del mantenimiento.
 - 3.2 Diagrama de decisión para el mantenimiento correctivo y preventivo.
 - 3.3 Factores constituyentes de la política de mantenimiento óptima.
 - 3.4 Esquema de modelo de renovación de intervalo fijo.
 - 3.5 Esquema de modelo de renovación basado en edad.
 - 3.6 Gráfico de Glasser para problemas de reemplazo basados en calendario o intervalo.
 - 3.7 Gráfico de Glasser para problemas de reemplazo basados en edad o envejecimiento.
 - 3.8 Esquema de problemas de reemplazo con fallos no revelados
 - 3.9 Paso de datos observados en mantenimiento condicional a función riesgo mediante el Modelo de Riesgo Proporcional.
 - 3.10 Paso de función riesgo condicional a función de coste.
 - 3.11 Relación temporal entre defecto observable, fallo y tiempo de retardo.
- 4.1 Esquema del Marco Metodológico presentado en este capítulo.
- 4.2 Esquema de la anidación de niveles a la hora de preparar un calendario de mantenimiento preventivo
- 4.3 Diagrama de las diferentes fuentes condicionantes a para confeccionar un plan de mantenimiento preventivo.
- 4.4 Diferentes elementos dentro de cada subsistema pueden exigir políticas de mantenimiento de naturaleza diferente
- 4.5 Esquema simplificado de las diferentes políticas de mantenimiento
- 4.6 Relación temporal entre defecto observable, fallo y tiempo de retardo
- 4.7 Ciclo entre inspecciones con ocurrencia de defecto y tiempo de retardo en su límite superior.
- 4.8 Ciclo entre inspecciones indicando cuando un fallo implicaría penalización y cuando correctivo.
- 4.9 Representación de los valores HCT (Hace Cuanto Tiempo) y CMT(Cuánto Más Tiempo).
- 4.10 Costes por ciclo en función del periodo para una puerta de un coche, en base DIARIA, euros/día en este ejemplo
- 4.11 Costes por ciclo en función del periodo para una puerta de un coche, en base ANUAL, euros/año en este ejemplo
- 4.12 Costes por ciclo en función del periodo para todas las 1440 puertas de una flota, en base ANUAL, euros/año en este ejemplo
- 4.13 Costes por ciclo en función del periodo para todas las puertas de una flota, en base LCC de 30 años, euros/vida útil en este ejemplo
- 4.14 Costes por ciclo en función del periodo de inspección. Representación del coste máximo sin inspección, del coste mínimo y del ahorro en función del periodo.
- 4.15 Periodo óptimo de inspección para obtener ahorro máximo por ciclo en función de la Tasa Corregida de Fallo y el Tiempo de Retardo para $T > t_i$.
- 4.16 Ahorro máximo por ciclo en función de la Tasa Corregida de Fallo y el Tiempo de Retardo para $T > t_i$.
- 4.17 Periodo óptimo de inspección y ahorro máximo por ciclo correspondiente en

- función de la Tasa Corregida de Fallo y el Tiempo de Retardo para $T >> t_i$.
- 4.18. Periodo óptimo de inspección y coeficiente de ahorro por ciclo correspondiente en función de la Tasa Corregida de Fallo y el Tiempo de Retardo para $T >> t_i$. Nomograma para cálculo directo del ahorro máximo según el coste de inspección. Ejemplo: Tasa corregida de fallo 0,058, tasa de tiempo de retardo 0,0055, periodo óptimo 92, coste de inspección 5 y resultado de ahorro máximo 155
 - 4.19. Estudio del dominio del periodo óptimo en función de la tasa de fallo corregida y la tasa de tiempo de retardo. Periodo hasta $T=200$.
 - 4.20. Estudio del dominio del periodo óptimo en función de la tasa de fallo corregida y la tasa de tiempo de retardo. Periodo hasta $T=1000$.
 - 4.21. Costes por ciclo para diferentes tasas de fallo.
 - 4.22. Costes por ciclo para diferentes tasas de tiempo de retardo
 - 4.23. Costes por ciclo para diferentes costes de inspección.
 - 4.24. Costes por ciclo para diferentes costes de penalización.
 - 4.25. Costes por ciclo para diferentes costes de correctivo
 - 4.26. Costes por ciclo para una puerta en función del periodo.
 - 4.27. Funciones de coste en función del periodo para un mismo periodo de $T=1$ día, idéntica tasa de fallo y tasa de tiempo de retardo variable. Curvas llevadas al mismo punto de abscisas para estudiar la forma
 - 4.28. Movimiento por una línea de periodo constante de 10 días, en dirección a menor tasa de tiempo de retorno, hasta la asíntota.
 - 4.29. Familia de curvas de coste en función del periodo antes de homogeneizar la escala de costes (abscisas).
 - 4.30. Familias de curvas de coste para periodos $T=10$, $T=20$ y $T=50$; Escala de costes (abscisas) homogeneizada y tiempo de retardo variable.
 - 4.31. Gráfica de Coste en función del periodo indicando los parámetros grafados para estudiar la variación del apuntamiento en todo el dominio.
 - 4.32. Gráfica de periodo óptimo y ahorro máximo, indicando el gradiente del factor de pérdida de ahorro al duplicar frecuencia de inspección.
 - 4.33. Gráfica de Coste en función del periodo indicando los parámetros grafados para estudiar la variación del apuntamiento en todo el dominio.
 - 4.34. Gráfica de periodo óptimo y ahorro máximo, indicando el gradiente del factor de pérdida de ahorro al efectuar la mitad de inspecciones.
 - 4.35. Funciones Coste en función del Periodo T con idéntico periodo óptimo y apuntamiento pero diferentes valores de coste óptimo.
 - 4.36. Funciones Coste en función del Periodo T con idéntico coste y periodo óptimo y diferentes valores de apuntamiento.
 - 4.37. Clasificación gráfica cualitativa en función de riesgo y coste.
 - 4.38. Nomograma del Método Simplificado. Fuente: Elaboración propia

 - 5.1. Diagrama de rutinas de trabajo de las carretillas en la fundición.
 - 5.2. Función coste en función del periodo de inspección.
 - 5.3. Comprobación de la solución gráfica por medios analíticos .
 - 5.4. Comprobación de la solución gráfica por medios analíticos con $t_i=0$.
 - 5.5. Comprobación de la solución gráfica aplicando el Método Gráfico General.
 - 5.6. Solución gráfica aplicando el Método Gráfico General, nomograma con coste de inspección.
 - 5.7. Solución gráfica aplicando el Método Gráfico Simplificado.
 - 5.8. Solución gráfica del caso práctico de ventiladores hospitalarios.

- 5.9. Solución gráfica del caso práctico de ventiladores hospitalarios reproducida por métodos analíticos y grafiada con hoja de cálculo.
- 5.10. Solución gráfica del caso práctico de ventiladores hospitalarios reproducida por métodos analíticos y grafiada con hoja de cálculo, utilizando idénticas escalas que Baker.
- 5.11. Solución gráfica del caso práctico de ventiladores hospitalarios utilizando el método gráfico general.
- 5.12. Solución gráfica del caso práctico de puertas ferroviarias utilizando métodos analíticos.

- 5.13. Solución gráfica del caso práctico de puertas ferroviarias utilizando métodos analíticos: coste anual totalidad de puertas.
- 5.14. Solución gráfica del caso práctico de puertas ferroviarias utilizando métodos analíticos: coste anual totalidad de puertas escalado apropiadamente .

- 5.15. Aplicación del Método Gráfico Simplificado al caso de las puertas ferroviarias
- 5.16. Aplicación del Método Gráfico General al caso de las puertas ferroviarias .
- 5.17. Aplicación del Método Gráfico General al caso de las puertas ferroviarias .
- 5.18. Coste LCC para la totalidad de las puertas en función del periodo de inspección .
- 5.19. Coste LCC para la totalidad de las puertas en función del periodo de inspección; escalado apropiado para resaltar la solución
- 5.20. Estadillo de costes manuscrito.

- 5.21. Vista general del software de presupuestos indicando capítulo, subcapítulos, partidas, precios unitarios, mediciones y precios totales. con software Arquímedes de Cype Ingenieros
- 5.22. Vista general de una partida paramétrica de una base de precios con software Arquímedes de Cype Ingenieros
- 5.23. Vista anidada de los cuatro capítulos principales. con software Arquímedes de Cype Ingenieros
- 5.24. Vista del árbol mostrando los subcapítulos del capítulo "Sistemas Mecánicos". con software Arquímedes de Cype Ingenieros
- 5.25. Vista del árbol mostrando la descomposición del subcapítulo "Elementos de frenos". con software Arquímedes de Cype Ingenieros
- 5.26. Descomposición de un sistema tipo en preventivo y correctivo con software Arquímedes de Cype Ingenieros
- 5.27. Implementación de los diferentes sumandos del Método de Tiempo de Retardo . con software Arquímedes de Cype Ingeniero
- 5.28. Ejemplo de base de datos de precios desarrollada para el caso . con software Arquímedes de Cype Ingenieros
- 5.29. Ejemplo Coste unitario de cada inspección . con software Arquímedes de Cype Ingenieros
- 5.30. Ejemplo Coste unitario medio de cada reparación . con software Arquímedes de Cype Ingenieros
- 5.31. Ejemplo Coste unitario medio de fallo revelado penalizable . con software Arquímedes de Cype Ingenieros
- 5.32. Ejemplo desglose de tipologías de penalizaciones con la probabilidad de ocurrencia para el equipo bajo estudio. con software Arquímedes de Cype Ingenieros
- 5.33. Vista con descomposición y precios unitarios, a falta de mediciones. con software

- Arquímedes de Cype Ingenieros
- 5.34 Cálculo del porcentaje de costes indirectos. con software Arquímedes de Cype Ingenieros
 - 5.35 Costes indirectos convertidos en capítulo del árbol
 - 5.36 Vista del módulo de control de ejecución del plan de mantenimiento
 - 5.37 Vista del módulo de generación de informes del plan de mantenimiento
 - 5.38 Vista árbol de costes para el caso bajo estudio
 - 5.39 Vista árbol de costes incluyendo costes unitarios para una sola puerta
 - 5.40 Vista árbol de costes incluyendo costes unitarios para todas las puertas
 - 5.41 Cálculo de medición de número de inspecciones
 - 5.42 Cálculo de medición de número de reparaciones de defectos detectados
 - 5.43 Cálculo de medición de número de reparaciones de fallos revelados
 - 6.1. Solución gráfica aplicando el Método Gráfico General, nomograma con coste de inspección.
 - 6.2. Familias de curvas de coste para periodos T=10, T=20 y T=50; Escala de costes (abscisas) homogeneizada y tiempo de retardo variable.
 - 6.3. Clasificación gráfica cualitativa en función de riesgo y coste
 - 6.4. Nomograma del Método Simplificado.
 - 6.5. Aplicación del Método Gráfico General al caso de las puertas ferroviarias
 - 6.6. Cálculo de medición de número de reparaciones de fallos revelados.

LISTADO DE TABLAS

- 2.1. *Magnitud de los costes de los trenes de alta velocidad.*
- 2.2. *Costes y Características de trenes de alta velocidad en España Fuente: Julvez Castillo, López Pita "Estimació econòmica dels costos de manteniment de les línies i el Material d'alta velocitat", 2014*
- 2.3. *Fases de los Costes de Ciclo de Vida incluidas en la revisión de los casos recogidos por Korpi*
- 2.4. *Métodos de estimación de costes aplicados en diferentes casos de estudio*
- 2.5. *División de variables del modelo de cálculo de costes de ciclo de vida*
 - 4.1. *Acotación superior del ratio de coste K.*
 - 4.2. *Acotación inferior del ratio de coste K.*
 - 4.3. *Acotación del rango de estudio de la tasa de fallo.*
 - 4.4. *Acotación del rango de estudio de la tasa corregida de fallo*
 - 4.5. *Variación de forma de la función coste en función de los cinco parámetros principales.*
 - 4.6. *Combinatoria de tipos de distribución y parámetros más frecuente.*
- 5.1. *Variación de periodo óptimo de inspección y coste resultante para $t_i= 0$ y $t_i= 2$.*
- 5.2. *Variación de periodo óptimo de inspección y coste resultante para $t_i= 0$ y $t_i= 1$.*
- 5.3. *Variación de periodo óptimo de inspección y coste resultante para $t_i= 0$ y $t_i= 1$.*
- 5.4. *Parámetros generales de la explotación del caso práctico presentado*
- 5.5. *Variación de periodo óptimo de inspección y coste diario unitario resultante para $t_i= 156$ y $t_i= 195$*
- 5.6. *Variación de periodo óptimo de inspección y coste anual total resultante para $t_i= 156$ y $t_i= 195$*
- 5.7. *Variación de periodo óptimo de inspección y coste anual total resultante para $t_i= 0,5$ y $t_i= 0$*
- 5.8. *Resultados de periodo óptimo, coste mínimo y ahorro máximo para tres tasas de tiempo de retardo*
- 5.9. *Resultados de periodo óptimo, coste mínimo y ahorro máximo para $\beta = 0,1$.*
- 5.10. *Parámetros generales de la explotación el caso práctico presentado*
- 5.11. *Resultados de periodo óptimo, coste mínimo y ahorro máximo para tres tasas de tiempo de retardo.*

LISTA DE ACRÓNIMOS

UIC	Unión Internacional del Ferrocarriles (Union International du Chemins de Fer)
LCC	Costes de Ciclo de Vida (Life Cycle Cost)
MGG	Método Gráfico General
MGS	Método Gráfico Simplificado
FFI	Intervalo de inspección en fallos no revelados (Failure Finding Interval)
PHP	Proceso Homogéneo de Poisson (Homogeneus Poisson Process, HPP)
PNHP	Proceso No Homogéneo de Poisson (Non Homogeneous Poisson Process, NHPP)
Mth	Horas de motor
API	Interfaz de programación de aplicaciones (Application Programming Interface)
FIEBDC	Formato de Intercambio Estándar de Bases de Datos para la Construcción
EDT	Estructura de Descomposición del Trabajo
CMPC	Coste Medio Ponderado del Capital
MTBF	Tiempo medio entre fallos (Mean Time Between Failures)
MDBF	Distancia media entre fallos (Mean Distance Between Failures)
MTTR	Tiempo medio de reparación (Mean Time To Repair)
DTM	Modelo de Tiempo de Retardo (Delay Time Model)
FRA	Agencia federal estadounidense del ferrocarril (Federal Railroad Administration)
FAA	Agencia federal estadounidense de aviación (Federal Air Administration)
GMAO	Mantenimiento Asistidos por Ordenador
VAN	Valor Actual Neto
TPM	Mantenimiento productivo total (Total Productive Maintenance)
RCM	Mantenimiento centrado en la fiabilidad (Reliability Centered Maintenance)

Capítulo 1

Introducción

RESUMEN: En este primer capítulo de la tesis se introduce el marco general. En primer lugar se expone la motivación y relevancia de la investigación y se muestra el planteamiento del problema y los objetivos que se pretenden alcanzar. A continuación, y de forma general, se plantea la metodología aplicada para la consecución de dichos objetivos, presentando tanto el marco teórico como el marco metodológico, desarrollados en capítulos posteriores. Finalmente, se detalla la planificación documental de la tesis.

1.1. Motivación y relevancia

El mantenimiento de flotas ferroviarias constituye un problema de gran relevancia y actualidad. La ejecución de un mantenimiento óptimo conlleva apreciables implicaciones en la sociedad, tanto en materia de seguridad como en materia económica. En lo referente a la parte económica, la problemática del mantenimiento merece una atención equivalente a la del diseño y fabricación del tren, dado que el coste de adquisición suele ser comparable al de mantenimiento a lo largo de su vida útil. La optimización del mantenimiento ferroviario, igual que la optimización del diseño y la fabricación del material rodante, merece por tanto la participación de todas las partes implicadas: fabricantes, administraciones, operadores, mantenedores, etc. e indudablemente, constituye asimismo un campo de investigación de gran relevancia para la comunidad investigadora.

Además de relevante, el campo de la optimización del mantenimiento de flotas resulta de gran actualidad. Las grandes potencias occidentales, y en particular las europeas y Japón, han apostado en estas últimas décadas firmemente por el desarrollo de redes de alta velocidad ferroviarias, dotando a sus países de importantes y renovadas infraestructuras y flotas. Este hecho ha fortalecido a las empresas constructoras de material móvil, que, dotadas con la ventaja competitiva de la experiencia local en alta velocidad, se lanzaron a la internacionalización, extendiendo la revolución de la alta velocidad por todos los mercados. Por tanto, la investigación en la optimización del mantenimiento ferroviario no solo resulta una línea actual, sino que presenta un futuro prometedor, tanto por recorrido como por relevancia.

Sin embargo, aunque la optimización del mantenimiento en general es un campo de trabajo muy activo desde el punto de vista científico, la aplicación al campo de mantenimiento de flotas es sensiblemente menor. Uno de los factores de este nivel de producción científica por debajo de lo esperado es probablemente el enfoque eminentemente práctico y técnico del sector ferroviario, que unido con la concepción intrínseca del mantenimiento más tradicional - reactivo -, ha mantenido distante en cierta medida la investigación de la problemática existente.

La motivación de esta investigación queda justificada entre otros factores por la relevancia y actualidad de la problemática de la optimización del mantenimiento de flotas ferroviarias, habiendo resultado de estímulo también la exigüidad de las investigaciones sobre el particular.

1.2. Objetivos y alcance

La optimización del mantenimiento de flotas ferroviarias es un campo amplio y multidisciplinar, por lo que la acotación inicial de los objetivos y el alcance del trabajo en función de las potenciales aportaciones que se pudiesen devengar resulta imprescindible.

Cuando se habla de optimización en términos de mejora continua es común en diferentes sectores industriales referirse a términos de gestión. A medida que han avanzado las teorías de organización industrial, el sector del mantenimiento ferroviario se ha ido adaptando y acogiendo a las que ha considerado más oportunas. Así, técnicas desarrolladas en la fabricación del automóvil han sido transferidas con mayor o menor éxito al campo del mantenimiento, y en particular al mantenimiento ferroviario. Filosofías de gestión como el Mantenimiento Productivo Total, (o en inglés Total Productive Maintenance, TPM) o el Mantenimiento Basado en la Fiabilidad (o en inglés Reliability Centered Maintenance, RCM) o incluso las normas de gestión de la calidad (ISO 9000, etc...) han sido adaptadas y son aplicadas en muchas explotaciones ferroviarias.

Sin embargo, los objetivos de esta investigación en cuanto a optimización no se han centrado en las filosofías y herramientas de gestión, sino que se ha pretendido desarrollar un modelo analítico para el estudio de los costes de mantenimiento bajo la filosofía de Costes de Ciclo de Vida LCC, estudiando los principales parámetros de optimización del plan de mantenimiento desde la perspectiva de la ingeniería de la fiabilidad.

Los objetivos quedan desglosados en varios puntos fuertemente relacionados que reflejan lo multidisciplinar del problema:

1. El estudio de la optimización del plan de mantenimiento utilizando el enfoque de Costes de Ciclo de Vida LCC es uno de los objetivos principales de la investigación. Como se expone en el Capítulo 2, la elección de esta herramienta no es aleatoria, sino que viene impuesta por las tendencias de contratación en el sector ferroviario, en el que es práctica habitual de las Administraciones (u otros entes adquirentes) el comparar las ofertas de los diferentes fabricantes de material rodante en base a su Coste de Ciclo de Vida LCC.

La elaboración de un modelo de Coste de Ciclo de Vida LCC presenta en su nivel más general una doble problemática:

- a) El cálculo del coste de mantenimiento de una anualidad, y
- b) el estudio de su variación en anualidades posteriores y su descuento al momento actual.

El objeto de esta investigación se ha centrado en la optimización del primer aspecto, el cálculo del coste de mantenimiento de una anualidad. El segundo aspecto constituye un problema del ámbito de la econometría y la gestión del riesgo, pues la proyección de la variación de los costes de mantenimiento y el cálculo de su valor actual neto (VAN) requiere el estudio de variables como la tasa de descuento a utilizar, los tipos de cambio, los fenómenos inflacionarios locales y otras variables macroeconómicas. Aunque la investigación no ha profundizado en estos aspectos, en el Capítulo 4 se introduce en mayor extensión la problemática.

En cuanto al coste de mantenimiento de una anualidad, se calcula utilizando el plan de mantenimiento según lo expuesto en el Capítulo 4. Dado que en gran medida la optimización del plan de mantenimiento de la flota implica la optimización del mantenimiento de cada uno de sus componentes (flota, trenes, coches, sistemas y subsistemas), de un modo natural, el objetivo inicial de la optimización bajo el enfoque de Costes de Ciclo de Vida ha orientado la investigación hacia la optimización del mantenimiento de sistemas en función de la fiabilidad, que conforma la parte del todo a estudiar.

2. Un segundo objetivo, anidado en cierto modo bajo el anterior, es la selección de un modelo de optimización del mantenimiento basado en la fiabilidad y su adaptación a la casuística del mantenimiento de flotas ferroviarias.

La ingeniería de la fiabilidad y en particular el estudio de la optimización del mantenimiento es un campo prolífico en teorías y modelos matemáticos, por lo que el primer objetivo es seleccionar la familia de modelos de posible aplicación al caso del material rodante. El Capítulo 3 recoge una revisión de los principales modelos de optimización del mantenimiento, discutiendo la aplicabilidad de cada tipología a la investigación.

Una vez seleccionados los modelos, el estudio pretende llevar a cabo una adaptación de los mismos para así aplicarlos en la obtención de la combinación óptima de mantenimiento preventivo y correctivo de los sistemas que conforman un tren. La adaptación preferiblemente debe de simplificar la aplicación del modelo matemático para que pueda resultar de utilidad a la hora de su aplicación a un sistema complejo, como es una flota. En el Capítulo 4 se detalla el modelo seleccionado y su adaptación al caso

ferroviario, que ha resultado en el desarrollo de ciertos métodos gráficos de resolución.

3. Un tercer objetivo es lograr que el modelo seleccionado y adaptado a utilizar para el cálculo del Coste de Ciclo de Vida sea de utilidad para llevar a cabo análisis de sensibilidad de los sistemas y subsistemas bajo estudio. Dado que el mantenimiento de un sistema suele estar condicionado a múltiples factores en su operativa diaria (frecuencia de visitas del tren al taller, disponibilidad de recursos para realizar un mantenimiento en un momento particular, combinación con otros mantenimientos....), es importante poder valorar el impacto de una decisión diferente de óptima.

Los métodos gráficos desarrollados expuestos en el Capítulo 4 y validados en el Capítulo 5 permiten llevar a cabo análisis de sensibilidad de cada sistema bajo estudio con gran sencillez y agilidad.

4. Finalmente y a la vista de la complejidad del problema, se pretende adaptar una herramienta informática universal de cálculo de costes para acoger el modelo de optimización del mantenimiento en función de la fiabilidad desarrollado.

La transferencia de tecnología entre campos de la ingeniería es tradicionalmente motor de mejora continua proponiéndose en esta investigación el aprovechar el conocimiento y herramientas desarrolladas durante las últimas décadas en el campo de la ingeniería de la construcción y trasladarlas al campo de la ingeniería del mantenimiento. El tamaño y complejidad de los proyectos de construcción así como la profusión de los mismos ha impulsado el desarrollo de diferentes soluciones informáticas de gestión de costes de gran potencia y versatilidad. Sin embargo, en el campo de la ingeniería del mantenimiento no existen herramientas universalmente aceptadas para el cálculo de costes y optimización de los plan de mantenimiento ferroviarios. Diferentes herramientas informáticas se utilizan en para suplir esta carencia:

- Herramientas de Gestión del Mantenimiento Asistidas por Ordenador (GMAO), principalmente centradas en la gestión de la explotación (contabilidad, repuestos, órdenes de trabajo, etc...)
- Herramientas de ingeniería de la fiabilidad, utilizadas para el cálculo de tasas de fallo, ajustes de distribuciones mediante ensayos acelerados de vida, etc...
- Herramientas científicas de optimización de costes de mantenimiento, que resuelven algunos de los cientos de modelos matemáticos de

optimización existente, frecuentemente desarrolladas por los creadores del modelo.

- Herramientas de cálculo de costes de mantenimiento de flotas ferroviarias, como las desarrolladas por UNIFE sobre una hoja de cálculo con el mero objeto de unificar criterios de cálculo de Coste de Vida útil .

En el apartado 3 del Capítulo 5 se expone el escenario actual en la materia, constatando lo apropiado del objetivo inicialmente planteado. Se pretende, por tanto, adaptar una herramienta informática proveniente del mundo de la planificación y control de costes en los proyectos de construcción para que incluya el modelo de cálculo desarrollado y permita disfrutar de la potencia de una herramienta de gestión de costes de uso universal y a su vez utilizar fácilmente el modelo de optimización del mantenimiento en función de la fiabilidad.

1.3. Método de trabajo

El documento aquí presentado ha quedado dividido en seis capítulos que reflejan el método de trabajo y pueden a su vez, ser ordenados según su condición en cuatro bloques:

1. Marco general introductorio recogido en el *CAPÍTULO 1*
2. Marco teórico, dividido en dos partes claramente diferenciadas correspondientes a los *CAPÍTULOS 2 Y 3*
3. Marco metodológico expuesto en el *CAPÍTULO 4* y validado en el *CAPÍTULO 5*
4. Aportaciones, resumidas en el *CAPÍTULO 6*.

En el presente *CAPÍTULO 1* se introduce el marco general, resaltando la motivación y relevancia de la investigación y se muestra el planteamiento del problema y los objetivos que se pretenden alcanzar.

A continuación comienza el bloque correspondiente al marco teórico, en el que se presentan los conceptos y teorías necesarios para enmarcar la investigación desarrollada, revisando los conceptos y el estado del arte relativos al dos campos claramente diferenciados e igualmente necesarios para entender el problema planteado:

Por una parte, en el *CAPÍTULO 2* se revisa el estado del arte del mantenimiento de flotas y su evolución, haciendo hincapié en su relevancia desde el punto de vista económico y discutiendo cómo la internacionalización del sector y los procesos de adquisición mediante evaluación del Coste de Ciclo de Vida (LCC) han impulsado el campo de la optimización del mantenimiento. A continuación se recoge la conceptualización que diferentes autores han llevado a cabo sobre la gestión de activos físicos aplicando la filosofía de Costes de Ciclo de Vida (LCC), discutiendo las ventajas e inconvenientes de cada planteamiento. Por último, se centra la investigación en la aplicación de la filosofía de Costes de Ciclo de Vida (LCC) al mantenimiento de flotas ferroviarias, presentando tanto las experiencias de los principales operadores europeos como las últimas investigaciones en dicho campo.

El segundo capítulo constituyente del marco teórico es el *CAPÍTULO 3*, en el que se introducen los conceptos básicos referentes a los modelos matemáticos de optimización de costes de mantenimiento, con la extensión mínima necesaria para encuadrar la investigación desarrollada y presentada posteriormente en los Capítulos 4 y 5.

Inicialmente en este tercer capítulo se presentan los principales factores constituyentes de las políticas de mantenimiento, ilustrando la complejidad de seleccionar la estrategia adecuada entre los modelos matemáticos existentes. A continuación se procede a introducir brevemente los modelos básicos de renovación basado en intervalos o en edad, los modelos de mantenimiento basado en la condición y los modelos de inspección de sistemas con fallos revelados y no revelados. Una vez presentadas las diferentes teorías se justifica la idoneidad de los Modelos de Tiempo de Retardo para la resolución de problemas de optimización en sistemas con fallos revelados.

Una vez presentado el marco teórico necesario para afrontar la investigación, el CAPÍTULO 4 recoge tanto el planteamiento concreto de la investigación como el marco metodológico, en el que se exponen los procesos seguidos para la resolución del problema, seleccionando y aplicando las herramientas necesarias para afrontar la problemática presentada. Inicialmente, en el apartado 4.2., *se presenta la problemática* en cuestión, partiendo del planteamiento general de la optimización económica del mantenimiento de flotas ferroviarias en función de la fiabilidad. Se introducen las variables principales y en general se describe el escenario a modelar y optimizar.

A continuación se describe la parte del todo bajo investigación, que es la optimización mediante la actuación en las políticas de inspecciones periódicas en un escenario de fallos revelados penalizables. La optimización de dichas inspecciones constituye el problema principal de la tesis, desacoplándose del resto de posibles acciones de mantenimiento. En general, se describen todas las posibles políticas de mantenimiento a seguir, indicando las herramientas matemáticas necesarias para su optimización como parte de futuras investigaciones.

También en este primer apartado se justifica la selección del método de optimización que se utilizará en la investigación, frente al resto de metodologías presentadas en el CAPÍTULO 3 como parte del marco teórico. Esta metodología, denominada "Modelo de Tiempo de Retardo", presenta claras ventajas tanto en su base matemática como en su aplicación práctica al mantenimiento de flotas, quedando su idoneidad justificada como conclusión de la sección.

Seguidamente, en el tercer apartado, se comienza introduciendo la teoría matemática denominada "Modelo de Tiempo de Retardo" y su adaptación al caso del mantenimiento de flotas ferroviarias. Esta metodología es la herramienta que se ha utilizado como base en la investigación para desarrollar los métodos gráficos presentados en los siguientes apartados de este capítulo. Como paso previo al desarrollo de los métodos gráficos, se estudia la adaptación de la teoría general del "Modelo de Tiempo de Retardo" al campo del

mantenimiento de flotas ferroviarias. Continúa este segundo apartado por tanto, profundizando en el "Modelo de Tiempo de Retardo", explicando tanto las hipótesis del mismo como sus variantes principales y los métodos matemáticos necesarios para la determinación de sus principales parámetros, técnicas que serán aplicadas a un caso práctico ferroviario en el *CAPÍTULO 5*.

Este mismo apartado prosigue exponiendo la vinculación de los resultados obtenidos por la aplicación del "Modelo de Tiempo de Retardo" al entorno del mantenimiento ferroviario. Se expone el procedimiento adoptado para la transposición de los resultados obtenidos de coste y periodo óptimo a base anual, hasta llegar al cálculo del Coste de Ciclo de Vida (LCC) . La creciente relevancia en el sector del concepto de Coste de Ciclo de Vida (LCC) quedó argumentada en el *CAPÍTULO 3* como parte del marco teórico. Finalmente, el apartado describe la adaptación de una herramienta informática de cálculo de costes de mantenimiento. Esta herramienta permite estimar los costes de mantenimiento preventivo y correctivo aplicando los métodos de analogía e ingeniería descritos en el *CAPÍTULO 3*.

En general, la aplicación del "Modelo de Tiempo de Retardo" al caso del mantenimiento de flotas ferroviarias constituye en sí una novedad y a su vez abre nuevas vías de investigación que se citan a lo largo del texto y quedan resumidas en el *CAPÍTULO 6*. La adaptación de la citada herramienta informática resulta también una aportación más de esta investigación. Sin embargo, la selección de la variante del Método de Tiempo de Retardo y su adaptación al caso de flotas ferroviarias hubiese constituido una investigación de interés científico pero de limitada aplicación en el campo de la ingeniería.

El último apartado de este *CAPÍTULO 4* expone el método gráfico desarrollado como parte de esta investigación para la resolución del "Modelo de Tiempo de Retardo", así como su aplicación particular al caso del mantenimiento de flotas.

El grado de complejidad matemática y conceptual del "Modelo de Tiempo de Retardo" dificulta su aplicación en explotaciones reales, en las que los recursos suelen ser escasos tanto en lo concerniente a datos históricos como en personal técnico formado en teoría de optimización del mantenimiento.

Por tanto, llegado a este punto los objetivos inicialmente exigidos al modelo se concretan en:

- Facilitar, mediante el desarrollo de ábacos, la obtención del periodo de inspección óptimo que implica un coste de mantenimiento anual mínimo aplicando el "Modelo de Tiempo de Retardo" .

- Poder entender, mediante una sencilla interpolación visual en un ábaco, el impacto del posible error cometido al estimar las variables de entrada del problema. Este aspecto resulta fundamental, pues la naturaleza de una explotación ferroviaria queda lejos de las condiciones estándar de un hipotético laboratorio, y por tanto los valores obtenidos están sujetos a error. Así pues, la interpolación visual en ábacos permite al usuario llevar a cabo un análisis de sensibilidad inmediato, sustituyendo el costoso proceso de aplicación analítica del "Modelo de Tiempo de Retardo".
- Finalmente, la aplicación de los ábacos desarrollados permiten al usuario deducir la desviación en coste frente al óptimo al variar el periodo de inspección frente al óptimo. Esta práctica resulta de gran utilidad, pues la práctica de una explotación ferroviaria no suele permitir el ajuste de las frecuencias de inspección a los valores óptimos, sino que resulta habitual llevar a cabo las acciones de mantenimiento acopladas a otras acciones aprovechando lo que se denomina en términos de modelos matemáticos de optimización, "mantenimiento en grupo".

La segunda parte de marco metodológico se recoge en el CAPÍTULO 5 y consiste en la validación del método gráfico por medio de su aplicación a casos prácticos del Método de Tiempo de Retardo ya resueltos por métodos analíticos, para a continuación demostrar su utilidad en un caso de mantenimiento de flotas ferroviarias.

En primer lugar se comienza aplicando tanto el Método Gráfico General como el Método Gráfico Simplificado, ambos desarrollados en esta investigación, a varios casos prácticos resueltos por terceros por métodos analíticos y publicados en revistas de reconocido prestigio.

Una vez demostrada la validez del método, se procede a su aplicación a un caso práctico de mantenimiento de flotas ferroviarias, haciendo hincapié en su utilidad para la optimización económica del mantenimiento de flotas, y en particular en el enfoque de Costes de Ciclo de Vida "LCC". En la aplicación del caso práctico de flotas ferroviarias se comienza analizando el contexto desde el punto de vista del mantenedor, estimando los costes por medio de una herramienta informática adaptada a la aplicación. A continuación se resuelve el caso analíticamente y se comprueban los resultados obtenidos aplicando tanto el Método Gráfico General como por el Método Gráfico Simplificado, concluyendo los rangos de aplicación de cada hipótesis aplicada así como la utilidad de los modelos.

Finalmente se presenta la adaptación de una herramienta informática de gestión de costes, que se ha adecuado para incorporar el modelo desarrollado. Se adapta

una herramienta informática proveniente del mundo de la planificación y control de costes en los proyectos de construcción para que contenga el modelo de cálculo desarrollado y permita disfrutar de la potencia de una herramienta de gestión de costes de uso universal y a su vez utilizar fácilmente el modelo de optimización del mantenimiento en función de la fiabilidad.

Por último, una vez llegado a este punto de la investigación se recogen en CAPÍTULO 6 las conclusiones obtenidas, enumerándose las aportaciones originales descritas a lo largo de la tesis. Finalmente se proponen las futuras líneas de investigación que se abren a partir del trabajo llevado a cabo.

1.4. Estructura del documento

El documento aquí presentado ha quedado dividido en seis capítulos, que se pueden a su vez clasificar en cuatro categorías: Introducción, Marco Teórico, Marco Metodológico y finalmente, las principales aportaciones.

La tesis comienza describiendo, en su *CAPÍTULO 1* las motivaciones, objetivos, alcance y método de trabajo de la investigación llevada a cabo. Se trata pues de un capítulo introductorio que tiene como objeto presentar la investigación.

A continuación, en el *CAPÍTULO 1* y en el *CAPÍTULO 2* se recoge el marco teórico. En estos capítulos se presentan los conceptos y teorías necesarios para enmarcar la investigación desarrollada, revisando los principales conceptos y el estado del arte, criticando y discutiendo la idoneidad de las aportaciones de diferentes autores a esta investigación.

En el *CAPÍTULO 2* se revisan los conceptos y el estado del arte relativos al mantenimiento de flotas ferroviarias y al cálculo y análisis de los costes de mantenimiento bajo el enfoque de Costes de Ciclo de Vida (LCC).

En el *CAPÍTULO 3* se introducen como parte del Marco Teórico, los conceptos básicos referentes a los modelos matemáticos de optimización de costes de mantenimiento, con la extensión necesaria para encuadrar la investigación desarrollada y presentada posteriormente. En este capítulo, y una vez presentadas las diferentes teoría, se procede a justificar la idoneidad de los Modelos de Tiempo de Retardo para la resolución de problemas de optimización en sistemas con fallos revelados en el campo del mantenimiento de flotas ferroviarias.

A continuación, en el *CAPÍTULO 1* y en el *CAPÍTULO 2* se expone el marco metodológico adoptado en la investigación en el que se exponen los procesos seguidos para la resolución del problema, seleccionando y aplicando las herramientas necesarias para afrontar la problemática presentada.

En el *CAPÍTULO 4* se presenta tanto el planteamiento concreto de la investigación como el marco metodológico. Inicialmente se justifica la selección del "Modelo de Tiempo de Retardo" como herramienta de optimización económica del mantenimiento de flotas ferroviarias en función de la fiabilidad, detallando el procedimiento adoptado para la transposición de los resultados obtenidos hasta llegar al cálculo del Coste de Ciclo de Vida (LCC). Por último se revela el método gráfico desarrollado como parte de esta investigación para la resolución

del "Modelo de Tiempo de Retardo", así como su aplicación particular al caso del mantenimiento de flotas.

En el *CAPÍTULO 5* se valida del método gráfico por medio de su aplicación a casos prácticos de aplicación del Método de Tiempo de Retardo ya resueltos por métodos analíticos, para a continuación demostrar su utilidad en un caso de mantenimiento de flotas ferroviarias estudiando en particular los resultados bajo el enfoque de Costes de Ciclo de Vida "LCC", concluyendo los rangos de aplicación de cada hipótesis aplicada así como la utilidad de los modelos gráficos general y simplificado. Finalmente se introduce la adaptación de una herramienta informática de gestión de costes, que se ha adaptado para incorporar el modelo desarrollado.

En el capítulo final, *CAPÍTULO 6* se recogen las conclusiones obtenidas en el desarrollo de la investigación llevada a cabo enumerándose las aportaciones originales descritas a lo largo de la tesis. Como colofón, se proponen las futuras líneas de investigación que se abren a partir del trabajo de investigación llevado a cabo.

Capítulo 2

EL COSTE DE CICLO DE VIDA (LCC) EN EL MANTENIMIENTO DEL MATERIAL RODANTE: OPTIMIZACIÓN DE LA GESTIÓN DE ACTIVOS EN BASE A LA FIABILIDAD

RESUMEN: Este capítulo presenta los conceptos y teorías necesarios para enmarcar la investigación desarrollada, revisando los conceptos y el estado del arte relativos al mantenimiento de flotas ferroviarias y en particular al cálculo y análisis de los costes de bajo el enfoque de cálculo de Costes de Ciclo de Vida (LCC). Para ello, y en primer lugar, se introduce el tema del mantenimiento de flotas y su evolución, haciendo hincapié en su relevancia desde el punto de vista económico y discutiendo cómo la internacionalización del sector y los procesos de adquisición mediante evaluación del Coste de Ciclo de Vida (LCC) han impulsado el campo de la optimización del mantenimiento. A continuación se recoge la conceptualización que diferentes autores han llevado a cabo sobre la gestión de activos físicos aplicando la filosofía de Costes de Ciclo de Vida (LCC), discutiendo las ventajas e inconvenientes de cada planteamiento. Por último, se centra la investigación en la aplicación de la filosofía de Costes de Ciclo de Vida (LCC) al mantenimiento de flotas ferroviarias, presentando tanto las experiencias de los principales operadores europeos como las últimas investigaciones en dicho campo.

2.1. El mantenimiento del material rodante: magnitudes y evolución.

Según la Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC, 2010), los costes de mantenimiento de un tren de alta velocidad a lo largo de su vida útil son similares a los de adquisición. Así, la Unión Internacional de Chemins de Fer, UIC estima el coste de adquisición de un tren de 350 plazas en 20-25 MM€ y un coste de mantenimiento de 1M€ anual (2€/km para 500.000 km/tren y año) durante una vida útil de 20-25 años. Es decir, el coste de mantenimiento de un tren de pasajeros se estima será similar al coste inicial de compra.

MAGNITUD DE LOS COSTES DE LOS TRENES DE ALTA VELOCIDAD.	
COSTES MEDIOS EN EUROPA	
Construcción de 1 km de nueva línea de alta velocidad	€12-30M
Mantenimiento de 1 km de nueva línea de alta velocidad	70.000 €/año
Coste de un tren de alta velocidad (350 plazas)	€20-25M
Mantenimiento de un tren de alta velocidad (2€/km-500,000 km/tren y año)	€1 M/año

Tabla 2.1. : Magnitud de los costes de los trenes de alta velocidad. Fuente: UIC Brochure: High speed rail Fast track to sustainable mobility.

De acuerdo a estas mismas estimaciones, la construcción de una línea de 300 km costaría 3600-9000 MM€ y 21MM€ anuales de mantenimiento durante la vida útil. Si sobre esa línea circulan treinta trenes, el coste de mantenimiento de los mismos - 30M€/año - resultará similar al coste de mantenimiento de la vía. El coste de construcción de la infraestructura es sensiblemente más elevado, pero la vida útil de la infraestructura (40-60 años) dobla o incluso tripla la del material rodante, por lo que los costes de inversión inicial y mantenimiento de infraestructura y material resultan, para un ejemplo como el expuesto, de órdenes de magnitud comparables.

En España se han invertido centenares de millones de euros en la creación de un sistema ferroviario de alta velocidad, que implicará importantes inversiones en mantenimiento durante las próximas décadas. En la siguiente tabla se observan algunos valores de compra de material rodante de alta velocidad, en línea con las estimaciones de la UIC con Sin embargo, siendo el mantenimiento ferroviario un campo de gran relevancia económica no solo en España sino en Europa y cada vez más en Asia y América, resulta inquietante la escasez de producción

académica y de oferta educativa especializada en el campo de la ingeniería de mantenimiento ferroviario.

COSTES Y CARACTERÍSTICAS DE TRENES DE ALTA VELOCIDAD EN ESPAÑA						
TRENES DE HASTA 350 KM/H						
DENOMINACIÓN	€/PLAZAS SENTADO	M€/ UNIDAD	UNIDADES ADQUIRIDAS	VALOR DEL CONTRATO	PLAZAS POR UNIDAD	AÑO DE RECEPCIÓN
AVE Serie 100	75.579 €	24,87	18	447,66	329	1992
Euromed Serie 101	76.633 €	24,37	6	146,22	318	1994
AVE Serie 102	77.772 €	24,74	16	395,84	318	2003-2006
AVE Serie 112	61.552 €	22,47	30	674,1	365	2009-2010
Velaro Serie 103	74.107 €	29,94	16	479,04	404	2005
Velaro Serie 103 Segunda compra	63.922 €	25,82	10	258,2	404	2007

Tabla 2.2. : Costes y Características de trenes de alta velocidad en España Fuente: Julvez Castillo, López Pita "Estimació econòmica dels costos de manteniment de les línies i el Material d'alta velocitat", 2014

Haciendo una analogía histórica con el sector de la aviación civil, se observa que a partir de la década de los sesenta el desarrollo de la aviación comercial en Estados Unidos impulsó el rápido desarrollo científico y técnico de la Ingeniería de la Confiabilidad. Hasta entonces las compañías aéreas llevaban a cabo un mantenimiento programado (preventivo) en base a períodos recomendados por los fabricantes. Sin embargo, a la vista de los pobres resultados de fiabilidad, disponibilidad y seguridad de la flota, la Administración responsable de la aviación civil (FAA) estableció un grupo de trabajo para la investigación y mejora de las técnicas utilizadas en el mantenimiento preventivo, en particular para estudiar la evolución de la fiabilidad con la edad y así clarificar desde un punto de vista las condiciones que debe cumplir un mantenimiento programado para ser eficaz. (Redondo 2007). El impulso del gobierno americano al sector aeroespacial en esa década y la carrera militar fueron las dos claves para que el campo de la fiabilidad y con ello de la ingeniería de la mantenimiento evolucionaran de manera vertiginosa en las siguientes décadas. La investigación y el desarrollo de las tecnologías de mantenimiento existentes surgen pues a partir de la demanda de los sectores de aviación, espacial y armamentísticos en los Estados Unidos, de donde pasan a ser utilizados por las grandes instalaciones industriales americanas (refinerías, plantas químicas, centrales nucleares, etc...) que han expandido este conocimiento a través de sus plantas distribuidas en todo el mundo.

Sin embargo, no ha sido la industria americana sino la europea la que ha protagonizado la revolución de la alta velocidad ferroviaria. Así, durante las últimas tres décadas, se ha diseñado y construido tanto infraestructura como material rodante innovador, generando una nueva etapa en la historia ferroviaria: La Alta Velocidad.

El desarrollo en diseño y construcción se encontró con un sector ferroviario en el que no era habitual que se utilizaran las técnicas de ingeniería de mantenimiento que ya se utilizaban en otros sectores como la aviación. Tradicionalmente el mantenimiento de material rodante se llevaba a cabo en base a los planes de mantenimiento del fabricante del material rodante. Dado que luego era el mismo fabricante (habitualmente uno o dos por país) el que resultaba concesionario del mantenimiento de la flota ferroviaria, no había grandes presiones del mercado para optimizar los costes del mantenimiento de flotas. Esta optimización implicaba la costosa transferencia al sector ferroviario de técnicas avanzadas de mantenimiento que conllevaban la creación de departamentos de ingeniería de fiabilidad, introducción de sistemas informáticos de recogida y tratamiento de datos, la monitorización en tiempo real de variables en los trenes, etc....

Durante la década de los noventa y de un modo acelerado en la primera década del dos mil, el mercado ferroviario en general y de la alta velocidad en particular ha experimentado un importante cambio - su internacionalización - que ha impulsado de manera definitiva la modernización de las técnicas de ingeniería de mantenimiento aplicadas a material rodante. Gracias al desarrollo sobresaliente de equipos de alta velocidad y de transporte urbano, los fabricantes europeos de material rodante, que desde su fundación habían servido habitualmente a un solo cliente - la Administración ferroviaria de su país de origen-, se lanzaron a la comercialización de sus productos en todo el mundo. Los fabricantes comenzaron a competir por cuantiosos contratos en todos los países del mundo, y las Administraciones ferroviarias de países tan dispares como Estados Unidos o Kazajstán necesitaban herramientas para poder comparar de manera objetiva diferentes tecnologías de material rodante tanto en coste como en prestaciones. Las administraciones reforzaron sus políticas de compra basados en Costes de Ciclo de Vida (CCV o LCC en su acrónimo inglés más popular) con importantes penalizaciones asociadas a la calidad del mantenimiento. En un concurso LCC los costes y la calidad de mantenimiento son decisivos puesto que se cuantifican con detalle y ponderan con gran peso sobre el total. En un mercado abierto, en el que la oferta y la demanda son internacionales, la supervivencia de las empresas del sector radica a día de hoy en la adjudicación de estos concursos y ha sido esta competencia la que ha conseguido que la ingeniería de mantenimiento ferroviaria haya cambiado

drásticamente en pocos años, creciendo en peso en las organizaciones y tecnificándose rápidamente.

Los planes de mantenimiento ya no son una mera copia del existente, que a su vez se basaba en la experiencia del un modelo de tren inmediatamente anterior. La aplicación de métodos y tecnologías innovadoras aplicadas al mantenimiento ferroviario ha demostrado en casos reales incrementos en la productividad y servicio con ahorros de hasta el 23%, con inversiones que pueden amortizarse en periodos inferiores a dos años (González, 2012).

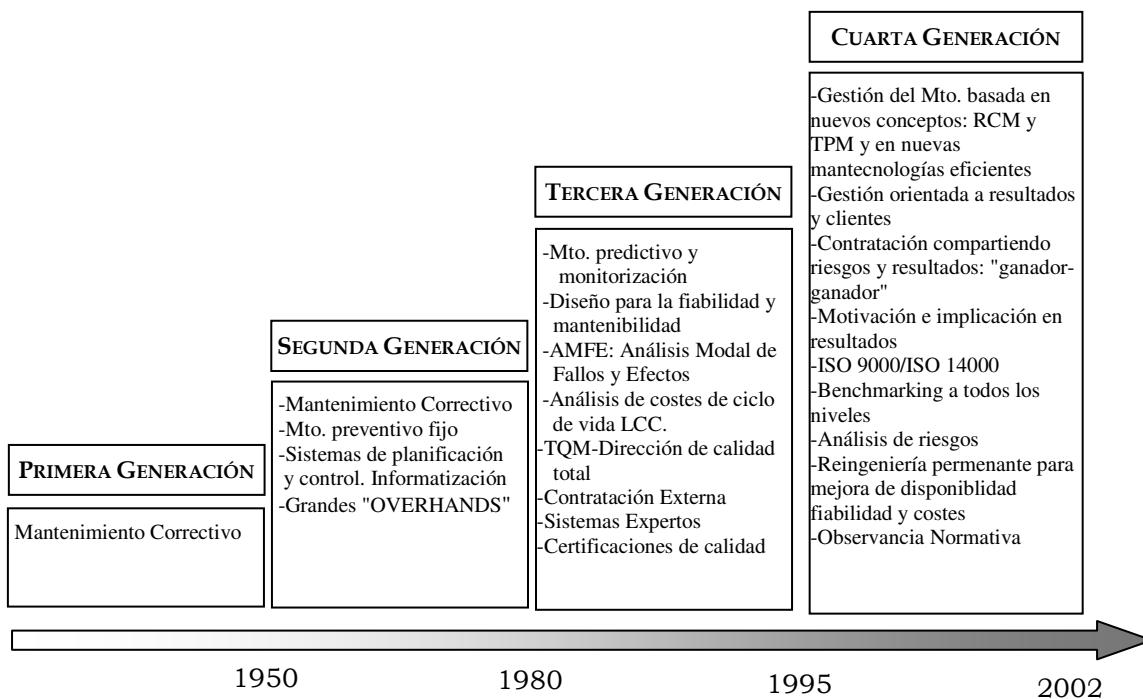


Figura 2.1. : Fases de la evolución del mantenimiento. Fuente:
González 2012.

Diferentes autores (Malcom 2013; González 2012) establecen diferentes fechas o hitos en la evolución del mantenimiento, pero suelen coincidir en dividir en cuatro etapas (algunos optan por cinco) los avances en el campo del mantenimiento. Al analizar la evolución en el campo ferroviario se observa como uno de los principales factores que ha impulsado el desarrollo del mantenimiento ha sido la implantación de las exigencias de cálculo de Coste de Ciclo de Vida (LCC). Por tanto, se ha considerado relevante investigar el estado del arte en la aplicación de esta filosofía al campo del mantenimiento de flotas, quedando los resultados expuestos en los siguientes apartados.

2.2. El análisis del Coste del Ciclo de Vida (LCC) y la gestión de activos físicos

2.2.1. Definiciones

A medida que mejora la técnica existe una exigencia creciente para que los productos no solo cumplan con sus objetivos de diseño y sean seguros y fiables sino que también compitan en costes de adquisición, propiedad y eliminación. El análisis del coste del ciclo de vida es la formulación que valora de un modo sistemático los costes en cada fase, aportando información relevante a todas las partes implicadas en la vida del producto - diseñadores, propietarios, mantenedores, usuarios, etc... - para la optimización general del mismo, así como en el proceso de toma de decisiones de cada fase - adquisición, mantenimiento, etc...-

El Coste de Ciclo de Vida (LCC) resulta de la traducción del término anglosajón Life Cycle Costing y habitualmente se denota en la bibliografía por su acrónimo "Costes LCC".

La norma europea UNE-EN 60300 parte 3 referente al Cálculo del Coste de Ciclo de Vida (LCC), define el cálculo del Coste de Ciclo de Vida (LCC) como "Proceso de análisis económico para determinar el coste del ciclo de vida del producto durante su ciclo de vida o una parte del mismo" siendo el ciclo de vida el "intervalo de tiempo entre la concepción del producto y su eliminación" y el LLC el "coste acumulado del producto durante su ciclo de vida".

Hace varias décadas (White and Ostwald 1976) ya formulaban una definición similar "El Coste de Ciclo de Vida (LCC) de un artículo es la suma de todos los fondos gastados en sufragar el artículo desde su concepción y fabricación, durante su operación y hasta el final de su vida útil". Diferentes definiciones (Kirt and Dellisola, 1996), (Woodhouse 1991), no hacen sino abundar en los mismos términos.

Además del enfoque LCC, existen otros modelos similares con una visión más amplia (Korpi, E. 2008), como son el Coste Total de Propiedad (Total Cost of Ownership - TCO) y en menor medida el denominado Gestión del Ciclo de Vida (Life Cycle Assessment - LCA). También existen conceptos con una visión más concreta, como el Life Support Cost-LSC, en el que se eliminan algunos de los términos del global, como son en el caso de las flotas ferroviarias el coste de operación de las mismas para centrarse en los costes de mantenimiento.

"El Coste Total de Propiedad" es una herramienta de compras y una filosofía dirigida a la comprensión del verdadero coste de adquisición de un activo en

particular o un servicio de un particular" (Ellram, 1995). Se trata por tanto de una aplicación orientada a la adquisición, utilizada habitualmente para la selección y valoración de proveedores (Bhutta and Huq, 2002) tanto en las Administraciones públicas como en empresas privadas. Se trata por tanto de una herramienta de gestión de compras.

El término "Análisis de Costes de Ciclo de Vida e Impacto Ambiental" presenta sin embargo un punto de vista orientado a la gestión medioambiental del activo, orientada a minimizar el impacto ambiental del producto (Emblemsvåg, 2001) sin llegar a ser una herramienta de costes.

Existen otras metodologías dentro del mismo campo como: Análisis de Costes Totales de Activos de Producción, Modelo de Costes Basado en Actividades, entre otras (Durairaj and Ong, 2002)

2.2.2. Antecedentes históricos

Existen numerosas revisiones del estado del arte en lo referente al enfoque LCC.(Kirt y Dellisola, 1996), (Parra, 2006), (Korpi, 2006) que recogen las diferentes corrientes y discuten los avances en el campo desde una perspectiva histórica. Los autores parten de trabajos de hace casi nueve décadas, (Principles of Engineering Economics, Grant 1930) revisando las principales contribuciones, como el primer Manual de Coste de Ciclo de Vida (Ministerio Defensa EEUU, 1970) y destacando las publicaciones más actuales de las asociaciones de ingeniería (ASTM 1985) y de diferentes investigaciones de la industria petrolera.

A lo largo de la revisión de literatura específica sobre cálculos de Coste de Ciclo de Vida (LCC), se ha observado que no existe un volumen relevante de publicaciones formales en revistas científicas. El enfoque LCC se utiliza, en la mayoría de los artículos consultados, como herramienta de aplicación de un caso en particular, en el que se quiere demostrar que una opción (producto, sistema de mantenimiento, etc...) o bien presenta mejor rendimiento que sus competidores o bien se puede optimizar. La metodología de cálculo es dispar, y en general no existe todavía una tratamiento científico del tema, con un hilo conductor en el que un artículo se apoye en las metodología de cálculo anteriores. Existen normas de cálculo LCC, siendo la UNE EN 60300 "Gestión de la confiabilidad, parte 3-3: Guía de aplicación, Cálculo del coste del ciclo de vida" la versión en castellano de la norma internacional IEC 60300-3-3:2004 la guía generalmente aceptada frente a la ASTM de 2002 y otras más antiguas.

2.2.3. Objetivos

Según algunos autores (Ellram, 1995) el análisis del coste de vida se centra principalmente en el estudio de activos fijos e inmovilizado. Sin embargo, otros autores (Asiedu and Gu 1998) defienden su uso para todo tipo de productos como viene siendo el caso general.

Los primeros agentes en propugnar la utilidad del enfoque LCC fueron los clientes o compradores, que en el marco de esta tesis son habitualmente las Administraciones ferroviarias de cada país. Así, los métodos de cálculo LCC más tradicionales (Fabrycky and Blanchard, 1991; Woodward, 1997) suelen estar orientados al comprador, la Administración ferroviaria en este caso, que es quien que necesita comparar las ofertas de diferentes fabricantes de vehículos ferroviarios y no puede centrarse únicamente en el coste de adquisición, sino que necesita comparar los costes de explotación, mantenimiento y en menor medida por no resultar un elemento tan diferenciador como el resto, de eliminación.

El diseñador y fabricante del vehículo ferroviario estará también interesado en el enfoque LCC tanto en cuanto le sea de utilidad para medirse con sus competidores a la hora de presentar una oferta a una Administración. Así pues, para diseñadores el procedimiento LCC se trata de una herramienta que aporta servicio al cliente y una clara ventaja competitiva (Dunk, 2004).

Korpi realizó un interesante estudio del uso del planteamiento LCC por sectores, del que se extraen conclusiones de interés para este estudio.

Respecto a la tipología de usuario que se interesó en realizar estudios LCC, se observa que en general es el cliente o comprador el que más frecuentemente utiliza este método. En el sector del transporte también destaca el interés de los fabricantes, sin duda por el empuje del comprador, que habitualmente exige comparar ofertas en términos LCC.

En general, según la bibliografía consultada, los objetivos y tipos de decisiones más habituales para los que se utiliza el proceso LCC son:

- Evaluación y comparación de enfoques alternativos de diseño y opciones tecnológicas de eliminación
- Análisis de costes del mantenimiento a largo plazo.
- Valoración de la viabilidad económica de los proyectos/productos
- Identificación de los contribuyentes de coste y de mejoras efectivas de coste

- Evaluación y comparación de estrategias alternativas para el uso, operación, pruebas, inspección, mantenimiento, retirada del producto etc del producto
- Asignación de los recursos disponibles entre las diferentes prioridades de desarrollo o mejora de un producto
- Valoración de los costes de garantía y reparación de un producto.
- Planificación de la financiación a largo plazo.

2.2.4. Fases de vida y sus costes

La norma UNE-EN 60300 considera que existen seis fases en el ciclo de vida de un producto:

1. Concepción y definición
2. Diseño y desarrollo
3. Fabricación
4. Instalación
5. Operación y mantenimiento
6. Eliminación

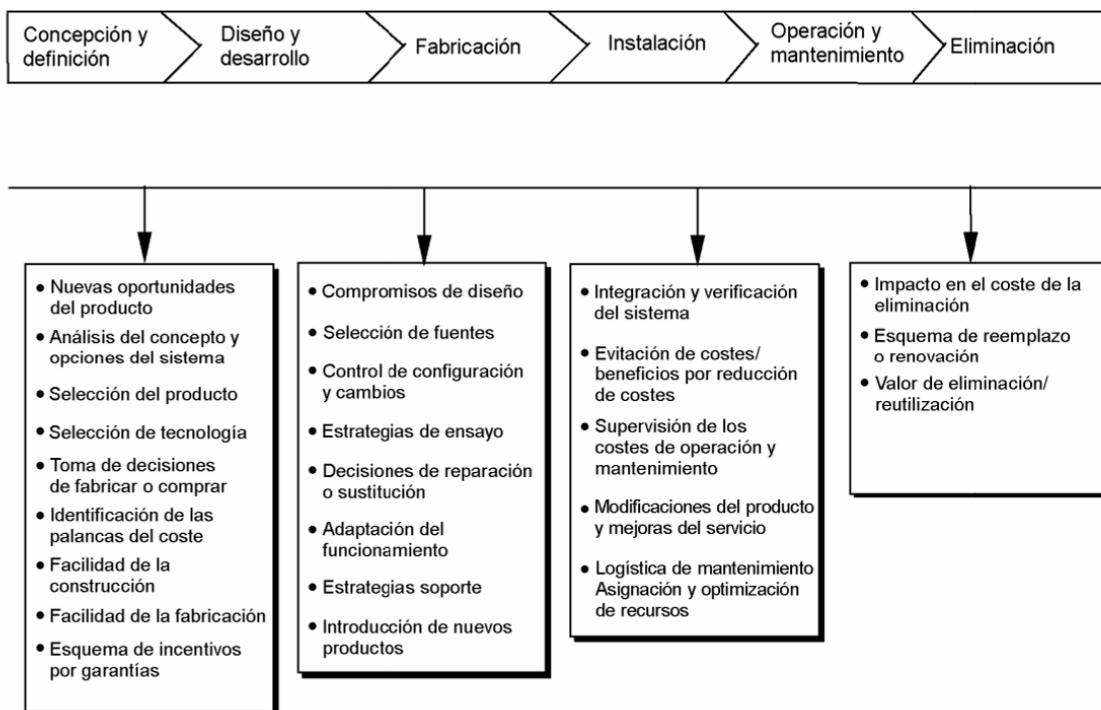


Figura 2.2. : Fases del ciclo de vida. Fuente: Norma UNE EN-60300.

Aunque todas las fases deberían estudiarse con idéntico rigor en cada escenario dado, la realidad es que en cada análisis particular se trabajan las fases según las necesidades del caso. La citada norma UNE-EN 60300 plantea la siguiente agrupación de costes sancionada por la práctica:

$$LCC = Coste_{de\ adquisición} + Coste_{de\ propiedad} + Coste_{de\ eliminación} \quad [2.1]$$

Los costes de adquisición suelen ser más evidentes y sencillos de calcular pues vienen siendo calculados desde hace décadas y son una de las bases de fijación de los precios de los productos manufacturados.

Los costes de propiedad resultan más complicados de estimar, y en el caso de las flotas ferroviarias dependen en gran medida del coste de mantenimiento y con ello, de la fiabilidad.

Los costes de eliminación pueden resultar muy relevantes según el caso de aplicación, por ejemplo, en centrales nucleares o vertederos de residuos tóxicos. En el escenario de los vehículos ferroviarios, el coste de eliminación no varía en gran medida de un tipo (marca, modelo, tecnología) de vehículo ferroviario a otro.

Otros autores (Fabrycky and Blanchard, 1991) utilizan una división en tres o cuatro divisiones para caracterizar los costes:

- Costes de investigación y desarrollo
- Costes de producción y construcción
- Costes de operación y mantenimiento
- Costes de retirada y eliminación

El estudio comparativo multisectorial sobre casos de aplicación LCC publicados realizado por Korpi (Korpi E., 2006) abunda en lo expuesto, demostrando que no siempre se estudia cada término de la ecuación con igual intensidad.

FASE DEL CICLO DE VIDA	%
Investigación y Desarrollo	20
Producción y Construcción	87
Operación y Mantenimiento	98
Retirada y Eliminación	26

Tabla 2.3. : Fases de los Costes de Ciclo de Vida incluidas en la revisión de los casos recogidos por Korpi . Fuente: (Korpi E., 2006).

De hecho, los resultados de su investigación concuerdan con la línea de cálculo de esta tesis, donde se hace hincapié en el cálculo de los costes de operación y mantenimiento (como en el 98% de los casos investigados), por ser donde existe mayor incertidumbre y capacidad de optimización.

Desde el punto de vista del análisis financiero de la gestión del proyectos, se han adaptado los términos CAPEX y OPEX que reflejan de un modo muy intuitivo la variación de la naturaleza de los costes a lo largo de la vida útil de un activo (Parra 2006, Levy and Sarnat 1990)

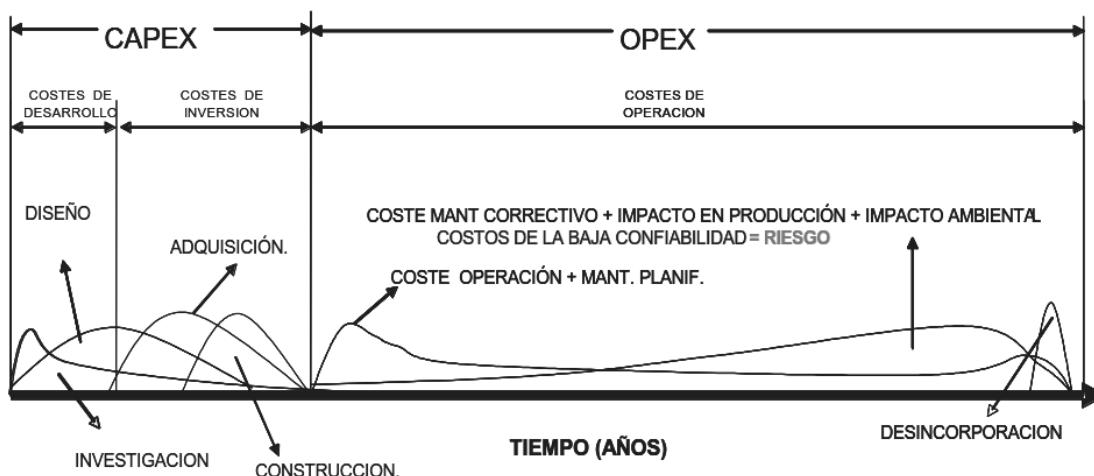


Figura 2.3. : Estructura de coste en el ciclo de vida de un activo.

Fuente: Parra-Crespo.

- CAPEX abreviación del inglés "Capital Expenditure" hace referencia al coste de capital, del desarrollo o el suministro de componentes no consumibles para el producto o sistema
- OPEX, del inglés "Operating Expense", engloba los costes de funcionamiento, operación o explotación.

2.2.5. Metodología de Cálculo General: la incertidumbre de la fiabilidad

Como cualquier otro modelo, el cálculo LCC es una representación simplificada de la realidad. En una primera aproximación, el coste LCC resulta de calcular el Valor Actual Neto (VAN) de los costes de adquisición, explotación y eliminación a lo largo de el número de años "t" de vida del activo aplicando una tasa de descuento "i" dada:

$$LCC = \text{Coste Adquisición} + \sum_{n=1}^{n=t} \frac{\text{Coste anual Explotación}}{(1+i)^n} + \frac{\text{Coste Supresión}}{(1+i)^t}$$

La práctica manifiesta que para el caso general, los costes de adquisición son los más visibles, resultando el resto de costes asociados a la operación del sistema más complejos de determinar. El problema de visibilidad de estos costes se suele representar de un modo muy intuitivo mediante la metáfora del iceberg (Fabricky 1997). Según Fabricky, una gestión deficiente tiene en cuenta la parte más visible del iceberg, que son los costes de adquisición. Sin embargo, una gestión deficiente, aun sabiendo que gran parte del iceberg está oculto, no investiga y cuantifica el conjunto de costes sumergidos. Como posibles costes ocultos Fabricky cita:

- Coste de operación del sistema
- Coste de distribución interna y externa
- Coste de mantenimiento
- Coste de recursos informáticos
- Coste de equipo de apoyo y prueba
- Coste de formación
- Coste de abastecimiento o compras
- Coste de datos técnicos
- Coste de eliminación y retirada

La complejidad del cálculo certero de los costes LCC no recae pues sobre el cálculo del valor total, sino con la estimación del cálculo de los costes de cada fase y con la estimación de la tasa de descuento.

Respecto a la estimación de los costes de cada fase, es necesario cuantificar:

- Los costes asociados al Coste de Vida Total esperado: costes de diseño, fabricación, logística, mantenimiento, etc...
- Los costes asociados a la confiabilidad del sistema, o dicho de otro modo los costes debidos a eventos de fallos imprevistos.

La confiabilidad es un concepto que se utiliza para describir la disponibilidad de un producto y sus factores de influencia (UNE-EN-60300-3), es decir, fiabilidad, mantenibilidad y logística de mantenimiento. Estos costes pueden incluir:

- Coste de restablecimiento del sistema, incluyendo coste de correctivo
- Coste de mantenimiento preventivo
- Costes de las consecuencias, como garantías o penalizaciones.

Estos conceptos añaden una perspectiva al esquema de costes que aunque a primera vista pudiera parecer singular, no implica más que una reorganización de los costes para acomodarse a dichas definiciones. Es por tanto fundamental

llevar a cabo una estimación de costes formal para más tarde reorganizarlos según convenga.

En el caso del cálculo de costes LCC, una estimación de un coste es una opinión basada en el análisis y el buen juicio sobre el coste de un producto sistema o servicio (Fabricky 1997). Resulta por tanto un valor que, aunque de máxima importancia, presenta gran incertidumbre, e incluso en los casos en los que existen modos de cálculo, es necesaria gran dosis de experiencia para su interpretación.

En general, los costes de cada fase pueden estimarse según las siguientes tres filosofías o mediante el uso simultáneo de las mismas (Elsayed 2012, Fabricky 1997):

- a) Estimación mediante métodos de ingeniería.

Esta es la metodología de cálculo que se aplicará en esta tesis. consiste en dividir el conjunto en unidades menores que se puedan estudiar con detalle. Entonces, para cada unidad de cálculo, se estiman siguiendo reglas unificadas las cantidades y tipologías de mano de obra y materiales necesarias para producir o mantener esa unidad. A cada unidad de mano de obra y materiales se le aplican valores estandarizados de costes unitarios, obteniendo así el valor final.

- b) Estimación por analogía.

Se trata de la utilización de la similitud que existe entre el elemento conocido y el bien objeto de estudio. Es un método basado fundamentalmente en una experiencia educada. Así , una empresa fabricante de vehículos de material rodante, puede estimar con cierta precisión los costes de desarrollo de un nuevo modelo o de mantenimiento de un modelo conocido en una nueva ubicación y ruta.

En el campo del cálculo LCC de flotas, es habitual encontrar referencias en el sector que tradicionalmente estimaban el coste de mantenimiento a lo largo de la vida útil del tren de una magnitud similar al coste de adquisición. Otra estimación basada en la experiencia es el desglose tradicional de los costes de una operación de mantenimiento en aproximadamente un 30% de costes de materiales, un 55% de costes de mano de obra y un 15% de costes varios (es (González de la Peña, 2004)

El mayor inconveniente de esta filosofía es que el cálculo de variaciones sobre lo perfectamente conocido serán poco fiables, pues no tiene ningún método científico asociado.

c) Estimación paramétrica.

La estimación paramétrica implica estimar el coste mediante técnicas estadísticas que permitan encontrar una relación entre los cambios en el coste y los factores de los que depende. En el caso de esta tesis, será la fiabilidad el parámetro que se utilizará como principal variable paramétrica.

El estudio comparativo multisectorial sobre casos de aplicación LCC publicados realizado por Korpi (Korpi E., 2006) demuestra que en la gran mayoría de los casos, clientes y compradores recurren al método paramétrico.

MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE COSTES APLICADOS EN DIFERENTES CASOS DE ESTUDIO.

KORPI, 2006

Estimación Paramétrica	45%
Estimación por Analogía	13%
Métodos de Ingeniería	4%
Mix paramétrica y analogía	25%
Mix paramétrica e ingeniería	2%
Mix analogía e ingeniería	2%
Mix de los tres tipos	2%
No claro	7%

Tabla 2.4. : Métodos de estimación de costes aplicados en diferentes casos de estudio. Fuente: Korpi (Korpi E., 2006).

Esto es debido sin duda a que es habitual que el enfoque LCC se aplica en casos en los que existen experiencias anteriores. Así, por ejemplo, una Administración ferroviaria conoce los gastos de mantenimiento de sus vehículos por línea, modelo etc... De este modo, al decidir ampliar las operaciones mediante la adquisición de nuevos vehículos, los principales costes del planteamiento LCC podrán ser estimados por analogía, siempre y cuando se trate de modelos y líneas similares a las existentes.

No resultará igual de fiable sin embargo el caso de un fabricante que desarrolla un nuevo modelo para además circular en unas líneas de características diferentes a las habituales, como ha venido sucediendo en las últimas décadas a medida que los fabricantes, en general inicialmente centrados en su país de

origen, se convertían en exportadores, experimentando muy diferentes condiciones (de calidad de la vía, de velocidades exigidas, etc...) en cada país de destino o comprador.

Se observa que no existe unanimidad en la filosofía de cálculo. Lo que sí resulta común a todas las filosofías es que, a un nivel inferior de cálculo, más cercano al detalle, el Coste de Ciclo de Vida (LCC) de un equipo parte del cálculo de su coste de mantenimiento periódico. Bien sea un coste de mantenimiento anual, semestral o semanal, el coste de mantenimiento periódico depende del número de operaciones de mantenimiento preventivo y correctivo que el equipo necesita recibir en ese periodo para alcanzar las condiciones de disponibilidad, economía y fiabilidad decididas por el gestor de su mantenimiento. Por lo tanto, para poder optimizar el Coste de Ciclo de Vida (LCC) resulta indispensable optimizar primero el coste periódico (anual, diario...) de mantenimiento, que depende en todo caso de la fiabilidad del sistema.

2.3. Análisis del Coste del Ciclo de Vida (LCC) de vehículos y flotas ferroviarias

2.3.1. La idoneidad y necesidad del LCC ferroviario

La adquisición de material rodante por parte de una Administración ferroviaria es una decisión de la máxima importancia, tanto por el nivel de inversión a la que se compromete a una sociedad durante décadas como por el beneficio social y económico que entraña. Los economistas y en particular los especialistas en sector público, realizan estudios coste-beneficio para demostrar o no la justificación de inversiones en nuevas líneas o incluso en la creación de nuevos sistemas de transporte, como líneas de alta velocidad o tranvías (Ginés de Rus, 1997), (Nash 1993), (Hall, 1985), (Alvarez and Herce 1993). Para poder tomar este tipo de decisiones de primer nivel basadas en análisis coste-beneficio, es fundamental entender no solo los costes de adquisición sino también el resto de costes que se incurrirán durante la vida útil de las flotas.

Una vez decidida la adquisición de una nueva flota, el proceso de selección y compra es largo y complejo, pues depende de gran cantidad de factores técnicos, sociales, políticos y económicos. Sin embargo, como en cualquier otro proceso de compra, las prestaciones generales de los vehículos y los costes de ciclo de vida de los mismos son las dos características fundamentales a la hora de la elección de una marca/modelo/sistema frente al resto.

Las prestaciones quedan descritas en el pliego de condiciones técnicas del concurso publicado por la Administración e incluirán conceptos como la velocidad, capacidad en número de pasajeros, peso por eje, número de coches por composición, altura de embarque, número de coches adaptados, tipologías de coches requeridos (bar, comedor, hotel...), consumo eléctrico, etc... Las prestaciones exigidas por la Administración serán las que definirán el servicio al usuario final, pero también concretarán el gasto de explotación (combustible, frecuencias de operación, etc...). Este conjunto de prestaciones serán las condiciones de contorno del proyecto de diseño del tren; los datos de entrada para que el fabricante de material rodante defina el producto a presentar al concurso.

Evidentemente, cada fabricante presentará un diseño, y aun cumpliendo todos ellos con las prescripciones técnicas exigidas, cada modelo contará con particularidades y mejoras que serán ponderadas por la Administración. Ahora bien, la comparación de prestaciones técnicas, salvo casos excepcionales, suele resultar directa por la misma naturaleza técnica del proceso, relativamente libre de incertidumbres.

Por tanto, a igualdad de prestaciones, serán los Costes de Ciclo de Vida (LCC) los que determinarán cual es el equipo - sistema/marca/modelo - a adquirir. El conocimiento de los Costes de Ciclo de Vida LCC de flotas ferroviarias es una exigencia de cada Administración para poder comparar ofertas; aparece en el proceso de compra-venta de material rodante y fuerza a los fabricantes a medir, no solo su capacidad de diseñar y fabricar productos que cumplan con las prestaciones técnicas exigidas, sino que aporten el menor coste dentro de los parámetros RAMS (fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad) demandados en cada caso.

Como parte de las características del tren, las Administraciones ferroviarias suelen solicitar "el LCC" como si se tratase de una particularidad técnica adicional. Sin embargo, el empleo del LCC para hacer comparativas entre equipos requiere que su cálculo para todos ellos sea homogéneo. (González de la Peña, 2004). Cada uno de los fabricantes oferentes llevará a cabo el cálculo del LCC de sus equipos, dado que son los únicos que lo conocen en el momento del concurso y además serán responsables de los compromisos y garantías que adquieran frente al comprador, que luego penalizará o premiará las desviaciones sobre los LCC comprometidos en fase de concurso. Con objeto de minimizar la incertidumbre, la Administración deberá intentar homogeneizar el cálculo, aportando el máximo número de datos de entrada, como velocidad media, estado de la vía, condiciones ambientales, condiciones salariales tipo, absentismo medio, tasa de descuento, etc...

Idealmente, la Administración recibirá un dato LCC de cada fabricante, que ponderado junto con el resto de factores del concurso determinará el ganador del mismo. A medida que los procedimientos de cálculo LCC se tecnifican, son más homogéneos y fiables, ganando importancia en los procesos de compra y convirtiéndose por tanto en uno de los vectores decisivos en la concepción del tren.

Tradicionalmente, y en base a la experiencia, se ha barajado un valor de coste LCC similar al coste de adquisición, a partir del cual los fabricantes hacían descuentos en fase de concurso en base a criterios comerciales y de mercado. Para asegurar su supervivencia los fabricantes necesitan calcular el coste LCC con la mayor precisión posible en cada ocasión. Pero sobretodo, necesitan asegurarse de que todos los competidores utilizan la misma metodología de cálculo, de manera que puedan medir sus tecnologías con el mayor rigor. De hecho, la iniciativa más relevante de armonizar el proceso de cálculo LCC de flotas ferroviarias fue impulsado por UNIFE, la asociación europea de fabricantes ferroviarios, modelo que se describirá en detalle más adelante. Esta iniciativa cristalizó en un grupo de trabajo denominado UNIFE LCC Working

group que publicó cuatro volúmenes bajo el título "UNIFE LCC Guidelines". Sin duda es la principal referencia del sector cuyos principales aspectos serán expuestos, contrastados con otros autores y criticados en los siguientes puntos.

Como se ha expuesto en puntos anteriores, el LCC tiene en cuenta todos los costes a lo largo de la vida útil. Sin embargo, en el caso particular de las flotas ferroviarias no todos los costes tienen el mismo peso desde el punto de vista del concurso de adquisición pública o privada, quedando excluidos del proceso todos aquellos que no aporten un factor diferenciador a la comparativa o que queden fuera del alcance de los fabricantes de material rodante: (González de la Peña, 2004), (Kjellsson, Hagemann), (Hokstad 1998). Por tanto, la realidad obliga a que sea cada Administración la que calcule el coste LCC de la explotación, siendo su responsabilidad exclusiva gran cantidad de los costes del ciclo de vida. Al fabricante se le exige un parcial de este total, que aproximadamente coincide con el coste de mantenimiento y ni siquiera sería el denominado "Life Support Cost" pues los costes de energía no son parte del contrato. Esta aproximación coincide con el enfoque de esta tesis, siendo los costes de mantenimiento los dependientes de la fiabilidad e intrínsecamente ligados al diseño.

El *coste de adquisición* del tren es un parámetro no sujeto a la incertidumbre de la fiabilidad. Habitualmente el fabricante conoce su coste de fabricación y utilizará cualquiera de las metodologías de fijación de precios (coste más margen, "competition-based", "shared revenues" etc...) para establecer su precio base de negociación. El precio final de adquisición tras la negociación será utilizado por la Administración en el cálculo LCC, pero a los fabricantes se les exige habitualmente presentar el coste de adquisición de manera independiente del coste LCC, que por tanto resultará incompleto aunque mantenga la misma nomenclatura LCC.

El *coste de eliminación* de la flota es responsabilidad de la Administrador y queda fuera del alcance del cálculo de los fabricantes. Cada Administración optará por una solución, siendo frecuente al final de la vida útil la reventa a otras Administraciones ferroviarias con menores medios y niveles de calidad. En otros casos, la Administración puede alargar la vida útil inicialmente planeada por medio de rehabilitaciones hasta el límite comercialmente posible, como en el caso español de los Talgo III, que estuvieron en operación desde 1964 hasta prácticamente 2011.

El *coste de operación* depende de la Administración responsable, y por tanto, como los anteriores, no suele formar parte de lo exigible al fabricante con la salvedad de los parámetros de peso por eje y consumo, atribuibles al diseño

particular de cada tren. Así pues, en fase de concurso para una línea dada, al fabricante se le podrá exigir concretar:

- El peso por eje y número de ejes por tren, como medida ponderada del desgaste que un diseño particular de tren causará en la vía. Es decir, un tren más ligero provocará un desgaste menor de la infraestructura y por tanto unos menores gastos de mantenimiento de vía. Este parámetro resulta importante para el cálculo LCC del global de la operación, pero fuera del alcance de esta tesis.
- El consumo eléctrico o de gasoil del diseño de tren propuesto para una línea determinada de operación. Del mismo modo, este factor irá al LCC global pero independiente del cálculo del tren. La inclusión de este término en el cálculo LCC está obligando a la rápida difusión de tecnologías para el ahorro energético (Ricci, 2011).

El resto de costes implicados en la operación (financieros, de mantenimiento de vía, de construcción, de personal, de administración, de indirectos, etc...) son objeto de un cálculo de enfoque más general.

Como cualquier otra actividad industrial, la operación y mantenimiento de una flota conlleva una generación de residuos tóxicos peligrosos y por tanto *costes de gestión medioambiental*. La gestión medioambiental de dichos residuos tiene un coste, pero no resulta un factor comparativo entre diferentes modelos de trenes en una explotación determinada, por lo que no se suele exigir al fabricante. La Administración sí que imputará estos costes en su cálculo LCC general,

Otros *costes singulares*, como la rehabilitación periódica, los gastos por accidentes, etc... pueden ser objeto del estudio, pero son costes que o bien se incurren por voluntad propia del operador (cambios estéticos tras diez o quince años por ejemplo) o bien se cubren por medio de seguros. Algunos autores (Hoksat 1998) introducen también en el global el *coste de la seguridad*, o mejor dicho, el coste por la falta de seguridad es decir, por los accidentes. El incluir este factor de manera independiente implica un esfuerzo por parte de la Administración en priorizar la seguridad, cuantificar el coste de la falta de seguridad y exigir así una mayor vigilancia por parte del mantenedor en el campo de la seguridad y salud. En todo caso, estos campos quedan al margen de este estudio por tratarse de costes de carácter más cercanos a lo comercial, lejos del enfoque de ingeniería de fiabilidad de esta tesis.

2.3.2. Limitaciones, deficiencias y riesgos del LCC de flotas ferroviarias

Idealmente, comparar los costes de ciclo de vida de varios fabricantes de flotas para una operación en particular arrojaría una respuesta única sobre la idoneidad de un fabricante frente al resto. Sin embargo, existen en la actualidad limitaciones, deficiencias y riesgos en el modelo: (UNIFE-Dersin, Dupre, Schiwek, Ludwig, Gosnet y Schneider, 2001)

a) Representación limitada de la realidad

El enfoque LCC, como cualquier otro modelo, no es más que una representación de la realidad. UNIFE cita como uno de las limitaciones fundamentales la complejidad a la hora de determinar la responsabilidad de las pérdidas de servicio (paradas). Discernir cuando es responsabilidad del equipo y cuando de variables externas de la operación es una clara limitación del modelo puesto que afecta la determinación inicial y posterior gestión de las penalizaciones de disponibilidad.

Sin embargo, en opinión del autor, esta primera categoría según el modelo de UNIFE no constituye una categoría en sí sino que es tan solo una característica inherente del enfoque; cada una de las variables utilizadas en la construcción del modelo serán estimadas con mayor o menor precisión en función de su naturaleza.

b) Limitaciones debidas al carácter estadístico de algunos parámetros

UNIFE divide las variables del modelo en deterministas y estocásticas:

Predominantemente estocásticas	Predominantemente deterministas
<ul style="list-style-type: none">• Tasas de fallo• MTTR - tiempo medio de reparación• Costes de reparación• Tiempos de reparación• Paradas	<ul style="list-style-type: none">• Costes horarios• Número de vehículos, subconjuntos, componentes• Vida útil• Kilometraje anual• Horas de operación

Tabla 2.5. : División de variables del modelo de cálculo de costes de ciclo de vida. Fuente: UNIFE.

Las variables determinísticas han de ser establecidas de mutuo acuerdo por Administrador y fabricante. Las variables estocásticas se establecen y gobiernan por medio de penalizaciones de contrato, establecidas en función de la

experiencia y las necesidades de la Administración, y es aquí donde entra en juego la optimización que cada fabricante consiga en su producto.

A la vista de la dificultad de estimar las variables estocásticas los autores recomiendan llevar a cabo estudios de sensibilidad para cada variable, y es habitual que exista un periodo de prueba o de rodaje en el que la Administración comprobará que los indicadores de mantenimiento RAMS indicados por el fabricante en fase de concurso son reales.

Otros autores (de la Peña, 2004) añaden todavía más incertidumbre a ciertas variables, destacando la influencia de las desviaciones de los tiempos teóricos de mantenimiento debido a factores productivos como el absentismo, rendimientos, etc...

Todos los autores hacen hincapié en la obligatoriedad de particularizar las variables para cada caso de estudio, para cada explotación. Sin embargo, las metodologías consultadas suelen tomar las variables del modelo como fijas en el tiempo; esto resulta una simplificación útil con motivos comparativos, pero no premia, por ejemplo, la capacidad de mejora en los costes de mantenimiento utilizando modernas técnicas como el Mantenimiento Basado en la Condición (CBM) u otras metodologías que sin duda mejorarán los resultados a lo largo de la vida útil del tren.

Se trata pues de un doble problema estadístico, que implica el cálculo inicial de las variables para el primer año de operación para luego estimar la variación de las mismas a lo largo de la vida útil del tren.

c) Limitaciones a la hora de medir ciertas variables

UNIFE destaca la dificultad de medir durante la fase de validación factores que fueron estimados durante la fase de cálculo. Por ejemplo el MTTR (tiempo medio de reparación) de correctivos puede quedar diluido entre el resto de trabajos (preventivos, limpiezas, etc...) si se realiza dentro del mantenimiento rutinario.

Otros autores (de la Peña 2004) destacan también la desviación existente entre la mano de obra directa estimada para ejecutar los trabajos de preventivo y correctivo durante la fase de cálculo y los ajustes basados en la experiencia que se hacen para aproximar dichos valores a los reales de la operación, que serán los que la Administración medirá durante la fase de validación.

En cualquier caso, para poder valorar la eficiencia del modelo de cálculo resulta fundamental determinar en la fase de cálculo cuales serán los parámetros

objetivos y medibles usados en el modelo que la Administración pueda más tarde contrastar y sancionar durante la etapa de validación.

d) Riesgos

Como en cualquier otro modelo económico en el que el valor del dinero en el tiempo sea una variable relevante, la gestión del riesgo y la proyección de las diferentes variables en el horizonte de estudio resulta fundamental.

El análisis de riesgos en el LCC en general implica simulaciones de Montecarlo para las variables más relevantes que así lo permitan (Emblemsvag, 2003) y el uso de otras técnicas econométricas.

Las diferencias entre los costes LLC modelados y los incurridos posteriormente en la realidad suelen conllevar una serie de penalizaciones por lo que implica un gran riesgo económico. De hecho, el éxito o fracaso económico de una flota en servicio es tal que obliga que los fabricantes impongan el enfoque LCC desde la fase de diseño. UNIFE destaca para el caso particular de las flotas ferroviarias los siguientes riesgos a estudiar durante la fase de modelado, validación y operación:

1. Extenso horizonte temporal con insuficientes datos de referencia
2. Ignorar las diferencias entre las hipótesis del modelo y la realidad
3. Ignorar las diferencias entre hipótesis de la explotación modelada y la explotación real.
4. Ignorar diferencias entre desgaste teórico y real por mal estado de vía o prácticas de conducción no eficientes
5. Estimación incorrecta de repuestos necesarios a lo largo de la vida útil
6. Estimar a la baja la complejidad y coste del proceso de validación
7. Penalización múltiple por linealidad entre variables penalizables
8. Insuficiente investigación para distinguir las responsabilidades operador-mantenedor de los fallos penalizables.

En todo caso, de manera independiente de las relaciones contractuales el riesgo que más volumen aporta al total es el inherente de la estimación de los costes de mantenimiento anual y por tanto de la estimación de la fiabilidad de los equipos y con ello de la planificación del mantenimiento.

2.3.3. El modelo escandinavo; REMAIN y otros trabajos de infraestructura

En 1981 los ferrocarriles suecos decidieron adquirir trenes de alta velocidad, decantándose por el modelo LCC como herramienta de gestión de la operación. (Burström et al, 1994), (Akselsson and Burström, 1994). El proyecto con trenes pendulares X2000 ha tenido resultados muy satisfactorios y tanto operador (SJ) como proveedor de material rodante (ABB). El proyecto X2000 se ha convertido en un caso de éxito de estudio en el campo de la gestión de compras por su aproximación LCC. (Edquist, 2000)

Como conclusión, los autores recomiendan un procedimiento similar al expuesto en puntos anteriores, que es el que se lleva a cabo habitualmente todavía hoy, más de dos décadas más tarde:

- Establecer el modelo LCC
- Determinar las condiciones de operación
- Solicitud de ofertas a fabricantes de material rodante
- Evaluación y armonización de propuestas
- Negociación y adjudicación de contrato con garantías LCC
- Verificación.

Los autores detallan los puntos que según su experiencia deben incluir la solicitud de ofertas (Burström et al, 1994), como las exigencias respecto a la disponibilidad de la flota, garantías, descripción de la explotación, variables principales de cálculo LCC etc... El modelo indica que la operación de mantenimiento ya debe de ser propuesta por la Administración y corregida por los fabricantes. Sin embargo, las diferencias entre filosofías de mantenimiento de cada fabricante y equipo varían y con ello también varían las necesidades de equipamiento para mantenimiento (tornos de perfilado de ruedas, tamaño de las instalaciones, etc...). Por tanto, es relevante centrarse en exigir una propuesta prestacional, es decir, exigir parámetros de calidad idénticos a todos sin interferir en cómo conseguirá sus objetivos cada fabricante.

Dado que la administración exigió una disponibilidad mantenibilidad y LCC dados que luego se verificaría durante la operación y penalizaría, el fabricante realizó durante la fase de diseño un análisis del mantenimiento para conseguir el óptimo equilibrio entre mantenimiento preventivo y correctivo. Es decir, se trata de un claro ejemplo en el que el enfoque LCC forzó a los fabricantes a analizar y optimizar sus estrategias de mantenimiento.

En el caso sueco el periodo de verificación fue de seis meses. Durante es periodo se contrastan en detalle los resultados del modelo LCC ofertado con la

realidad, discerniendo la responsabilidad del fabricante o de factores externos en cada fallo.

En 1998, SINTEF, el mayor grupo investigador independiente escandinavo publicó una metodología para estudiar desde el punto de vista LCC la eficiencia del Mantenimiento Basado en la Condición de cierto modelo de desvíos ferroviarios frente al mantenimiento tradicional (Hokstad 1998). Se estudió un modelo de desvío que podía incluir un dispositivo de medida de la condición, y varios operadores -RENFE, DB, ISAP - aportaron datos para el estudio. Se trataba pues de una aplicación LCC para demostrar las virtudes de un producto que aunque inicialmente encarecía los desvíos podía proporcionar ahorros en la vida útil del mismo.

Se trata de un modelo bastante simple cuyo objetivo es la comparación de dos estrategias de mantenimiento. Las dos simplificaciones más relevantes son:

- Utiliza una tasa de descuento constante durante la vida del proyecto en vez de utilizar el coste medio ponderado del capital (WACC) o una tasa referenciada a algún índice de referencia como el Euribor, Libor o tasa de interés de los fondos federales.
- Considera los costes de mantenimiento fijos a lo largo de la vida útil. Es decir, calcula el coste del primer año y no contempla posibilidad de mejorar esos costes en base a técnicas de mantenimiento condicionado a la operación o similar.

Además no considera el coste de eliminación y los autores indican claramente que es un método utilizado para costes de infraestructura y que no se puede aplicar a material rodante sin modificaciones previas.

El desglose de costes que propone es:

$$LCC = INV + [AMC + ADC + AHC] \times [1 - (1+k)^{-m}] / k \quad [2.2]$$

Siendo cada término desglosado del siguiente modo.

- INV, costes de inversión
- AMC, costes de mantenimiento y operación anuales
- ADC, costes anuales por retrasos y otras penalizaciones
- AHC, costes anuales de seguridad y salud.

Los autores proponen un desglose de cada sumando en varios términos. Por ejemplo el término AMC queda dividido en coste anuales de mantenimiento preventivo, correctivo y basado en condición a los que adicionalmente suma los costes de mano de obra indirecta y el consumo de energía.

Sin duda lo más llamativo es la inclusión en el modelo de los costes de seguridad y salud, concepto complejo tanto a la hora de estimar y validar como cuando se trata de asignar responsabilidades. El cálculo es simplemente estimativo y pretende simplemente dar importancia al concepto. En esta tesis es no se considerará esta tipología de coste.

Finalmente, los autores llevan a cabo un análisis de sensibilidad, obligado a la vista de la naturaleza de las variables.

Existen numerosos estudios adicionales sobre la aplicación del modelo LCC a infraestructura. Nissen (Nissen, 2009) propone como novedad el ponderar la tasa de descuento del modelo con una función de Poisson no homogénea (NHPP) en sus trabajos sobre LCC en desvíos y cruzamientos ferroviarios. Sin embargo, el autor no concluye cuales son los parámetros recomendados, resultando una aproximación de la tasa poco habitual en la literatura.

Prasad (Prasad, 2010), aporta dos ideas interesantes. Por una parte, modela la degradación y reparación mediante redes de Petri considerando mantenimiento imperfecto. Por otra parte, presenta una estimación de la incertidumbre del modelo LCC causada por parámetros técnicos mediante el uso de simulaciones de Montecarlo y diseño de experimento (DoE), convirtiendo las ecuaciones deterministas LCC en ecuaciones estadísticas.

En términos LCC los esfuerzos más relevantes realizados por el sector se plasmaron en los informes realizados durante la pasada década por la plataforma INNOTRACK, soportada por los principales agentes europeos - operadores y fabricantes - con objeto de desarrollar y difundir investigación aplicada para conseguir infraestructuras ferroviarias eficientes desde el punto de vista económico y técnico. INNOTRACK llegó al fin de su vida en 2010, legando un conjunto de informes disponibles todavía en su web, entre los que se encuentra una sección completa de aplicación del enfoque LCC a la infraestructura ferroviaria.

2.3.4. La aproximación europea, UNIFE-UNILIFE

En 1997 UNIFE creó un grupo de trabajo que entre otros agrupaba profesionales y académicos del sector y a grandes fabricantes como Bombardier, Alstom y Siemens. El principal objetivo era armonizar las metodologías de cálculo LCC para flotas ferroviarias, tanto en el formato como en el cálculo. En 2001 UNIFE publicó los resultados y un modelo de cálculo resumido en dos hojas de cálculo, UNIFE-UNILIFE y UNIFE-UNIDATA. También se publicó ese mismo año la metodología para la validación del modelo con datos de campo. Los resultados de este grupo de trabajo han sido el único esfuerzo transnacional,

impulsado por fabricantes, de crear un método de cálculo LCC unificado para flotas ferroviarias, reflejo de las metodologías aplicadas en la práctica.

Según el estudio, las relaciones entre los diferentes agentes según el modelo UNILIFE-UNIDATA en el proceso de adquisición de material rodante quedan descritas en la siguientes figura:

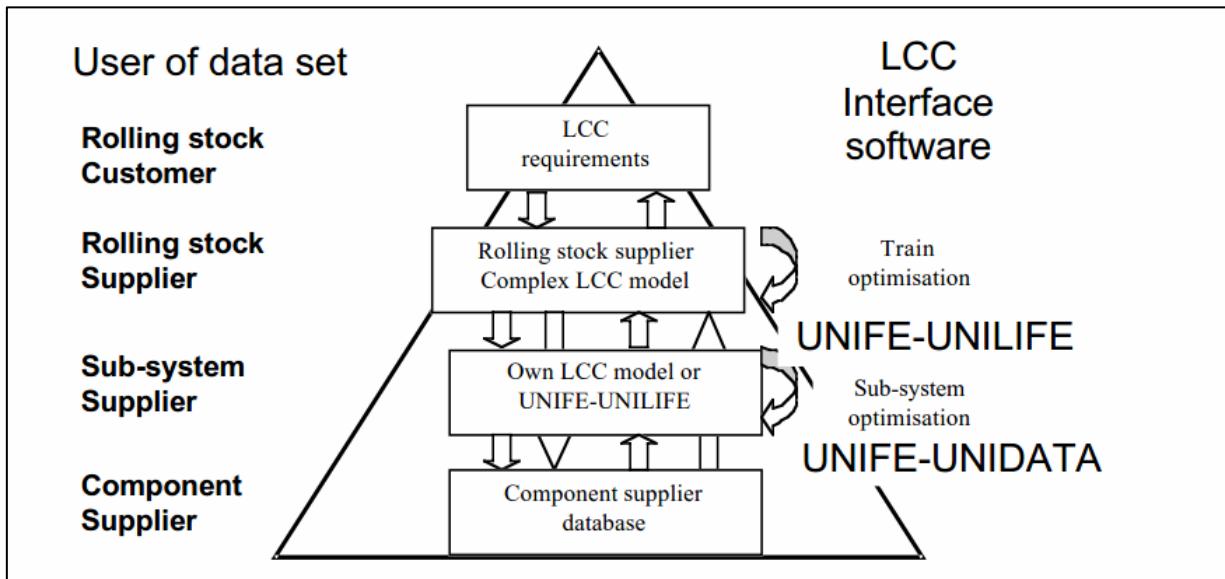


Figura 2.4. : Diferentes roles en la relación cliente-proveedor de material rodante. Fuente: UNIFE.

En la cúspide está la Administración ferroviaria u operador, que es quien establece los requerimientos LCC. Inmediatamente debajo aparece el fabricante del material rodante, que habitualmente utiliza un complejo modelo de cálculo LCC para transformar los requerimientos de la Administración en sus propias especificaciones de diseño. Los fabricantes utilizan una metodología plasmada en la hoja de cálculo denominada UNIFE-UNILIFE para calcular el LCC de cada subsistema. Habitualmente el LCC de cada subsistema lo calcula el fabricante del mismo, por ejemplo, el proveedor del sistema de puertas, del sistema de frenos o el fabricante en el caso de la rodadura o de otros sistemas diseñados por él mismo. Finalmente existe una hoja de cálculo denominada UNIFE-UNIDATA que permite mantener la homogeneidad de los datos de trabajo de un modo simplificado para que los fabricantes de componentes individuales puedan aportar datos al modelo.

El grupo detectó dos modos de trabajo por parte de los fabricantes; en el primero, el fabricante se hace responsable de todos los cálculos LCC del tren y en el segundo el fabricante delega los cálculos LCC a sus proveedores. De aquí la necesidad de crear las dos hojas, UNILIFE y UNIDATA. En ambos casos parte

de la complejidad recae en la estimación de los ciclos de trabajo, que se deberán particularizar para cada explotación. Por ejemplo, la calidad de la vía, el modo de conducción de los maquinistas, el número de veces que las puertas abrirán etc...variarán de una explotación a otra y existirá incertidumbre en su estimación.

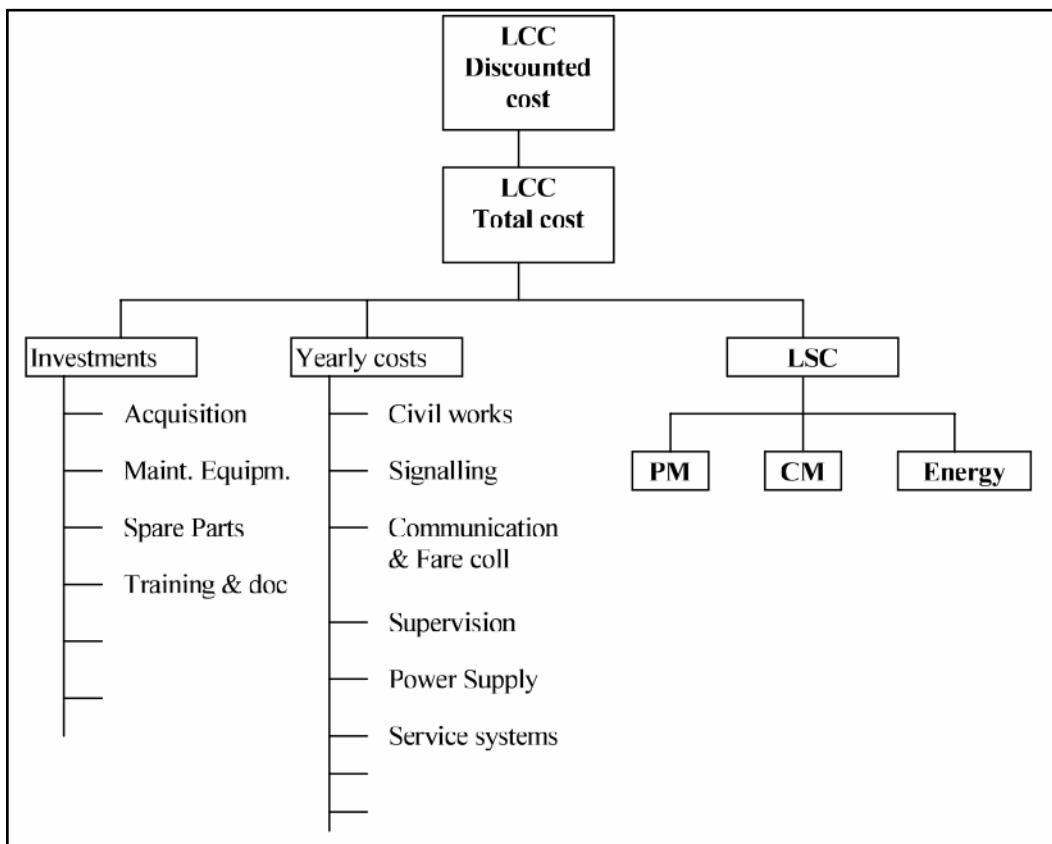


Figura 2.5. : Modelo LCC de UNILIFE. Fuente: UNIFE.

El proyecto LCC de UNIFE creó un modelo preliminar unificado para el cálculo LCC de flotas ferroviarias y una metodología para la validación del cálculo durante el periodo inicial de la explotación. En los primeros años posteriores a su publicación el método fue estudiado por académicos en distintas partes del mundo y aplicado por los diferentes agentes del sector. Sin embargo, se observa que no se ha llegado a convertir en un estándar debido en parte a que UNIFE no continuó con el grupo de trabajo y sobretodo por las limitaciones del modelo.

Las principales limitaciones del modelo creado por UNIFE son:

- Se trata de una solución compleja. Las hojas Excel no son claras de trabajar ni de interpretar.
- La plataforma tecnológica - hojas Excel - no aporta la potencia de cálculo necesaria

- Tan solo puede modelar una configuración en cada cálculo
- Solo permite un coste de mano de obra total
- No incluye el coste de penalizaciones.
- Permite cálculo LCC en función del primer año, no permitiendo mejoras periódicas

El modelo está diseñado solamente con fines de homogeneización a la hora de comparar costes LCC de diferentes suministradores de material rodante en una operación determinada. No se trata por tanto de una herramienta para la optimización de la gestión del mantenimiento.

2.3.5. La aplicación Coreana.

Tomando como base el modelo de UNIFE, el Instituto Koreano de Investigación Ferroviaria publicó un modelo de predicción de costes de mantenimiento LCC para vehículos ferroviarios. (HK Jun, 2007). El modelo utilizó las hojas UNILIFE y UNIDATA para la toma de datos. Sin embargo, decidieron desarrollar un software a medida para soslayar las limitaciones del uso de las citadas hojas Excel.

Para el cálculo de los costes de mantenimiento preventivo y correctivo propone el siguiente modelo:

Para los costes de mano de obra de preventivo propone una suma simple de las horas dedicadas en cada operación realizada en cada parte de cada tren. Es decir, el coste de preventivo para cada parte se estimará como:

$$C_{(PM)labor} = no_{tr} \cdot no_{part} \cdot no_{action} \cdot mmh_{PM} \cdot uc_{mh} \quad [2.3]$$

- no_{tr} es el número de trenes en la flota
- no_{part} es el número de conjuntos que reciben PMs en un tren
- no_{action} es el número de PMs por conjunto y por año en un tren
- mmh_{PM} es el número de horas que requiere cada PM
- uc_{mh} es el coste por hora-hombre

Para los costes de material de preventivo considera el coste medio de los consumibles en cada acción de preventivo o estima una fracción del coste del equipo como simplificación.

$$C_{(PM)material} = no_{tr} \cdot no_{part} \cdot no_{action} \cdot C_{(PM)con} \quad [2.4]$$

- no_{tr} es el número de trenes en la flota
- no_{part} es el número de partes que reciben PMs en un tren
- no_{action} es el número de PMs por parte y por año en un tren

- $C_{(PM)con}$ es el coste de consumibles incurrido en cada PM. Como a veces resulta complicado de estimar, el autor propone utilizar una fracción del coste de compra del conjunto.

Respecto al correctivo, introduce una tasa de fallo constante y no cuenta con el coste de las penalizaciones. El cálculo es similar al de preventivo, separando entre mano de obra y materiales. El coste de mano de obra se propone calcularlo:

$$C_{(CM)labor} = no_{tr} \cdot no_{part} \cdot \lambda \cdot r_{ex} \cdot \{(mmh_{CM} + mmh_{(CM)shop}) \cdot u_{mc}\} \cdot t_{pow} \cdot t_{lc} \quad [2.5]$$

- no_{tr} es el número de trenes en la flota
- no_{part} es el número de conjuntos que reciben PMs en un tren
- λ es la tasa de fallos en no/Mh de una parte
- mmh_{CM} es el tiempo medio por CM
- $mmh_{(CM)shop}$ es el tiempo de reparación de una parte en el taller
- uc_{mh} es el coste por hora-hombre
- t_{pow} es el tiempo total de operación anual
- t_{lc} es el ciclo de vida

El coste de materiales se calcula

$$C_{(CM)lmat} = no_{tr} \cdot no_{part} \cdot \lambda \cdot r_{ex} \cdot (C_{(CM)con} + C_{(CM)spare}) \cdot t_{pow} \cdot t_{lc} \quad [2.6]$$

- no_{tr} es el número de trenes en la flota
- no_{part} es el número de conjuntos que reciben PMs en un tren
- λ es la tasa de fallos en no/Mh de una parte
- r_{ex} es la reparabilidad de la parte.
- $C_{(CM)con}$ es el coste medio de consumibles en cada CM
- $C_{(CM)spare}$ es el coste medio en repuestos en cada CM
- t_{pow} es el tiempo total de operación anual
- t_{lc} es el ciclo de vida

Una vez estimado el coste de preventivo y correctivo, calcula el valor actual neto del total, utilizando tanto una tasa de descuento como un coste de mantenimiento anual constantes a lo largo de la vida útil del tren.

Las principales aproximaciones del modelo según lo expuesto en la literatura son:

- Se utiliza un factor multiplicativo de la vida útil en la formulación general sin utilizar descuento alguno a la tasa correspondiente
- No incluye estimación de penalizaciones por correctivo
- No indica relación entre preventivo y correctivo
- Utiliza un coste horario de mano de obra único

- El coeficiente de reparabilidad afecta tanto a los consumibles como a coste de recambios
- La tasa de descuento es constante a lo largo del ciclo de vida.
- No indica la estructura de descomposición del tren recomendada (escandallo)

A partir del modelo de cálculo de costes propuesto, los autores llevan a cabo el cálculo LCC detallado de un sistema, el sistema auxiliar de energía siguiendo la metodología UNIFE. Para ello utilizan el software desarrollado basado en el modelo UNIFE introduciendo datos de campo obtenidos de cierto operador ferroviario. Los autores resaltan la dificultad para obtener datos de campo fiables, dificultad común en este campo al ser propiedad intelectual de cada fabricante-mantenedor. Este hecho es causa en parte de la falta de academicismo en los estudios de mantenimiento ferroviario.

2.3.6. La experiencia Japonesa, MAGLEV

Otros autores del mismo Instituto Koreano de Investigación Ferroviaria (Kim, J. 2011) estudiaron en base a datos del la operativa del MAGLEV japonés. Sin embargo, la bibliografía consultada no aporta más datos que los referidos en el apartado anterior, pues tan solo informa sobre la aplicación del mismo modelo y software a datos obtenidos de la operación MAGLEV, sin concluir resultados significativos. En todo caso, sirve para

Sorprende la falta de literatura sobre el caso japonés, cuando solamente el operador JR-East cita a más de 7000 empleados en mantenimiento gran parte de ellos en material rodante (Enzo 2001). El mismo autor observa las iniciativas europeas en el enfoque LCC como el camino a seguir, exponiendo como el operador había optado por el uso del enfoque LCC con un claro enfoque

2.4. Herramientas para el cálculo y análisis LCC.

A la vista de la cantidad de variables y complejidad del cálculo LCC, diferentes agentes (empresas privadas, operadores ferroviarios, investigadores) han desarrollado en las últimas décadas paquetes de software, de aplicación general o para casos o sectores concretos.

Para el caso general de cálculo de fiabilidad existen multitud de soluciones por sectores, siendo las soluciones más competas las probadas las desarrolladas por la empresa de consultoría, formación y software "Reliasoft". Entre las soluciones que ofrece en el campo de la ingeniería de la fiabilidad las hay más comunes, como Weibull++ para ajustes de tasas de fallo mediante la curva de Weibull o XFMEA para analizar modos de fallo obteniendo criticidades. Sin embargo, existen varias soluciones de mayor aplicación a esta tesis como " λ -predict", que calcula una tasa de fallo basándose en los principales estándares de predicción de fiabilidad (MLT-HDBK-217, NSWC Mechanical, Bellcore/Telcordia), "BlockSim", para la representación gráfica de diagramas de bloques de fiabilidad para su posterior análisis. El que presenta una visión más generalista es el paquete denominado RCM++, que permite diseñar y analizar un plan de mantenimiento basado en RCM utilizando las principales normas del sector aeronáutico y de plantas industriales (ATA MSG-3, SAE JA1011 y SAE JA1012). RCM++ resulta potente y atractivo pero también complejo de uso y no focalizado en la aplicación de flotas ferroviarias.

Respecto a herramientas informáticas cálculo LCC específicas para el sector ferroviario, la plataforma INNOTRACK dedicó uno de sus grupos de trabajo a desarrollar una comparativa de herramientas LCC (Benchmark of LCC tools, 2008). En dicho documento se llevaba a cabo una exhaustiva comparación entre diferentes soluciones disponibles: UNIFE-UNILIFE (UNIFE, Bélgica), CATLOC(Systecon AB, Suecia), D-LCC (ALD, Deutsche Bahn AG), LCCWare(Isograph) y Relex LCC (Relex), habiéndose este último transformado en el actual PTC WindChill. El proceso de "benchmarking" llevado a cabo por INNOTRACK comparó los citados paquetes en base a unas treinta variables, concluyendo que aunque todas las soluciones resolvían los cálculos básicos ferroviarios, todos los modelos adolecían en un modo u otro de capacidad de importabilidad de datos, flexibilidad de adaptación de los modelos a lo largo del tiempo, explotación de datos y/o la imposibilidad de incorporar situaciones de Montecarlo.

En general se concluye que no existe una herramienta única que armonice los criterios de cálculo y/o establezca metodología para la validación de los modelos.

Capítulo 3

MODELOS DE OPTIMIZACIÓN DE COSTES DE MANTENIMIENTO

RESUMEN: En este capítulo se introducen como parte del Marco Teórico, los conceptos básicos referentes a los modelos matemáticos de optimización de costes de mantenimiento, con la extensión necesaria para encuadrar la investigación desarrollada y presentada posteriormente en los Capítulos 4 y 5. Inicialmente se presentan los principales factores constituyentes de las políticas de mantenimiento, ilustrando la complejidad de seleccionar la estrategia adecuada entre los modelos matemáticos existentes. A continuación se procede a introducir brevemente los modelos básicos de renovación basado en intervalos o en edad, los modelos de mantenimiento basado en la condición y los modelos de inspección de sistemas con fallos revelados y no revelados. Una vez presentadas las diferentes teorías se justifica la idoneidad de los Modelos de Tiempo de Retardo para la resolución de problemas de optimización en sistemas con fallos revelados.

3.1. Estrategias de mantenimiento.

El problema de la optimización del mantenimiento es una cuestión clave en el desarrollo tecnológico, habiendo disfrutado en las últimas cinco décadas de gran interés académico, que ha impulsado el desarrollo de los campos de la ingeniería de la fiabilidad y las teorías de renovación.

La estrategia de mantenimiento se puede definir como el conjunto de políticas de mantenimiento a aplicar a cada modo de fallo del equipo para conseguir los objetivos fijados por la gestión del mantenimiento: fiabilidad, disponibilidad, economía (Crespo, 2008)

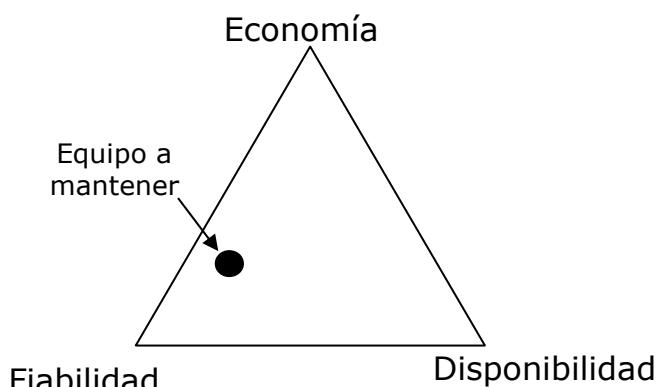


Figura 3.1. : Objetivos de la gestión del mantenimiento. Fuente:
Crespo 2008.

La selección de una política o estrategia de mantenimiento dependerá de los objetivos fijados por la gestión y de la naturaleza del equipo. Existen múltiples clasificaciones de las políticas de mantenimiento, estando entre las más básicas la propuesta por Mazzuchi (Mazzuchi, 2007), que divide las estrategias en:

- Mantenimiento correctivo al fallo
- Mantenimiento preventivo periódico (inspección, renovación o sustitución)
- Mantenimiento basado en la condición.

El gráfico reproducido a continuación resume el árbol de decisión más básico a la hora de seleccionar una política de mantenimiento.

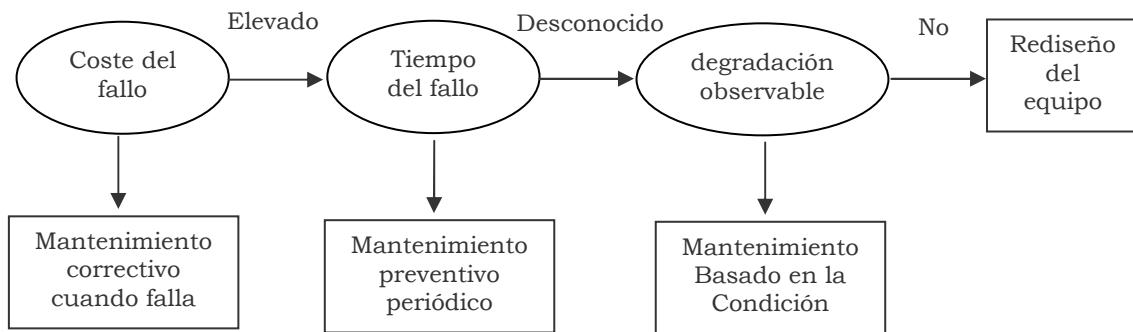


Figura 3.2. : Diagrama de decisión para el mantenimiento correctivo y preventivo. Fuente: Mazzuchi 2007.

La investigación referente a estrategias de mantenimiento es amplia, existiendo numerosos artículos que recogen el estado del arte en cada campo. (McCall, 1963), (Barlow and Proschan, 1965), (Pieskalla and Voelker , 1976), (Osaki and Nakagawa, 1976, 2005), (Sherif and Smith 1981), (Jardine and Buzacott ,1985), (Valdez-Flores and Feldman 1989), (Cho and Parlar, 1991), (Jensen, 1995), (Dekker, 1996), (Pham and Wang, 1996), (Dekker et al., 1997), y (Wang, 2002) entre otros presentan excelentes revisiones del estado del arte en cada tipología de políticas.

Resultaría tan complicado redactar un breve resumen del estado del arte como inútil en lo que se refiere a la presentación de los modelos desarrollados en la investigación aquí presentada. Especial mención en lo referente a la revisión y clasificación de las teorías y modelos existentes merece el texto "Reliability and Optimal Maintenance", (Wang y Pham, 2006), en el que se recogen centenares de modelos matemáticos de optimización del mantenimiento. Wang y Pham utilizan un árbol de clasificación de de políticas de mantenimiento y sus factores constitutivos que da una idea de la complejidad y amplitud del campo de investigación. El esquema, reproducido en la página siguiente, resulta de utilidad a la hora de seleccionar la política de optimización adecuada al problema.

En este capítulo se introducen las políticas de mantenimiento preventivo periódico y basado en la condición necesarias para enmarcar el marco metodológico de la investigación desarrollada. El estudio de las teorías y modelos matemáticos de optimización y la selección de las técnicas apropiadas para el caso del mantenimiento de flotas ferroviarias ha resultado clave en el desarrollo de esta tesis.

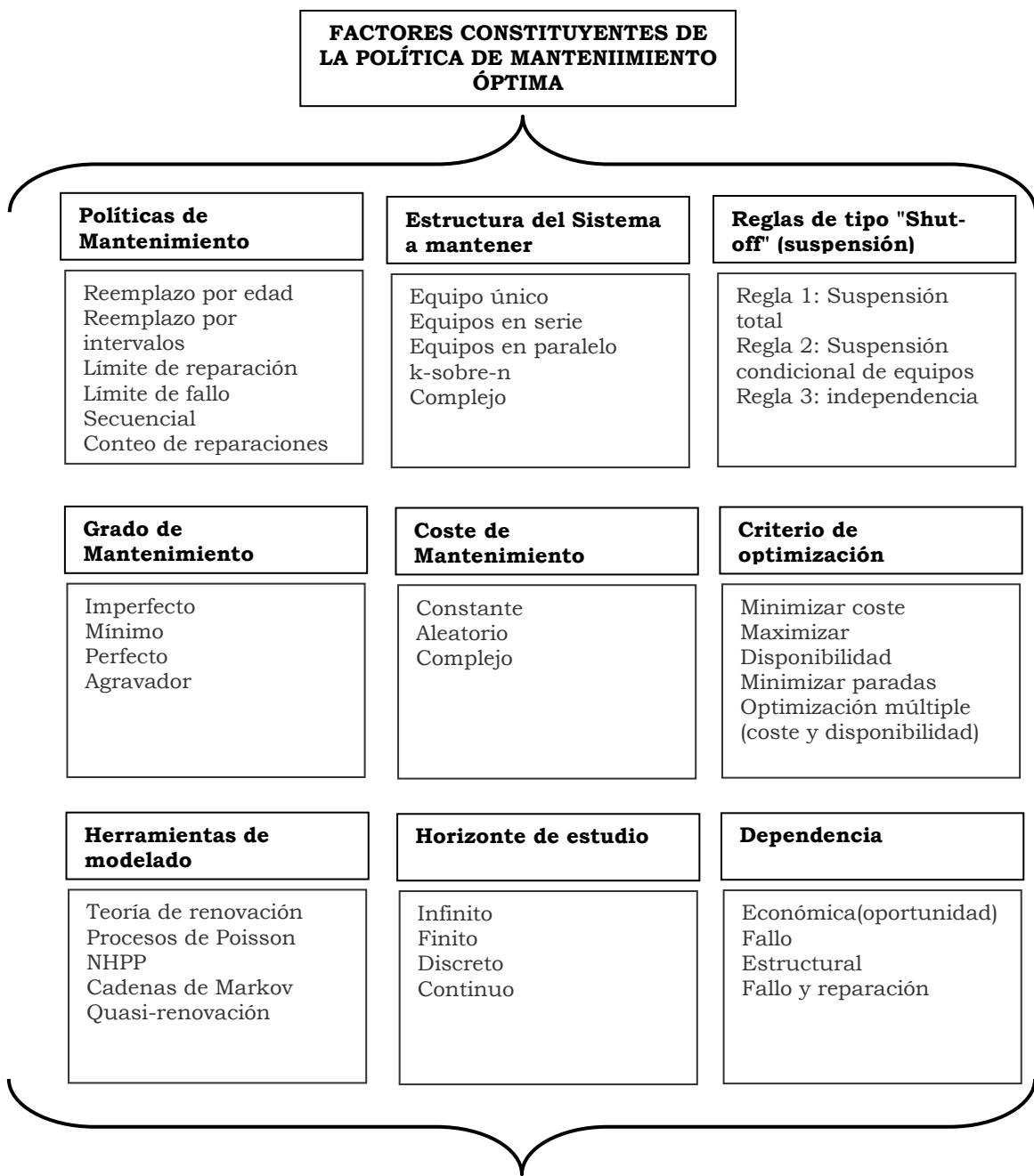


Figura 3.3. : Factores constituyentes de la política de mantenimiento óptima. Fuente: Wang y Pham 2006.

3.2. Modelos estocásticos de renovación o cambio cíclico

Los problemas de mantenimiento en general y de reemplazo en particular se pueden clasificar en estocásticos y deterministas.: (Jardine 2013)

- Los problemas deterministas son aquellos en los que el tiempo y el resultado del reemplazo se conocen con certeza. Por ejemplo, equipos en los que su desgaste implica un incremento de coste, como filtros de automóvil, correas de transmisiones o moldes de inyección.
- En los problemas estocásticos el tiempo de reemplazo y su resultado es cuestión probabilística, y el equipo puede presentar, en su casuística más simple, tan solo dos estados: correcto o fallo, como por ejemplo una bombilla.

La investigación desarrollada ha exigido que el marco teórico se centrase, especialmente, en el examen de métodos estocásticos y su aplicación el campo del mantenimiento de flotas.

Para poder aplicar un modelo de reemplazo estocástico, es necesario que se cumplan dos condiciones:

- El coste total del reemplazo debe de ser superior después del fallo que antes, de manera que un reemplazo antes del fallo suponga un ahorro.
- La tasa de fallo del equipo debe de ser creciente, es decir, debe existir degradación. Si la tasa de fallo es constante, el reemplazo antes del fallo no afecta la probabilidad de que el equipo pueda fallar un instante después del reemplazo, si se ha llevado al estado de renovación perfecto. En estos casos lo apropiado es adoptar una política de reemplazo en el fallo, es decir, no reemplazar ni a intervalos fijos ni en base a su uso.

Sin embargo, el mantenimiento preventivo que no lleva al equipo al estado de renovación perfecto sí que resulta apropiado para sistemas con tasa de fallo constante. Este es el caso de sistemas complejos como los estudiados en los Capítulos 4 y 5, que precisamente por estar formados por múltiples equipos se modelan con una tasa de fallo global constante. En un sistema complejo como un coche o un tren, el reemplazo de un equipo (un filtro, un retén) no implica una renovación perfecta del sistema sino del equipo renovado.

3.2.1. Modelos de renovación basados en calendario o de intervalo fijo

En este modelo de renovación estocástica se lleva a cabo una sustitución o renovación del equipo de manera preventiva en un intervalo de tiempo fijo. También se denominan políticas de reemplazo de intervalo, en grupo o bloque, según los autores.

En el modelo más general se pretende determinar el intervalo óptimo de reemplazos para minimizar el coste total por unidad de tiempo:

- C_p es el coste total de un reemplazo preventivo
- C_f es el coste total de un reemplazo por fallo
- La política de mantenimiento consiste en reemplazos instantáneos a intervalos constantes de tiempo, t_p , independientemente de la edad o estado de uso del equipo.
- En cada ciclo pueden ocurrir reemplazos por fallo sin límite.

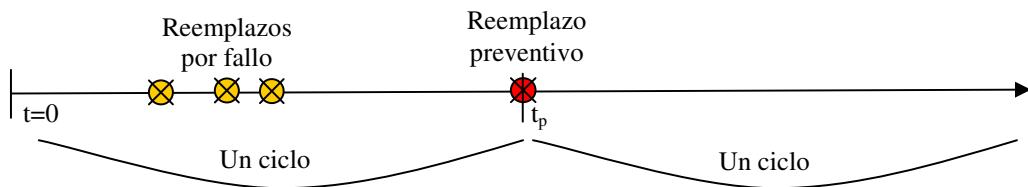


Figura 3.4. : Esquema de modelo de renovación de intervalo fijo.
Fuente: Elaboración propia

El coste del ciclo por unidad de tiempo será:

$$C(t_p) = \frac{\text{Coste total ciclo}}{\text{duración ciclo}} = \frac{\text{Coste un preventivo} + \text{coste de reemplazos por fallo}}{t_p}$$

$$C(t_p) = \frac{C_p + C_f \cdot H(t_p)}{t_p} \quad [3.1.]$$

Siendo $H(t_p)$ el número de fallos esperado en el intervalo $(0, t_p)$. Utilizando la teoría de renovación (Cox 1962) se obtiene el número de fallos esperado, que para una distribución normal será:

$$H(t) = \frac{t}{\mu} + \frac{\sigma^2 - \mu^2}{2 \cdot \mu} \quad [3.2.]$$

Siendo μ y σ^2 la media y la varianza de la distribución de fallos.

El número de fallos esperado se puede calcular por medios discretos o utilizando teoría de renovación y varía en función de la tipología de la distribución de fallo del equipo.

El problema descrito es el más sencillo y general de los pertenecientes al grupo denominado reemplazo de intervalo, en grupo o bloque. Variantes y perfeccionamientos del modelo incluyen:

- *Maximización del tiempo de disponibilidad* en lugar del coste total (Barlow 1965)
- Modelos en los que el *tiempo de reemplazo no es instantáneo*. En este tipo de modelos el tiempo de la renovación es una variable relevante, en particular en los problemas de maximización de disponibilidad.
- Modelos de *reemplazo en grupo*, como el cambio de todas las bombillas de una calle en el mismo intervalo. Estos modelos son similares a los expuestos salvo por la introducción de la variable del número total de elementos a reemplazar.
- Modelos de *reemplazo en múltiples etapas* (Bartholomew 1963), en los que un grupo de elementos similares se pueden dividir en subgrupos en función del coste de su reemplazo al fallo.
- Modelos de *reemplazo oportunista*, (Woodman 1967), en los que se aprovecha una oportunidad en la que el reemplazo es más económico (parada de planta, mantenimiento a otro equipo dependiente del primero, etc...) para llevar la renovación a cabo, incluso antes del tiempo teórico.
- Modelos de *sistemas reparables* (Ascher 1984), en los que la renovación del equipo no ocurre en el momento de mantenimiento. En estos modelos se puede llevar a cabo una reparación mínima, general o finalmente una renovación. Existen por tanto tres tipologías de acciones de mantenimiento en un sistema reparable, y la determinación de los intervalos en los que cada tipología de reparación se debe llevar a cabo forma parte del problema de optimización.

Las casuísticas descritas son las más generales y clásicas, existiendo sobre cada una activas líneas de investigación, publicándose nuevas variantes cada año. (Wang y Pham, 2006) recogieron, ordenaron y comentaron en un excelente texto centenas de variaciones de modelos.

3.2.2. Modelos de renovación basados en edad

Este modelo de renovación estocástica es similar al anterior, pero en este caso se lleva a cabo una sustitución o renovación del equipo de manera preventiva cuando el equipo alcanza cierta edad (o tiempo de uso) en vez de hacerlo en intervalos de tiempo fijos. Cuando ocurren fallos el reloj se pone a cero y la edad comienza a correr, hasta que pasa un tiempo de uso determinado en el que se lleva a cabo un reemplazo preventivo.

En el modelo más general se pretende determinar el tiempo de uso óptimo en el que llevar a cabo un reemplazo y así minimizar el coste total por unidad de tiempo:

- C_p es el coste total de un reemplazo preventivo
- C_f es el coste total de un reemplazo por fallo
- $f(t)$ es la función de densidad de probabilidad de fallo
- La política de mantenimiento consiste en llevar a cabo un reemplazo instantáneo cuando el equipo alcanza una edad o tiempo de uso determinad, t_p , además de los reemplazos por fallo cuando sea necesario.

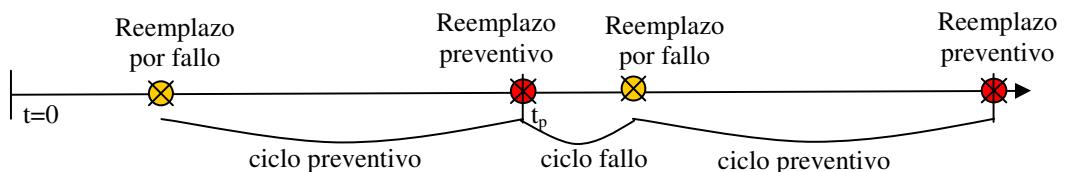


Figura 3.5. : Esquema de modelo de renovación basado en edad.

Fuente: Elaboración propia

En este caso existen dos posibles ciclos: de reemplazo por fallo a reemplazo preventivo y de reemplazo preventivo al nuevo fallo, en caso de no alcanzarse la edad de diseño. El coste del ciclo por unidad de tiempo será:

$$C(t_p) = \frac{\text{Coste esperado total ciclo}}{\text{duración ciclo esperada}}$$

[3.3.]

El coste esperado por ciclo será:

Coste ciclo preventivo x probabilidad ciclo preventivo

$$\begin{aligned} &+ \text{Coste ciclo fallo x probabilidad ciclo fallo} = \\ &= C_p \cdot R(t_p) + C_f \cdot [1 - R(t_p)] \end{aligned} \quad [3.4.]$$

siendo $R(t)$ la función Fiabilidad. La función Fiabilidad es la función complementaria a la función de distribución acumulada o dicho de otro modo, la probabilidad de que un equipo sobrevivirá un tiempo t determinado :

$$R(t) = 1 - F(t) \quad ó \quad R(t) = \int_t^{\infty} f(t) \cdot dt \quad [3.5.]$$

La duración esperada del ciclo será:

$$\begin{aligned} &\text{Duración ciclo preventivo x probabilidad ciclo preventivo} + \\ &+ \text{Duración ciclo fallo x probabilidad ciclo fallo} = \\ &= t_p \cdot R(t_p) + M(t_p) \cdot [1 - R(t_p)] \end{aligned} \quad [3.6.]$$

Siendo $M(t_p)$ la duración media del ciclo hasta el fallo:

$$M(t_p) = \int_{-\infty}^{t_p} \frac{t \cdot f(t) dt}{1 - R(t_p)} \quad [3.7.]$$

Por lo que el Coste esperado por unidad de ciclo será:

$$C(t_p) = \frac{C_p \cdot R(t_p) + C_f \cdot [1 - R(t_p)]}{t_p \cdot R(t_p) + M(t_p) \cdot [1 - R(t_p)]} = \frac{C_p \cdot R(t_p) + C_f \cdot [1 - R(t_p)]}{t_p \cdot R(t_p) + \int_{-\infty}^{t_p} t \cdot f(t) dt} \quad [3.8.]$$

Se trata pues de un resolver la ecuación que depende de la tipología de la distribución de fallo (normal, exponencial, Weibull, etc...) y de sus parámetros de forma (μ, λ, σ^2), buscando el óptimo en función del tiempo de reemplazo. Para problemas sencillo se puede resolver por tanteo, calculando el coste para diferentes tiempos de reemplazo. Sin embargo, lo más habitual es utilizar métodos numéricos para llevar a cabo la optimización de la función coste.

Del mismo modo que para el caso de los problemas de reemplazo a intervalos fijos, el modelo general expuesto para el reemplazo por edad presenta un sinfín de variaciones. Como la *maximización del tiempo de disponibilidad* en lugar del coste total o modelos en los que el *tiempo de reemplazo no es instantáneo*.

De nuevo cabe referir el texto de Wang (Wang y Pham, 2006) en el que se recogen, centenares de variaciones de los modelos básicos.

3.2.3. Método Gráfico de Resolución: los ábacos de Glasser

A continuación se expone el método gráfico desarrollado por Glasser (1969) para la obtención del periodo óptimo de reemplazo preventivo para los problemas de renovación basados en calendario (intervalo o bloque) o envejecimiento (edad). Este método gráfico ha sido inspiración para desarrollar, como parte de esta investigación, el método gráfico para la solución del Método de Tiempo de Retardo.

Los ábacos de Glasser utilizan distribuciones de Weibull para describir las tasas de fallo, y el objetivo es minimizar el coste total. Los gráficos permiten calcular, además del periodo de reemplazo óptimo, el ahorro que implica este reemplazo. El método permite una identificación rápida del orden de magnitud del ahorro, resultando una buena base para entender si resultaría de interés el profundizar en el problema aplicando modelos más complejos.

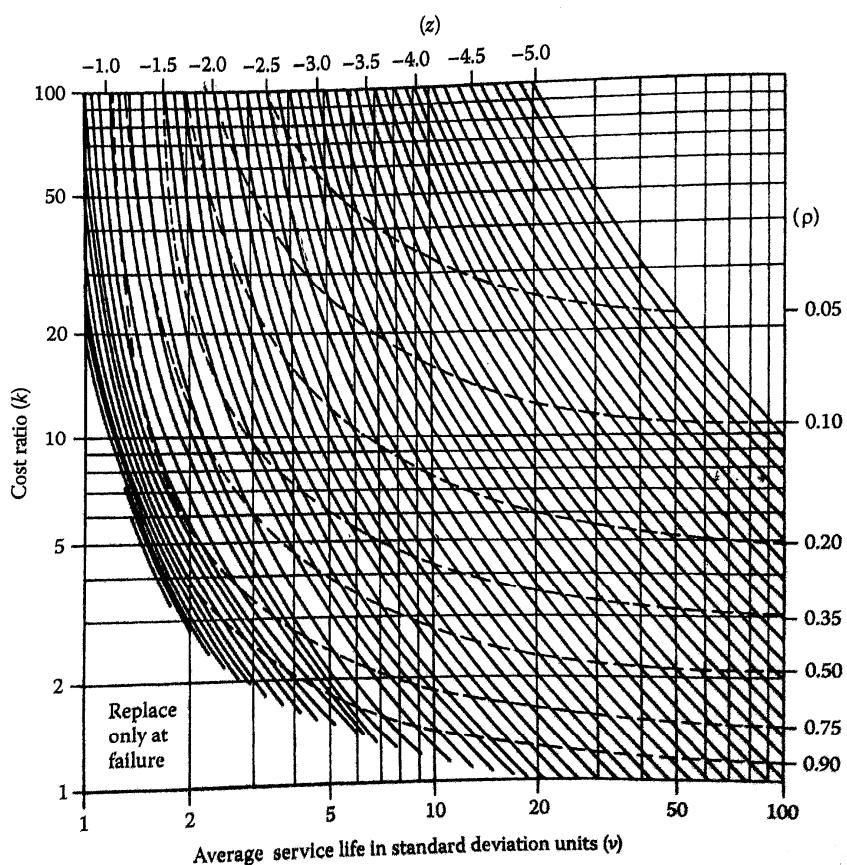


Figura 3.6. :Gráfico de Glasser para problemas de reemplazo basados en calendario o intervalo. Fuente: Maintenance, Replacement and Reliability, Jardine 2013

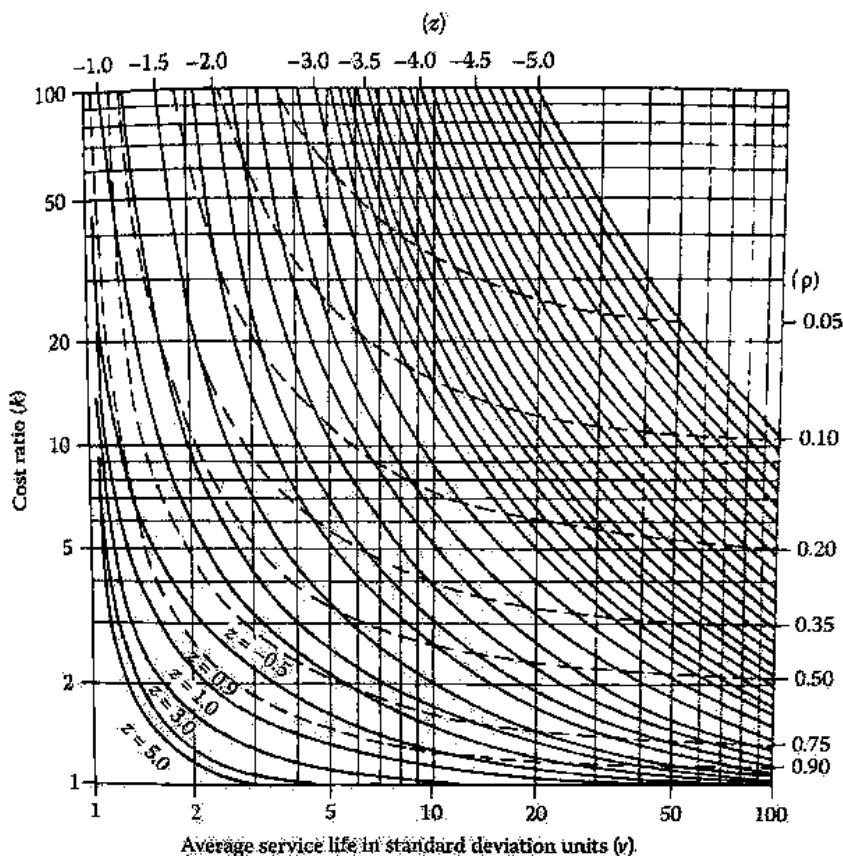


Figura 3.7.: Gráfico de Glasser para problemas de reemplazo basados en edad o envejecimiento. Fuente: Maintenance, Replacement and Reliability, Jardine 2013

Uso de los gráficos

Para utilizar los gráficos será necesario entrar por ambos ejes para buscar el punto de coste mínimo:

- En abscisas, se fija la vertical correspondiente al cociente entre la media y la desviación estándar de la distribución de fallo
- En ordenadas, se determina la horizontal correspondiente al denominado Ratio de Coste, que es el cociente entre el coste del fallo y el coste del reemplazo preventivo.
- La dupla (ν, κ) obtenida determina la línea de isovalores Z , cuya escala se encuentra en el eje secundario de abscisas, en la parte superior del gráfico. Para determinar el valor Z correspondiente, se sigue la isolínea desde el punto (ν, κ) hallado hasta la escala superior, interpolando entre líneas si fuese necesario.

- Una vez obtenido el valor de Z , el valor del tiempo de reemplazo óptimo se calcula utilizando la expresión:

$$t_p = \mu + Z \cdot \sigma$$

- Para calcular el ahorro de este punto frente a una política de reemplazo al fallo, se utiliza la escala del parámetro ρ representada en el eje secundario de ordenadas, en la parte derecha del gráfico. Una vez obtenido el punto correspondiente a la dupla (ν, κ) se sigue su horizontal hasta la escala de la derecha. El parámetro ρ es el porcentaje del coste máximo que corresponde al periodo de reemplazo obtenido

este capítulo se presenta tanto el planteamiento concreto de la investigación como el marco metodológico, en el que se exponen los procesos seguidos para la resolución del problema, seleccionando y aplicando las herramientas necesarias para afrontar la problemática presentada.

3.3. Modelos basados en la inspección.

En las políticas de mantenimiento basadas en inspección se engloban los modelos en los que se intenta optimizar el coste de mantenimiento de un equipo o su disponibilidad en base a determinar la frecuencia óptima de inspección del mismo. Mediante la inspección se determina el estado del equipo y se deciden las acciones a ejecutar. La frecuencia de inspección se determinará en función de los costes de inspección y los beneficios de la misma, como puede ser la corrección a tiempo de un defecto antes de la ocurrencia de un fallo catastrófico de coste más elevado.

Para poder aplicar cualquier modelo basado en la inspección el equipo bajo estudio deberá presentar cierta degradación detectable.

Del mismo modo que en el apartado anterior, en el que se introducían tan solo los modelos estocásticos de renovación más generales, en este punto se van a presentar las tipologías básicas de modelos de inspección. Estas tipologías básicas constituyen la base mínima necesaria, a nivel de marco metodológico, para entender los modelos desarrollados en esta investigación, expuestos en los capítulos 4 y 5.

Las políticas de inspección, en una primera aproximación pueden clasificarse en tres grupos:

- Inspección en equipos con fallos no revelados o de equipos que se utilizan solo en caso de emergencia.

- Inspección en equipos con fallos revelados, o de equipos que están en operación continua
- Mantenimiento basado en la condición, en los que la degradación del sistema se evalúa periódicamente o en continuo y el problema consiste en decidir tanto la frecuencia de inspección como el nivel óptimo de degradación permisible. Se trata de modelado de equipos sometidos a fallos revelados.

3.3.1 Modelos de inspección con fallos no revelados.

Al contrario que los sistemas que trabajan de forma continua, ciertos equipos solo entran en funcionamiento en los momentos en los que su intervención es estrictamente necesaria. Un rociador en una instalación de protección contra incendios, una válvula de seguridad de la caldera de una central térmica, un misil balístico o una balsa salvavidas son ejemplos de equipos de esta naturaleza. Aunque no están sometidos a una operación continua, estos equipos sí sufren degradación y dado que deben de estar listos para actuar en cualquier momento, resulta necesario someterlos a procesos de inspección periódica para así optimizar su fiabilidad. Estos modelos, cuando el intervalo de inspección es constante, se denominan de intervalo de búsqueda de fallos, o más frecuentemente por su acrónimo en inglés modelos de tipo FFI (Failure Finding Interval)

Los equipos sujetos a fallos no revelados se someten a inspecciones periódicas para ver si es necesario repararlos o reemplazarlos y así llevarlos a la condición inicial (nuevo). El objeto de los modelos de inspección con fallos no revelados es encontrar el periodo óptimo de inspección de esta tipología de equipos para o bien minimizar el coste de operación o bien maximizar la disponibilidad del equipo, contando con que generalmente se trata de equipos de seguridad.

Según Moubray (Moubray, 1997), en una planta industrial hasta el 40% de los modos de fallo se pueden categorizar como fallos no revelados, necesitando hasta un 80% de los mismos inspecciones periódicas. No es de extrañar por tanto que la bibliografía sobre modelos de inspección con fallos no revelados sea extensa, siendo un campo de gran actividad en la actualidad. Las variaciones más habituales que diferencian cada uno de los modelos son:

- Los tiempo de inspección, reparación y reemplazo son despreciables o no despreciables
- Tras la inspección el sistema se puede considerar "tan fiable como nuevo" que implica una renovación perfecta, o bien "tan fiable como antes de la inspección".

- Las reparaciones pueden ser perfectas o imperfectas. Tras una reparación perfecta el sistema se renueva volviendo al estado "tan fiable como nuevo", mientras que en una reparación imperfecta el sistema vuelve a un punto entre la renovación y el estado anterior a la reparación
- Las inspecciones pueden ser perfectas (si hay un defecto se detecta siempre) o imperfectas (existe cierta probabilidad de detección)
- Una inspección puede degradar o no el sistema
- Las inspecciones pueden ser periódicas o secuenciales

Desde los primeros modelos de inspección (Balow et al, 1963) y debido a la relevancia práctica del caso, diferentes investigadores han progresado en la elaboración de modelos para cada caso. Los principales avances en el campo han sido llevados a cabo por una decena de grupos de trabajo, siendo los más destacados los trabajos de Vaurio (Vaurio , 1997), Nakagawa (Nakagawa , 1981, 2006), Wang (Wang , 2002), Jardine (Jardine, 2006), Wang (Wang , 2008), Badia (Badia ,2001, 2012).

Tianqiao, en su tesis dirigida por Jardine (Tianqiao ,2012) recoge y discute las variaciones existentes, presentando veinticinco modelos de inspección con fallos no revelados para diferentes casuísticas y resolviendo varios casos prácticos. Este trabajo constituye la referencia principal actualmente en modelos de fallos no revelados.

Como parte de esta investigación se han revisado las citadas líneas de investigación de modelos de fallos no revelados, intentando aplicar esta filosofía al caso del mantenimiento de flotas ferroviarias. Sin embargo, y aunque en un tren existe multitud de equipos de seguridad, se optó en esta investigación por desarrollar un modelo basado en fallos revelados como queda justificado en la siguiente sección.

Por tanto, y dado que abundar en el tema no aporta nada a la investigación, se expone brevemente a continuación la tipología más sencilla de modelo de fallos revelados, para completar así el marco metodológico. Se opta, por presentar un caso de optimización de disponibilidad (Jardine 2013) en vez de optimización de coste para así dar cabida al menos a un caso de esta tipología a lo largo de esta tesis.

- $f(t)$ es la función densidad de distribución de fallo del equipo
- T_i es el tiempo que lleva una inspección. Se asume que si no se requiere reparación o reemplazo el estado es renovado ("fiable como nuevo") . La inspección puede implicar una pequeña acción de mantenimiento (engrase, etc...)

- T_r es el tiempo que lleva una reparación o reemplazo que dejará el equipo en el estado de renovado
- La política de mantenimiento consiste en llevar a cabo inspecciones a intervalos fijos para maximizar la disponibilidad por unidad de tiempo. Se trata por tanto de una política periódica (de calendario, intervalo o bloque) y no secuencial (por edad o envejecimiento)

La figura ilustra las dos tipologías de ciclo existentes: ciclo con fallo o sin fallo.

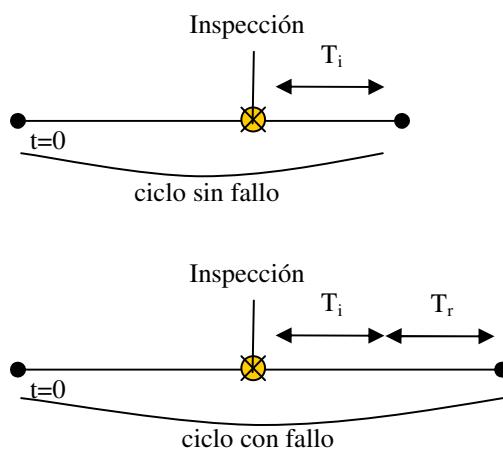


Figura 3.8. : Esquema de problemas de reemplazo con fallos no revelados Fuente: Elaboración propia

La disponibilidad por unidad de tiempo es función del intervalo de inspección t_i :

$$A(t_i) = \frac{\text{disponibilidad esperada total ciclo}}{\text{duración ciclo esperada}} \quad [3.9.]$$

La disponibilidad es el tiempo de la renovación hasta t_i , y por tanto:

$$\begin{aligned} & \text{duración hasta } t_i \text{ ciclo sin fallo} \times \text{probabilidad ciclo preventivo} + \\ & \text{Duración hasta } t_i \text{ fallo} \times \text{probabilidad ciclo fallo} = \\ & = t_i \cdot R(t_i) + M(t_i) \cdot [1 - R(t_i)] \end{aligned} \quad [3.10.]$$

Siendo $M(t_i)$:

$$M(t_i) = \frac{\int_0^{t_i} t \cdot f(t) dt}{1 - R(t_p)} \quad [3.11.]$$

La duración completa del ciclo es:

$$(t_i + T_i) \cdot R(t_i) + (t_i + T_i + T_r) \cdot [1 - R(t_i)] \quad [3.12.]$$

Por lo que la disponibilidad por unidad de tiempo será:

$$A(t_i) = \frac{t_i \cdot R(t_i) + \int_0^{t_i} t \cdot f(t) dt}{(t_i + T_i) \cdot R(t_i) + (t_i + T_i + T_r) \cdot [1 - R(t_i)]} \quad [3.13.]$$

La optimización de esta formulación permite encontrar el periodo óptimo de inspección para maximizar la disponibilidad.

3.3.2 Modelos de mantenimiento basados en la condición.

En las estrategias de mantenimiento de cambio cíclico los equipos se renuevan o reemplazan cada cierto intervalo de tiempo fijo o bien al alcanzar un uso (km, horas, etc...) determinado. La desventaja de estos métodos es que la renovación del equipo se lleva a cabo en base a criterios estadísticos, pudiendo darse el caso de que el equipo se reemplace cuando no ha agotado su vida útil. Aunque estas políticas siguen siendo válidas para ciertos equipos, resultan inadmisibles para sistemas de gran responsabilidad o de elevado coste, como el sistema de frenos o las cajas de grasa de la rodadura de un tren de alta velocidad.

Los modelos de *Mantenimiento Basado en la Condición* (MBC) recomiendan decisiones de mantenimiento en base al estado o condición de un componente o sistema (Qiushi 2012). En el Mantenimiento Basado en la Condición se monitorizan una o más variables de un equipo o sistema para evaluar su estado de deterioro. Cuando el deterioro alcanza un límite preestablecido, es el momento de llevar a cabo una operación de mantenimiento. Se trata de modelar sistemas con fallos revelados, pero monitorizando la degradación de cierta variable, que tiene alguna relación con el fallo del sistema.

Aunque la forma más común de evaluar el estado de un sistema es la inspección visual, los sistemas más generalizados en el Mantenimiento Basado en la Condición son el análisis de calidad de los aceites de lubricación (motores, cajas de transmisión, etc....) y el análisis de vibraciones (bombas y equipos rotativos, etc...). Sin embargo, el desarrollo y abaratamiento de nuevas tecnologías están permitiendo la monitorización en continuo otras variables de diferente naturaleza, lo que está permitiendo llegar a cada vez más número de equipos.

La investigación en el campo del Mantenimiento Basado en la Condición se ha centrado tradicionalmente en el desarrollo de tecnologías y algoritmos para poder diagnosticar fallos en base a la medición de uno o más parámetros físicos. Sin embargo, no hay gran profusión de modelos de optimización del mantenimiento basado en la condición en función del coste total ni por tanto de aplicación práctica de los mismos. Por ejemplo, es frecuente que una planta industrial cuente con, un programa de medición de vibraciones en equipos rotativos como parte de su programa de mantenimiento predictivo. Sin embargo, las mediciones de vibraciones periódicas suelen utilizarse para detectar si grado de deterioro puede implicar un fallo inminente. Es decir, se utilizan para detectar posibles fallos catastróficos, no para aplicar políticas de optimización de coste o disponibilidad en función del grado de deterioro.

El problema de optimización en un modelo de Mantenimiento Basado en la Condición conlleva la resolución de dos incógnitas:

- ¿Cuál es el nivel de degradación óptimo en el que llevar a cabo una acción de mantenimiento? (reemplazo, renovación o mantenimiento imperfecto)
- ¿Cuál es la frecuencia óptima de inspecciones para evaluar la degradación?

Esto implica que, antes poder resolver el problema de optimización de inspecciones similar a los presentados en apartados anteriores, es necesario modelar la degradación del equipo y determinar el límite óptimo permitido.

3.3.2.1. El Modelo de Riesgo Proporcional.

Para modelar la degradación, uno de los modelos más representativos es el Modelo de Riesgo Proporcional (Cox, 1972, Proportional Hazard Model). Se trata de un modelo en el que se combina una función de degradación en función del tiempo con un factor que tiene en cuenta covariables con un significado físico implicado en la degradación del sistema. En particular, en el modelo de riesgo proporcional basado en una distribución Weibull, la probabilidad condicional de fallo h depende del tiempo y de los coeficientes de ponderación de ciertas covariables:

$$h(t, Z_i) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \cdot \exp \left\{ \sum_{i=1}^n \gamma_i z_i(t) \right\} \quad [3.14.]$$

- El primer término es una distribución Weibull con parámetro de forma β y parámetro de escala η .

- El segundo factor es una función exponencial que depende de i covariables $z(t)$, cada una ponderada por su peso, γ . Las covariables son los parámetros físicos de los que depende la probabilidad de fallo, como las partes por millón de hierro en el aceite de una transmisión, la intensidad absorbida por un motor de una puerta, etc...

La determinación de las covariables y sus pesos, así como el ajuste de los parámetros de forma y escala de la función Weibull siguen procesos conocidos, bien descritos en textos de ingeniería de fiabilidad (Elsayed, 2012), en los que se describe cómo llevar a cabo ensayos acelerados de vida y otros ajustes.

El marco metodológico adoptado en esta investigación no exige abundar más en el estudio de este tipo de modelos de riesgo proporcional, que tan solo se presentan para justificar la selección de un modelo de optimización con fallos revelados.

3.3.2.1. La optimización del mantenimiento basado en la condición.

Una vez conocido el proceso de degradación de un sistema y modelado mediante el Modelo de Riesgos Proporcionales u otro similar, resulta necesario resolver el problema de optimización del coste total o de la disponibilidad. Es decir, aplicar las teorías cubiertas en los puntos anteriores. Makis y Jardine (Makis y Jardine, 1992) comenzaron a estudiar la optimización del mantenimiento condicional, y Jardine ha desarrollado variaciones del proceso inicial aplicándolo a la resolución de múltiples casos industriales: Análisis de aceite en minería (Jardine, 2001), inspecciones visuales de la grasa de cojinetes de trenes o análisis de vibraciones en maquinaria alimentaria (Jardine, 1999). Otros autores han resuelto casos en diferentes industrias aplicando este modelo, que se ha convertido en referencia para la optimización de procesos de mantenimiento basados en la condición. (Volk 2002), (Jefferis 2004), (Chevalier 2004), (Lin 2003)

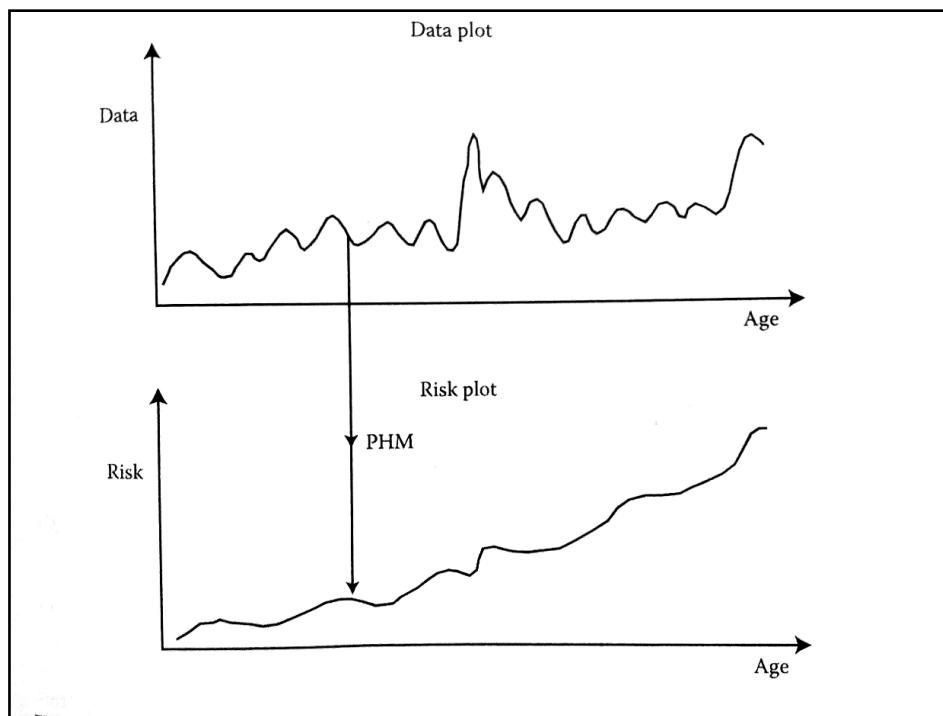


Figura 3.9. : Paso de datos observados en mantenimiento condicional a función riesgo mediante el Modelo de Riesgo Proporcional. Fuente: Maintenance, Replacement and Reliability, Jardine 2013

El modelo de Makis y Jardine parte de la idea de convertir el estado de degradación obtenido en las inspecciones del mantenimiento condicional en un a probabilidad condicional de fallo, $h(t, Z_i)$ utilizando el Modelo de Riesgo Proporcional.

Una vez identificado el valor de $h(t, Z_i)$ se procede a buscar el reemplazo óptimo. Se parte de la idea de que ignorando el riesgo, es decir, si no se lleva a cabo preventivo alguno, el coste de mantenimiento será el máximo y equivalente a una política de reemplazo al fallo. Este valor será el coste del fallo dividido por el tiempo medio hasta el fallo. A medida que el nivel de riesgo permitido se disminuye, se forzarán más inspecciones y acciones preventivas y se obtendrán menos fallos. Dado que el coste del fallo es superior al del preventivo, se acabará obteniendo una función de coste en función del riesgo permitido con un mínimo, que corresponderá al nivel de riesgo óptimo permitido en el que el equipo deberá ser mantenido.

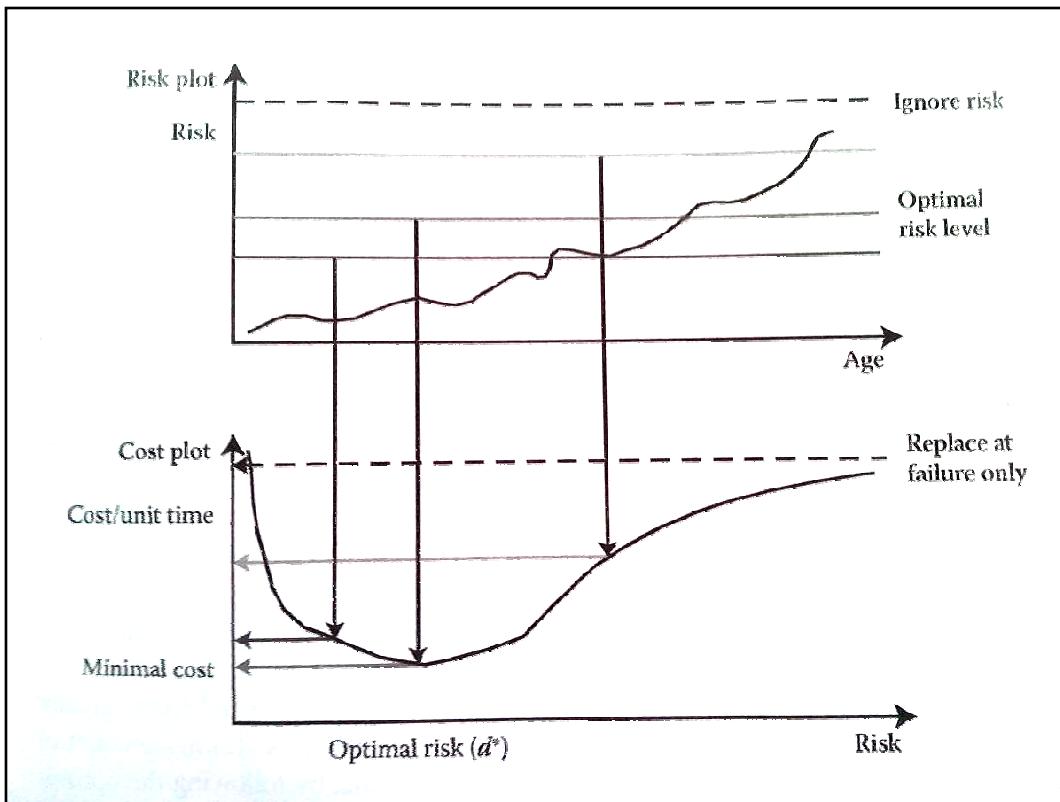


Figura 3.10. : Paso de función riesgo condicional a función de coste. Fuente: Maintenance, Replacement and Reliability, Jardine 2013

El modelo de Makis y Jardine (Makis y Jardine ,1992) define el coste esperado por unidad de tiempo $\phi(d)$ en función del nivel límite de degradación d :

$$\phi(d) = \frac{C[1 - Q(d)] + (C + K) \cdot Q(d)}{W(d)} \quad [3.15.]$$

- $\phi(d)$ es la función coste por unidad de tiempo a optimizar en función del nivel de degradación
- $Q(d)$ es la probabilidad de que el sistema presente fallo a nivel de deterioro d
- C es el coste de una operación de mantenimiento preventivo. $C[1-Q(d)]$ es por tanto el coste de preventivo por la probabilidad de que el sistema no presenta fallo si se espera a hacer la inspección hasta el nivel de deterioro d
- $C+K$ es el coste de una reparación si el sistema falla, el coste de una operación de correctivo. Se observa que el coste del correctivo $C+K$ es superior al coste del preventivo C . Es decir, existe un coste adicional, una penalización, en caso de que el sistema se deje fallar. $(C+K) Q(d)$ es el

coste de correctivo por la probabilidad de que el sistema falle si se espera a hacer una inspección hasta el nivel de deterioro d.

- $W(d)$ es el tiempo esperado hasta el mantenimiento, bien sea preventivo o correctivo.

Uno de los trabajos sobre mantenimiento condicional más afines a la investigación desarrollada en esta tesis es el publicado por Lin Shuai (Shuai, 2014). El autor desarrolla un modelo de diagnóstico de fallos para un diseño particular de puerta de una flota ferroviaria. El modelo de diagnosis está orientado a desarrollar acciones de Mantenimiento Basado en la Condición. El procedimiento seguido es el habitual en el desarrollo de modelos de mantenimiento condicional:

- Primero, modela el sistema mecánico de un diseño de puerta en particular. El modelo cuenta con trece parámetros inicialmente monitorizados en laboratorio, como intensidad absorbida por el motor, ángulo de giro de diferentes elementos del mecanismo, etc...Estas son las covariables del Modelo de Riesgo Proporcional.
- A continuación lleva a cabo un Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMFE) para detectar los diferentes modos de fallo de las puertas.
- Para cada modo de fallo, se estudia el comportamiento (degradación) de los parámetros modificados, creando así un patrón de diagnóstico de fallos. Con este procedimiento se podría llegar a obtener los parámetros para ponderar cada una de las covariables.
- Finalmente verifican el diagnóstico de fallos reproduciendo en una puerta en el laboratorio cada tipo de defecto.

Para poder aplicar a partir del trabajo de Ling Shuai un modelo de optimización como el propuesto por Makis y Jardine, sería necesario obtener en laboratorio la curva de riesgo proporcional $h(t, Z_i)$ aplicando ensayos acelerados de vida etc... Una vez obtenidos los parámetros de ajuste de la curva, se podría proceder a estimar el nivel de degradación óptimo para o bien, minimizar los costes de mantenimiento o maximizar la disponibilidad. Finalmente resultaría conveniente comprobar en campo los resultados y llevar a cabo un análisis de sensibilidad de los resultados. Todo esto sería válido tan solo para el modelo de puerta investigada.

En la siguiente sección se discuten las bondades y objeciones de esta metodología y se razona la adopción y desarrollo, en la investigación plasmada en este tesis, de un modelo de fallos revelados aplicando el concepto de "*tiempo de retardo*", en vez de aplicar la metodología del Modelo de Riesgo Proporcional.

3.3.3 Modelos de inspección con fallos revelados: Modelo de Tiempo de Retardo

Tal y como se ha expuesto en el apartado anterior, los modelos de Mantenimiento Basado en la Condición se pueden utilizar para determinar el tiempo de inspección reemplazo o renovación óptimo para minimizar coste o maximizar disponibilidad, siempre y cuando se monitorice el estado de degradación de una variable (estado de aceite, temperatura refrigerante....) que sea proporcional a la probabilidad de fallo. La complejidad de esta tipología de modelos hace que su aplicación quede reservada a unos pocos equipos de elevado coste o riesgo. El proceso de aplicación del Método de Riesgo Proporcional a unas puertas exteriores de Lin Shuai (Shuai ,2014) expuesto en el punto anterior ilustra la dificultad de correlacionar la diagnosis de los fallos con las covariables necesarias para aplicar los modelos de optimización del tipo propuesto inicialmente por Makis y Jardine (Makis y Jardine ,1992). Los modelos de optimización de Mantenimiento Basado en la Condición conllevan soluciones ortodoxas y precisas, pero el coste del modelado puede suponer un inconveniente en ciertos casos.

En la presente investigación se ha pretendido adaptar un modelo de optimización de costes mantenimiento a aplicaciones de flotas ferroviarias. El objetivo ha sido desarrollar una herramienta que, ortodoxa en su base matemática, permita su aplicación práctica en el campo de la ingeniería del mantenimiento ferroviaria.

El Modelo de Tiempo de Retardo presentado por Christer y Waller [1984]en su formulación generalizada ofrece al ingeniero de mantenimiento ferroviario la posibilidad de evaluar la eficiencia de los programas de inspecciones del plan de mantenimiento de su explotación de un modo sencillo y eficaz, obteniendo resultados suficientemente precisos sin tener que recurrir a modelos más complejos.

El modelo básico de tiempo de retardo para un sistema complejo se basa en el concepto del tiempo de retardo h de un defecto, que es el tiempo que transcurre desde que un defecto puede ser detectado por medio de una inspección hasta que el defecto se convierte en un fallo.

El proceso queda por tanto dividido en dos etapas, lo que ha permitido el desarrollo de los diferentes modelos de tiempo de retardo para la optimización de políticas de mantenimiento.

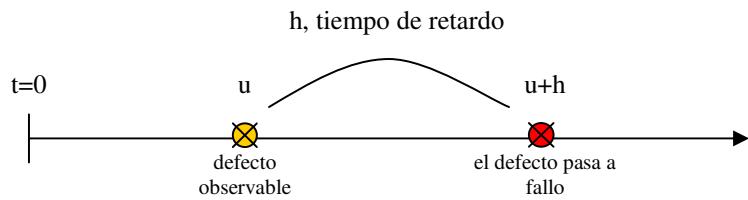


Figura 3.11. : Relación temporal entre defecto observable, fallo y tiempo de retardo. Fuente: Elaboración propia

La familia de modelos de optimización en base a inspección con fallos revelados englobadas bajo la denominación "Modelos de Tiempo de Retardo" se considera apropiada para la optimización de las inspecciones de seguridad ferroviarias y se han adaptado en esta investigación para su uso ferroviario mediante la aplicación de métodos gráficos.

El modelo y sus variantes se describen en los siguientes capítulos, ya como parte del Marco Metodológico de esta tesis. La simplicidad de estos modelos ha permitido desarrollar el Método Gráfico General presentado en Capítulo 4 y verificado en el Capítulo 5.

Capítulo 4

FORMULACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO DE OPTIMIZACIÓN DEL COSTE DE LAS OPERACIONES DE MANTENIMIENTO

RESUMEN: En este capítulo se presenta tanto el planteamiento concreto de la investigación como el marco metodológico, en el que se exponen los procesos seguidos para la resolución del problema, seleccionando y aplicando las herramientas necesarias para afrontar la problemática presentada. Inicialmente se expone el objeto de la investigación en cuestión, partiendo del planteamiento general de la optimización económica del mantenimiento de flotas ferroviarias en función de la fiabilidad. A continuación se justifica la selección del método de utilizado en la investigación, frente al resto de metodologías expuestas en los capítulos previos concernientes al marco teórico. Se comienza introduciendo la teoría matemática denominada "Modelo de Tiempo de Retardo" y su adaptación al caso del mantenimiento de flotas ferroviarias. Seguidamente se describe el procedimiento adoptado para la transposición de los resultados obtenidos hasta llegar al cálculo del Coste de Ciclo de Vida (LCC) . Por último se revela el método gráfico desarrollado como parte de esta investigación para la resolución del "Modelo de Tiempo de Retardo", así como su aplicación particular al caso del mantenimiento de flotas

4.1. Marco Metodológico.

En los capítulos anteriores se ha presentado el marco teórico necesario para afrontar la investigación, incluyendo el conjunto de teorías y conceptos que se han considerado necesarios para afrontar el problema a investigar. En este capítulo se presenta tanto el planteamiento concreto de la investigación como el marco metodológico, en el que se exponen los procesos seguidos para la resolución del problema, seleccionando y aplicando las herramientas necesarias para afrontar la problemática presentada.

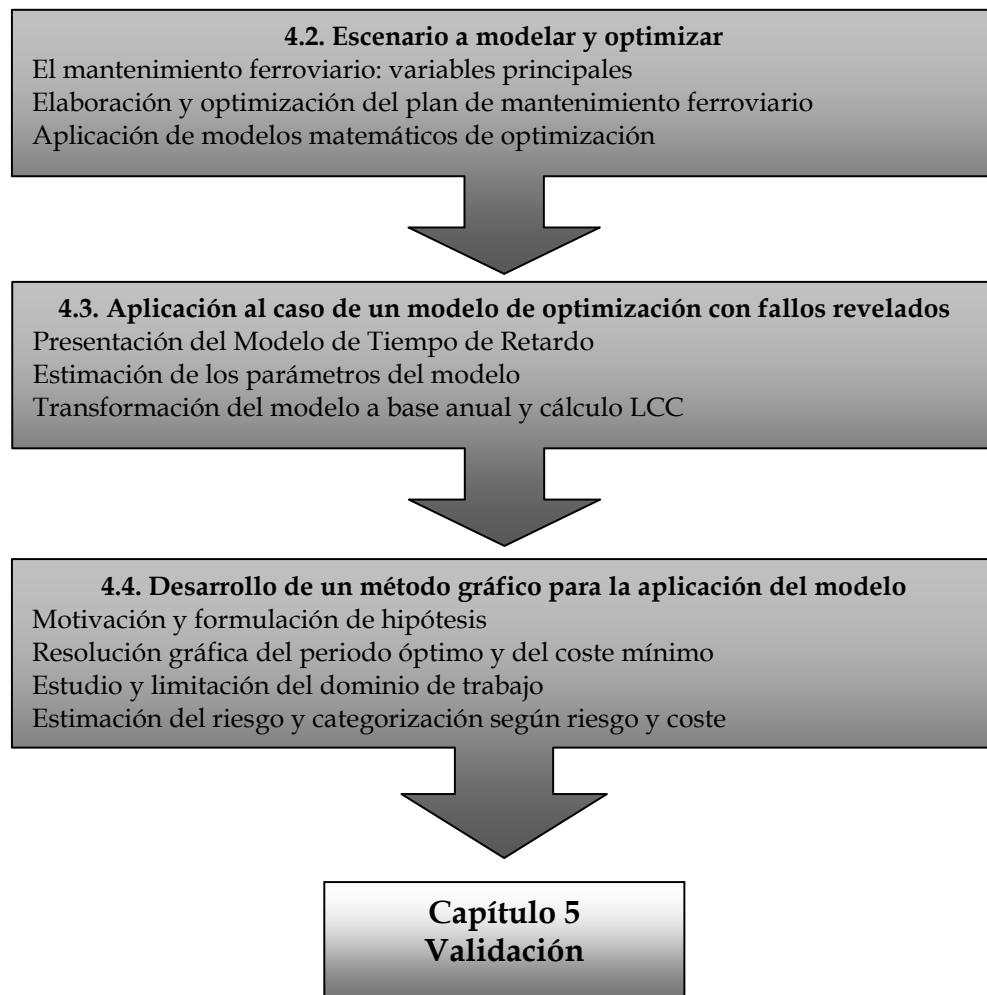


Figura 4.1. :Esquema del Marco Metodológico presentado en este capítulo. Fuente: Elaboración propia

El Capítulo 4 comienza exponiendo la motivación para inmediatamente describir las hipótesis utilizadas. A continuación se procede a exponer la manipulación algebraica llevada a cabo para agrupar las variables y definir los parámetros que permiten la resolución gráfica del Modelo de Tiempo de Retardo. Utilizando un algoritmo programado en lenguaje Python se grafica la

solución de periodo óptimo y posteriormente el ábaco de ahorro máximo, a partir del cual se obtiene el coeficiente de ahorro, necesario para calcular el coste mínimo. Adquirida la capacidad de representar gráficamente las soluciones del "Modelo de Tiempo de Retardo" se lleva a cabo un estudio del dominio de la función, lo que permite entender el comportamiento de la familia de soluciones para el rango de valores más habitual en el mantenimiento de flotas, acotando así el dominio de las dos variables en entrada en los ábacos. A continuación se completa el Modelo Gráfico desarrollando un ábaco adicional que permite obtener directamente el ahorro máximo. Con esto queda completo el Modelo Gráfico para la resolución del "Modelo de Tiempo de Retardo", principal aportación de esta investigación tanto por su novedad como por su aplicabilidad a campos no estrictamente ferroviarios.

El modelo se completa con un estudio de la variación del riesgo resultante de optar por políticas no óptimas, resolviendo el apuntamiento de la función de coste óptimo por métodos gráficos y representando el gradiente del riesgo en base a las mismas variables utilizadas en el Método Gráfico General. A continuación, y a la vista de ciertas simplificaciones aplicadas en otras investigaciones sobre el "Modelo de Tiempo de Retardo", se desarrolla el Método Gráfico Simplificado de posible aplicación en casos en los que se considere la tasa de fallo igual a la del tiempo de retardo.

Así, una vez justificada la aplicación del modelo y desarrollados los Métodos Gráficos, procede validar el modelo gráfico y aplicarlo a un caso práctico de mantenimiento de flotas ferroviarias, cuestiones que se resuelven en el siguiente capítulo, el Capítulo 5.

4.2. Escenario general a modelar y optimizar

4.2.1. El mantenimiento de una flota ferroviaria: variables principales.

A la hora de estudiar una explotación de mantenimiento de material rodante, como es el caso de esta investigación, resulta imprescindible conocer inicialmente las características principales que la definen. Estas variables quedan impuestas desde antes de la puesta en marcha de la operación formando parte de los pliegos de la licitación de la adquisición del material rodante en el caso más habitual, que es el de licitación de la adquisición y el mantenimiento simultáneamente. Las variables pueden clasificarse según su naturaleza:

Tamaño y tipología de la flota

Para satisfacer la demanda requerida de transporte de pasajeros se comienza dimensionando la flota, para lo que cada fabricante estima el tamaño de la flota a ofertar, que dependerá de la tipología del tren. Las principales variables son:

- Número de composiciones o trenes que componen la explotación
- Numero de coches por composición
- Número de coches o trenes de reserva

La tipología de material rodante ofertada por cada fabricante juega un papel importante, pues cada tecnología ofrece sus ventajas e inconvenientes. Así, diferentes fabricantes ofertarán diferente número de coches por composición en función de la capacidad de cada coche, y del mismo modo, el número de coches o trenes de reserva variará en función de la tecnología. Este último factor, dependiente en gran medida de la disponibilidad garantizada por el mantenedor, resulta determinante, pues la cantidad de coches de reserva afectados eleva la cuantía de la oferta de modo importante. Así, hay fabricantes que ofertan una composición de reserva completa, mientras que otros apenas ofertan varios coches para ir intercambiando en caso de avería del material en servicio.

Del mismo modo, cada fabricante aporta tecnología propietaria, por lo que el número de unidades motoras y de material remolcado así como su tipología variará según el diseño del tren.

Circulación y condiciones de uso

Las condiciones de circulación del tren son parte de la caracterización de la demanda. En este grupo de variables se recogen, entre otras, las siguientes:

- Kilómetros anuales por tren
- Velocidad media de circulación
- Horas anuales de circulación
- Duración del ciclo de vida
- Número de paradas
- Número y ubicación de los talleres de mantenimiento

Estas variables son imprescindibles para calcular los costes anuales de mantenimiento preventivo y correctivo, y por tanto poder dimensionar la explotación tanto en mano de obra como en inventario. En general, dado que las rutas están establecidas, el número de kilómetros anuales suele ser un dato de obtención inmediata. Sin embargo, habitualmente los datos de fiabilidad y por ende la determinación del número y naturaleza de operaciones de preventivo, suelen estimarse en función de las horas de funcionamiento. Para poder convertir los kilómetros circulados en horas de funcionamiento se requiere conocer la velocidad media de la explotación. El valor de la velocidad media puede estimarse antes de la puesta en marcha de la operación, pero no se conocerá con precisión hasta que los trenes se pongan en circulación; su estimación deberá de ser valorada cuidadosamente debido a su influencia en el coste y dimensionado de la operación de mantenimiento.

El número de paradas ayudará a definir el número de ciclos diarios de componentes como las puertas o los frenos, así como los ciclos de aceleración.

Finalmente, la ubicación y cantidad de talleres de mantenimiento determinarán la frecuencia con la que los trenes podrán recibir mantenimiento. En el caso ideal todas las composiciones volverían diariamente a una cochera única, dotada de tornos de foso y del resto de equipos y recursos necesarios para ejecutar un mantenimiento óptimo. Sin embargo, es habitual que, debido a las rutas

Penalizaciones y otras variables contractuales

Los pliegos de condiciones imponen condiciones económicas que fuerzan a los mantenedores a ejecutar su trabajo con la máxima eficacia y eficiencia para conseguir retornos. Las tipologías y cuantía de las penalizaciones establecidas en contrato limitan el rendimiento económico de la explotación de mantenimiento. Las penalizaciones constituyen costes que se incurren cuando un subsistema del tren presenta un fallo revelado, es decir, un fallo que no

necesita inspección para ser detectado sino que su mera ocurrencia conlleva consecuencias detectables. En función de las consecuencias del fallo, los contratos suelen distinguir diferentes tipologías de penalizaciones, siendo común la siguiente clasificación:

- Penalización por fallo de confort: Fallo relacionado con el confort de los pasajeros (Aire- acondicionado, Iluminación interior, Audio...).
- Penalización por fallo de servicio; Fallo relacionado con los servicios prestados a bordo del tren a los viajeros (Cafetería, Microondas, Puertas interiores...).
- Penalización por fallo con retraso >15min; Fallo relacionado con un retraso de más de 15 minutos. Por ejemplo, condenación de una puerta exterior, etc..
- Penalización por fallo con retraso >2h ó cancelación; Fallo relacionado con un retraso de más de 2 horas ó por la cancelación del tren.

Los valores económicos de cada penalización dependen del contrato, estando en el rango de los cientos de euros para los fallos de servicio hasta el rango de varios miles para las penalizaciones por cancelación.

Además de las penalizaciones, los pliegos exigen condiciones de disponibilidad y fiabilidad globales, siendo la unidad de medida habitualmente kilómetros entre fallos.

Variables económicas

Existe un último conjunto de variables, no técnicas en este caso, que son las variables económicas que afectan la explotación. Estas variables han de tenerse en cuenta para el cálculo

- Costes laborales en la región, así como condiciones sindicales que afecten el coste final de la mano de obra.
- Costes de mantenimiento del inventario de repuestos y fungibles.
- Condiciones macroeconómicas de la región, como
 - Inflación y evolución general de los costes
 - Tipo de cambio en caso de ser el país de origen de los repuestos diferente del país de explotación.
 - Tipos de interés y coste de la financiación local.

Estas variables pueden categorizarse como no vinculadas a la operación y tradicionalmente no han sido consideradas por los técnicos responsables de las operaciones de mantenimiento. Sin embargo, el hecho de que las Administraciones exijan cada vez más resultados bajo el enfoque de Coste de Ciclo de Vida (LCC) implica que la incorporación a los estudios de mantenimiento de las citadas variables económicas haya cobrado mayor importancia en las últimas décadas.

4.2.2. Proceso de elaboración y optimización del plan de mantenimiento.

4.2.2.1. Proceso de elaboración

En el diseño de un plan de mantenimiento se parte de la información aportada por los fabricantes de cada subsistema, que a su vez deberá preparar la programación del mantenimiento de dicho equipo en base a las condiciones particulares de trabajo exigidas por los pliegos del concurso de adjudicación. El responsable de elaborar el plan de mantenimiento recogerá la información de todas las partes y generará el plan, que luego será optimizado en mayor o menor medida.

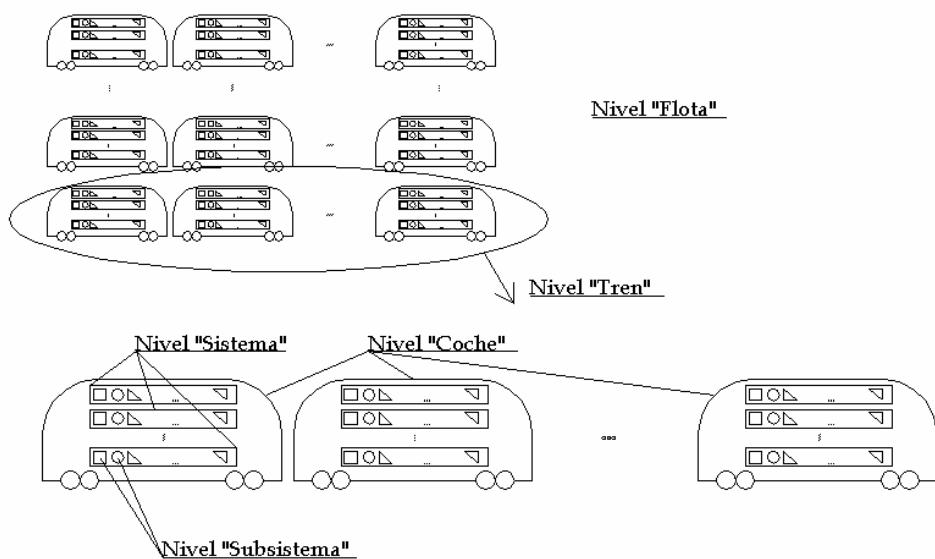


Figura 4.2.: Esquema de la anidación de niveles a la hora de preparar un calendario de mantenimiento preventivo Fuente:
Elaboración propia

Inicialmente, el plan de mantenimiento preventivo se construye uniendo los requisitos impuestos por diferentes agentes según el siguiente esquema:

- Mantenimiento legal impuesto por el Regulador.

Las autoridades nacionales o supranacionales como la UIC (Union Internationale des Chemins de Fer) en Europa o la FRA (Federal Railroad Administration) en EEUU imponen operaciones de mantenimiento habitualmente relacionadas con la seguridad. Así, en función de la tipología de la operación, puede resultar obligatorio inspeccionar ciertas características del sistema de frenos o el perfil de rodadura incluso diariamente.

- Operaciones impuestas por contrato

La Administrador u Operador que adquiere el material rodante exige habitualmente ciertas operaciones relacionas con el confort o servicio, como la frecuencia y calidad de la limpieza exterior e interior.



Figura 4.3. :Diagrama de las diferentes fuentes condicionantes a para confeccionar un plan de mantenimiento preventivo. Fuente:
Elaboración propia

- Recomendaciones de suministradores de equipos

Los proveedores de cada subsistema (asientos, puertas, compresores, válvulas de frenos,etc...) aportan, como parte del alcance de su suministro, el plan de mantenimiento de cada equipo . Estos fabricantes de subsistemas utilizan metodologías propias para determinar las operaciones de mantenimiento necesarias para asegurar los objetivos de mantenibilidad exigidos por el comprador. Así, cuando un fabricante de material rodante diseña un tren para una explotación en particular en base a un pliego de condiciones determinado, las condiciones de dicho plan se trasladan hasta el fabricante de cada

subsistema. Estos proveedores adaptan pues, tanto el diseño como el plan de mantenimiento a cada pliego de condiciones.

Los suministradores de subsistemas aportarán tanto el calendario de operaciones de mantenimiento preventivo como las correspondientes tasas de fallo para estimar los costes de mantenimiento correctivo. Para ello, el proveedor utilizará las metodologías y recursos que considere necesarios, desde la simple estimación en base a la experiencia y datos históricos hasta los estudios formales de mantenimiento, utilizando técnicas de Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMFE) y ensayos acelerados de estimación de tasa de fallos de cada subconjunto. Idealmente, el plan de mantenimiento recomendado queda particularizado para cada explotación en particular, pudiendo resultar vinculante en lo concerniente a garantías.

En el Capítulo 3 se introdujo el esfuerzo realizado por UNIFE en su proyecto UNIDATA/UNILIFE para homogeneizar los datos suministrados por los proveedores bajo criterios de Coste de Ciclo de Vida (LCC).

- Recomendaciones del propio fabricante del material rodante.

Aunque el fabricante de material rodante adquiere gran cantidad de subconjuntos de terceros, también diseña y fabrica numerosos componentes del tren, quedando lejos de ser un mero integrador. De hecho, son en parte estos subsistemas los que aportan el hecho diferencial tecnológico a cada marca.

Las metodologías aplicadas por el fabricante de material rodante para definir el plan de mantenimiento de cada subsistema variarán, igual que en el caso del proveedor externo, desde la aplicación de datos históricos o la experiencia del diseñador hasta procedimientos formales basados en ingeniería de la fiabilidad.

- Confección del plan de mantenimiento preventivo

El responsable de confeccionar el plan de mantenimiento recibe los calendarios con las operaciones de mantenimiento preventivo exigidos por todos los agentes: Regulador, Promotor, proveedores de subsistemas y otros departamentos de su misma compañía. Ordenando esta información se obtiene el plan de mantenimiento preventivo del tren, a partir del cual se estiman las horas hombre y los repuestos necesarios para la operación. Estos costes de materiales y de mano de obra constituyen el coste de mantenimiento preventivo del tren.

- Estimación de los costes de correctivo y obtención del plan de mantenimiento inicial.

Para estimar los costes que se incurrirán en mantenimiento correctivo en la explotación, el responsable de confeccionar el plan de mantenimiento utiliza las tasas de fallo aportadas por los fabricantes de cada equipo. A partir de las tasas de fallo y conociendo el kilometraje anual puede estimar el número de operaciones de mantenimiento correctivo esperadas, así como su naturaleza y coste.

Una vez compuestos el calendario de preventivo más los costes previstos de correctivo, se obtiene como resultado el coste directo de la operación de mantenimiento de la explotación. Con el número de horas hombre se dimensiona la plantilla de mano de obra directa, y con el coste de repuestos se dimensiona el inventario.

Una vez estimados los costes directos, se procede a estimar los costes indirectos de la explotación para así obtener el coste total:

- Coste de mano de obra indirecta, compuesto por los mandos intermedios, técnicos necesarios, etc...
- Coste de gestión del inventario atribuibles a toda la logística de compras y almacén, incluidos sus gastos financieros
- Costes generales, como alquileres, electricidad, profesionales externos, etc...

4.2.2.1. Fases en la optimización del plan de mantenimiento.

La optimización del mantenimiento de una flota ferroviaria es un proceso que acompaña al tren durante toda su vida útil. Para poder enmarcar esta investigación temporalmente se diferencian primero las dos fases de optimización:

Fase de diseño: Enfoque estático y teórico

Según lo expuesto en el apartado anterior, la operación de mantenimiento global se dimensiona en base al sumatorio de los requisitos de mantenimiento de cada subconjunto, que son establecidos por el fabricante de cada uno de dichos subconjuntos.

Por tanto, el plan global será óptimo tanto en cuanto los planes parciales de cada subconjunto así lo sean. El responsable del ensamblaje de todos estos planes de mantenimiento parciales no podrá si no exigir al responsable del plan de cada

subconjunto la optimización del plan parcial, quedando el responsable del plan global por tanto a expensas del criterio técnico del proveedor.

Durante la fase de diseño del plan de mantenimiento, el fabricante estará habitualmente forzado por los pliegos de la licitación a expresar su coste de mantenimiento en términos de Coste de Ciclo de Vida (LCC). Por lo tanto, el fabricante del material rodante, a la hora de adquirir un subconjunto, utilizará los mismos criterios en la selección de equipos que le son exigidos a él como fabricante del tren. Es decir, al exigir las Administraciones un enfoque de Coste de Ciclo de Vida (LCC) para comparar licitadores, los licitadores a su vez exigen la misma aproximación LCC en su selección de proveedores de subconjuntos. Así, la metodología UNILIFE/UNIDATA desarrollada por UNIFE ya trataba de homogeneizar los criterios de cálculo de Coste de Ciclo de Vida (LCC) de los subconjuntos, para ayudar al fabricante a seleccionar el proveedor con criterios alineados con los exigidos por los pliegos.

Durante la fase de diseño se diseña el plan de mantenimiento de todos los subconjuntos que luego formarán el tren. Teóricamente estos planes deberían de recomendar el calendario de preventivo óptimo que minimizara el coste total. Sin embargo, existen múltiples factores que aportan incertidumbre sobre la idoneidad de las soluciones teóricas obtenidas en esta fase inicial:

- *Factores teóricos:* El campo de la ingeniería de la fiabilidad y los modelos de optimización de costes de mantenimiento son ramas de la ingeniería que aunque a nivel teórico hace décadas que suscitan creciente interés, su aplicación rigurosa exige recursos no siempre justificables en el proyecto. Será necesario entender la rigurosidad del procedimiento de cálculo para estimar la validez de la solución: ¿Se han desarrollado los ensayos acelerados de vida apropiados para determinar la naturaleza de las distribuciones de fallo y sus parámetros con suficiente precisión? ¿Se han llevado a cabo análisis modales de fallos y efectos (AMFE) del conjunto? ¿Se ha analizado la relación entre las tipologías de fallo y estudiado los diagramas de bloque de fallos? ¿Por qué se han elegido políticas de reemplazo basadas en calendario frente a las basadas edad? ¿se ha valorado el mantenimiento en bloque o basado en la condición? ¿qué criterios se han utilizado para fijar el calendario de inspecciones de seguridad?

Por tanto, cabe preguntarse para cada subconjunto si tanto el planteamiento teórico como la solución obtenida son óptimos así como el grado de precisión de la solución aportada para cada plan parcial.

- *Grado de caracterización de la explotación:* Para poder valorar la solución aportada para cada subconjunto es necesario entender el grado de

individualización del plan de mantenimiento del equipo a la explotación particular bajo análisis. Factores como el estado de la vía, las frecuencias con las que cada composición visita el taller, los medios técnicos y humanos disponibles en cada taller, las condiciones de circulación, los factores climáticos, las condiciones económicas de los pliegos, etc.... convierten a cada operación en única. Además de los factores netamente técnicos, el diseñador de cada plan parcial deberá tener en cuenta el coste de la mano de obra y de los repuestos, así como de las penalizaciones del contrato.

- *Incertidumbre del modelo y su caracterización:* Dado que el plan de mantenimiento de cada subconjunto se resuelve durante la fase de diseño, existe cierta incertidumbre en las variables del modelo que no se podrá discernir hasta que existan datos históricos de la explotación. Esta incertidumbre afecta a la precisión del diseño del calendario óptimo.
- Comerciales y de garantía: Finalmente, existen factores no netamente técnicos que afectan a la solución óptima obtenida. Factores como las condiciones de garantía exigidas al fabricante del subconjunto, el precio fijado a los repuestos u otros factores comerciales pueden implicar modificaciones sobre el óptimo teórico calculado.

Por tanto es factible que exista margen de optimización en los planes de mantenimiento de los subconjuntos que forman el tren desarrollados en la fase de diseño. Resulta preciso entender el procedimiento seguido por todos los agentes en el diseño de cada plan de mantenimiento parcial para así poder diseñar las posibles modificaciones durante la fase de explotación.

Fase de operación: Enfoque dinámico y práctico.

Una vez iniciada la explotación se comenzarán a generar los datos históricos necesarios para ajustar las variables de los modelos de la fase de diseño. La casuística varía desde operaciones con un solo ingeniero de mantenimiento a situaciones en las que existen importantes recursos materiales y humanos dedicados a la optimización del plan.

En esta fase de optimización la captura y tratamiento de datos (averías, inspecciones, penalizaciones....) es una parte fundamental del problema, pues permitirá su posterior estudio bien internamente o por medio de profesionales externos. Los recursos dedicados a la captura y tratamiento de datos

dependerán de las condiciones impuestas por el contrato. Los medios semi-mánuales (planillas, fichas...) se han venido sustituyendo por sistemas de Gestión del Mantenimiento Asistidos por Ordenador (GMAO) dotados incluso de terminales personales para comunicación en tiempo real de resultado de inspecciones o carga de datos de mantenimiento predictivo basado en la condición.

Un ejemplo puntero de optimización dinámica del plan de mantenimiento de una flota es el expuesto por Gormaz-González y González-Fernández para Metro Madrid (Gormaz y González, 2012). Los autores presentan su experiencia en la optimización automática de la planificación del mantenimiento del material rodante basada en la predicción de averías. En los modelos de ingeniería de fiabilidad la predicción de fallos futuros se basa en fallos históricos, que se modelan utilizando la función de distribución apropiada ajustada al caso con su correspondiente tasa de fallo, factores de forma, etc.... En este caso práctico, los fallos históricos se actualizan en tiempo real gracias a los recursos informáticos y técnicos disponibles, de manera que el ajuste de las distribuciones de tasas de fallo se lleva a cabo de manera continua.

4.2.3. Aplicación de modelos matemáticos para la optimización del mantenimiento de material rodante

En el Capítulo 3 se expusieron los diferentes modelos principales de optimización del mantenimiento como parte del marco teórico de esta tesis. Particularizando para el caso de una flota ferroviaria, antes de poder aplicar modelo alguno es necesario estudiar el conjunto del tren para entender la jerarquía de conjuntos y subconjuntos y establecer así los límites de aplicación de los modelos seleccionados.

La jerarquía de descomposición del tren puede variar, pero en el caso más general suele quedar dividido en tres niveles: coche, sistema y equipo. Los estudios de fiabilidad suelen llevarse a cabo a nivel de sistema (frenos, puertas, climatización, etc...), quedando englobados los estudios de cada equipo (válvulas, motores, mecanismos....) en el proyecto general del sistema. El estudio a nivel de coche es llevado a cabo por el fabricante a partir de los resultados de cada uno de los sistemas del coche.

Cada sistema constituye un conjunto complejo compuesto de múltiples equipos interrelacionados. Cada uno de estos equipos, habitualmente complejos a su vez, requiere una política de mantenimiento en función de su naturaleza. Así, dentro de un mismo sistema pueden convivir equipos que hayan sido diseñados bajo una política de reemplazo basada en calendario o de renovación basada en edad, otros sujetos a mantenimiento predictivo basado en la condición y otros

que no estarán sujetos a mantenimiento alguno. La segregación de los diferentes equipos y la selección de las políticas de mantenimiento se diseñarán en la fase de diseño utilizando las técnicas descritas en el marco teórico.

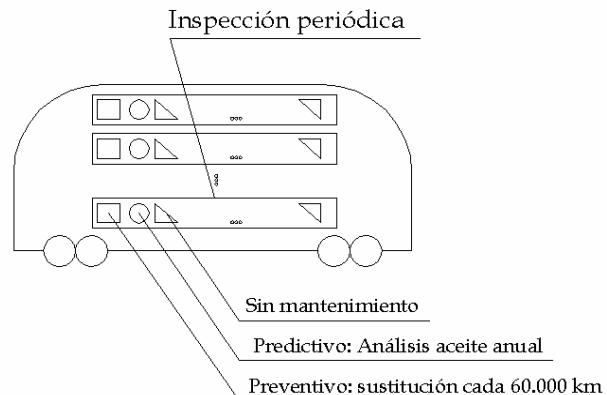


Figura 4.4. :Diferentes elementos dentro de cada subsistema pueden exigir políticas de mantenimiento de naturaleza diferente. Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, los planes de mantenimiento de todos los sistemas suelen incluir además un calendario de inspecciones de seguridad. Estas **inspecciones de seguridad son acciones periódicas sobre un conjunto complejo que pretenden aportar un nivel mayor de eficiencia a un entorno de mantenimiento en el que un fallo puede conllevar importantes penalizaciones económicas y de seguridad para las personas.**

El diseño de las políticas de reemplazo o renovación de cada equipo se basan en datos estadísticos obtenidos en la fase de diseño sobre los que llevan a cabo complicados cálculos. Por tanto, la optimización de los calendarios implica arrastrar tanto errores de cálculo como coeficientes de seguridad o variables estadísticas inexactas lo que recomienda implementar políticas de inspección generales sobre cada sistema. Estas inspecciones de seguridad juegan un papel relevante en la fase de explotación, puesto que aportan valiosa información para ajustar a su vez el resto de políticas de mantenimiento del sistema. Los datos obtenidos en las inspecciones de seguridad sobre la degradación del sistema permitirán ajustar las políticas de reemplazo y renovación de cada equipo

La optimización de estas políticas de inspección constituye el núcleo de la investigación expuesta en esta tesis. La investigación resulta de aplicación tanto en la fase de diseño como en la fase de operación. Durante la fase de diseño, el modelo desarrollado permite establecer un calendario óptimo de inspecciones de seguridad los ingenieros responsables del diseño. Durante la fase de explotación del material rodante, el ingeniero de mantenimiento podrá aplicar el

modelo desarrollado para entender las implicaciones de modificar los calendarios de inspección recomendados por el fabricante.

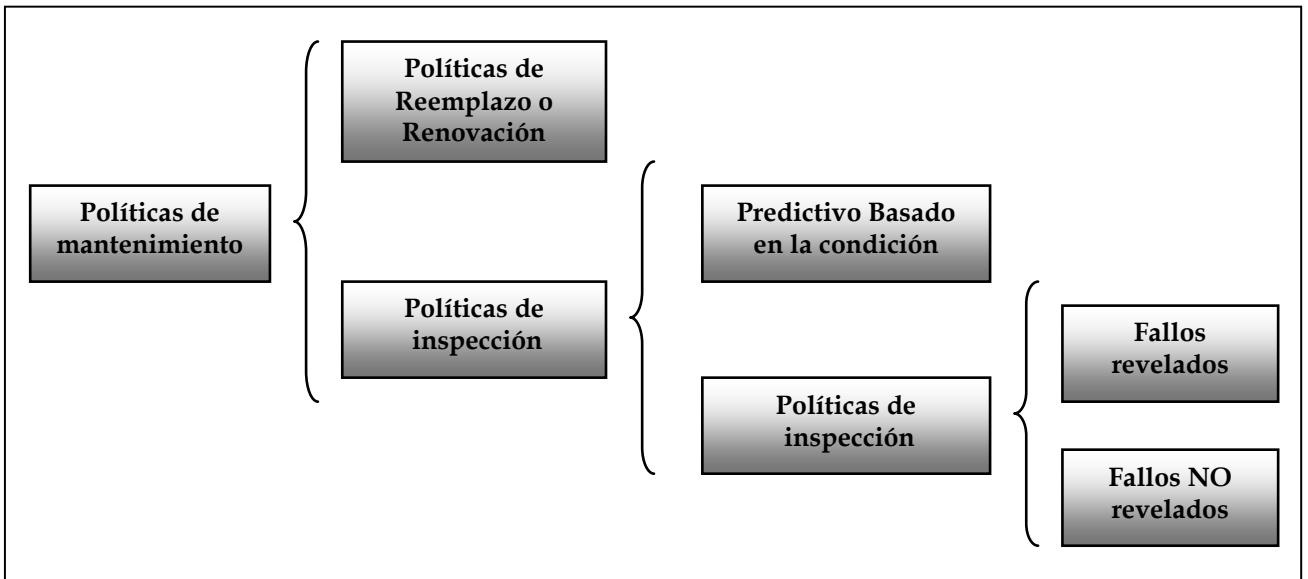


Figura 4.5. : Esquema simplificado de las diferentes políticas de mantenimiento. Fuente: Elaboración propia

Entre todos los modelos de optimización de mantenimiento expuestos en el Capítulo 3 como parte del marco teórico de esta tesis, la investigación se centra a partir de este punto en la selección y adaptación al caso ferroviario de políticas de inspección de sistemas con fallos revelados y costes de penalización.

Las políticas de inspección se dividen en función de la tipología de fallo en modelos de inspección con fallos revelados o con fallos no revelados. Los modelos de optimización de mantenimiento en sistemas con fallos no revelados afectan a sistemas en los que los fallos han de ser detectados mediante inspección, que se dan habitualmente en sistemas de protección. Estos sistemas, como las válvulas de seguridad en equipos a presión o los componentes de un sistema anti-incendios, no están en funcionamiento continuo, por lo que un defecto en los mismos no se detectará sino por medio de una inspección.

En el caso de las inspecciones de seguridad en el material rodante, el fallo en un sistema es un fallo revelado, pues no es necesario llevar a cabo una inspección para detectarlo sino que el mismo fallo evidencia su ocurrencia y puede implicar una penalización por servicio, confort, retraso o cancelación del tren.

En la siguiente sección se expone el modelo de optimización de costes de mantenimiento para sistemas complejos con fallos revelados denominado "Modelo de Tiempo de Retardo". Se parte de la exposición matemática del modelo para a continuación particularizar su aplicación al caso ferroviario objeto de esta investigación.

4.3. Aplicación al mantenimiento de flotas ferroviarias de un modelo de optimización de costes de mantenimiento con fallos revelados

4.3.1. Descripción general del Modelo de Tiempo de Retardo

El modelo básico de tiempo de retardo para un sistema complejo presentado por Christer y Waller [1984] se basa en el concepto del tiempo de retardo h de un defecto, que es el tiempo que transcurre desde que un defecto puede ser detectado por medio de una inspección hasta que el defecto se convierte en un fallo. El proceso queda por tanto dividido en dos etapas, lo que ha permitido el desarrollo de los diferentes modelos de tiempo de retardo de optimización de políticas de mantenimiento.

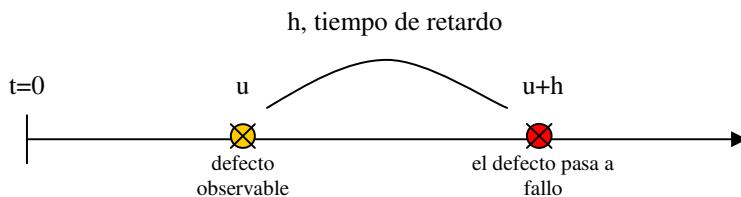


Figura 4.6. : Relación temporal entre defecto observable, fallo y tiempo de retardo. Fuente: Elaboración propia

La principal dificultad en esta familia de modelos radica en la determinación tanto de las distribuciones del tiempo inicial u y del tiempo de retardo h . Existen varios métodos para determinar dichas distribuciones, quedando clasificados en métodos subjetivos, objetivos o combinados. La aplicación de estos métodos a la casuística objeto de esta tesis se discute en secciones posteriores.

Dando por conocidas las distribuciones de ocurrencia observable de defectos y de tiempo de retardo, la política de inspección a modelar queda caracterizada según las siguientes hipótesis.

1. Se realizan inspecciones cada T unidades de tiempo con coste de C_i u.m. y duración t_i , siendo $T \gg t_i$
2. Las inspecciones son perfectas:
 - a. Si hay algún defecto, se detecta.
 - b. La inspección no aporta mayor degradación al sistema
3. Si se detecta un defecto en la inspección, se repara durante el tiempo t_i a coste C_{CM} y dentro del periodo de inspección. Se cuenta por tanto que hay suficientes recursos para abordar las reparaciones dentro del periodo de inspección.

4. La reparación es perfecta, por lo que el componente del sistema reparado queda en condición inicial (nuevo).
5. Los defectos ocurren siguiendo un Proceso Homogéneo de Poisson (PHP) con una tasa de ocurrencia de defectos λ constante. Se considera que el sistema está trabajando en un estacionario, es decir, que se ha superado el periodo de tasa de fallo decreciente por fallos infantiles y no se ha llegado cerca del fin de la vida útil, donde la tasa de fallos es creciente.
6. Cuando ocurre un fallo, se repara instantáneamente en un tiempo d_p con un coste C_p , que comprende el coste de reparación y un coste de penalización.
7. El tiempo de reparación cumple que $d_p \ll T$
8. El tiempo de retardo H de un defecto aleatorio es descrito por una función de densidad de probabilidad $f(h)$ y una función de distribución acumulada de $F(H)$ y es independiente del punto inicial de ocurrencia del defecto U .
9. $C_b > C_{CM}$
10. La función de densidad de probabilidad del tiempo de retardo, $f(h)$, es conocida.

Existen variaciones de este modelo originario que relajan las hipótesis de trabajo expuestas y que se presentaron en el Capítulo 3. Sin embargo, el modelo principal se ajusta a las necesidades del mantenimiento de flotas ferroviarias con la precisión y sencillez necesarias para el desarrollo del Método Gráfico. En el Capítulo 6 se indican las futuras líneas de investigación que conllevaría la aplicación de las variaciones de este modelo.

Bajo estas hipótesis se determina la función $b(T)$, que es la probabilidad de que un defecto finalmente se convierta en un fallo, penalizable en el caso de una explotación ferroviaria.

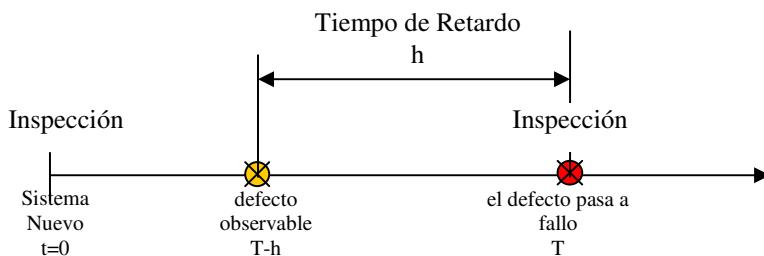


Figura 4.7. : Ciclo entre inspecciones con ocurrencia de defecto y tiempo de retardo en su límite superior. Fuente: Elaboración propia

Se define la función $b(T)$ como la probabilidad de que un defecto se convierta finalmente en fallo. Se supone que un defecto que se origine en el periodo $(0, T)$ tiene un tiempo de retardo en el intervalo $(h, h+dh)$ y así, la probabilidad de que

el tiempo de retardo esté en dicho intervalo es $f(h)dh$. Un defecto será reparado a coste de mantenimiento correctivo si sucede dentro del intervalo $(T-h, T)$, y como fallo penalizable si sucede en el intervalo $(0, T-h)$.

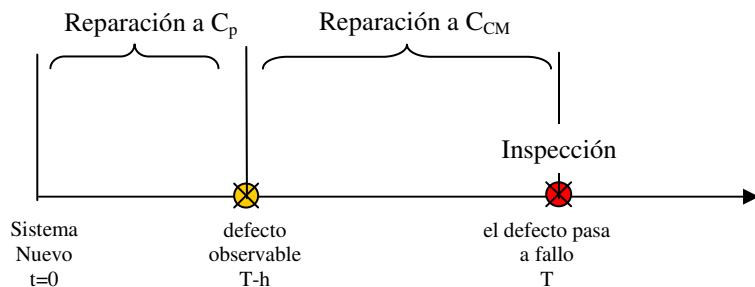


Figura 4.8. : Ciclo entre inspecciones indicando cuando un fallo implicaría penalización y cuando correctivo. Fuente: Elaboración propia

Dado que se considera que la tasa de ocurrencia de fallos es constante, la probabilidad de que un defecto suceda antes de $T-h$ siendo que existirá un fallo en $(0, T)$, es $(T-h)/T$. Por lo tanto, para un diferencial de tiempo de retardo dh , la probabilidad de que un defecto con un tiempo de retardo en el intervalo $(h, h+dh)$ resulte un fallo penalizable es:

$$b(t) = \frac{T-h}{T} \cdot f(h)dh \quad [4.1.]$$

El tiempo de retardo está dentro del periodo $(0, T)$ existe defecto en dicho periodo. Permitiendo al tiempo de retardo h variar entre 0 y T , se obtiene la probabilidad de que un defecto se convierta finalmente en fallo como:

$$b(T) = \int_0^T \frac{T-h}{T} \cdot f(h)dh \quad [4.2.]$$

Dado que se considera que el sistema se mantiene como nuevo hasta a la aparición de un defecto y que del mismo modo, al tratarse de una reparación perfecta, el sistema estará como nuevo hasta el fallo, cada inspección se convierte en un punto de renovación según la teoría clásica de renovación de Cox. Así pues, la ecuación anterior aplica a cada periodo de inspección.

El coste total por ciclo será el debido a los fallos penalizables, el que conllevan los defectos que se detectan a tiempo y corrigen y el de las inspecciones.

- El número esperado de defectos en un ciclo es

$$N(T) = \lambda \cdot T \quad [4.3.]$$

- El número de fallos en un ciclo se denomina B y son los defectos que no se han detectado durante el tiempo de retardo, llevando a un fallo final penalizable.

$$B(T) = K(T) \cdot b(T) = \lambda \cdot T \cdot b(T) \quad [4.4.]$$

Por tanto, el coste total de un ciclo por unidad de tiempo será la suma de todos los costes acaecidos en el ciclo dividido por el periodo del mismo:

$$C(T) = \frac{B(T) \cdot C_p + C_{CM} [N(T) - B(T)] + C_i}{T + d_i} \quad [4.5.]$$

El objetivo es pues el encontrar el número de inspecciones que optimizan el coste en un periodo T .

En el marco de esta tesis el objetivo es minimizar los costes de mantenimiento y por tanto esta es la ecuación básica de partida que se utiliza, en secciones posteriores, para desarrollar el método gráfico. Sin embargo, si lo que se busca mediante la política de inspecciones es maximizar la disponibilidad minimizando el tiempo fuera de servicio, la formulación para las hipótesis indicadas varía. El modelo inicial de Christer y Waller arroja la siguiente fórmula para el tiempo total fuera de servicio por ciclo:

$$D(T) = \frac{B(T) \cdot d_p + d_i}{T + d_i} \quad [4.5.]$$

El desarrollo de un método gráfico para la estimación del periodo que maximiza la disponibilidad es uno de las líneas de investigación que se indican en el Capítulo 6 de esta tesis como futuras líneas de trabajo.

4.3.2. Variaciones sobre el Modelo General.

A partir del Modelo General introducido en la sección anterior, existen variaciones del modelo que van relajando las hipótesis iniciales. Para el caso ferroviario objeto de esta tesis las variaciones del modelo revierten a priori más complejidad matemática que interés práctico. Sin embargo se listan en el Capítulo 6 como futuros campos para continuar la investigación iniciada reflejada en esta tesis.

Algunas de las variaciones del modelo son:

- Modelos con inspecciones en las que la duración de las mismas no es despreciable (Luss and Kander , 1974)
- Políticas de optimización de inspecciones en las que existe un coste de penalización debido al tiempo entre el fallo y su detección, proporcional a la duración del intervalo de inspección (Munford, 1990) considered optimal inspection policies in which penalty
- Modelos de inspección bi-estado, asumiendo coste de penalización debido al tiempo entre fallo y detección (Barlow and Proschan, 1965)
- Nakagawa (Nakagawa, 1984) comenzó a desarrollar los modelos con inspecciones no perfecta. Nakagawa consideró una política de inspección modificada donde la unidad inspeccionada tenía el mismo estado que antes de la inspección con una probabilidad p y volvía al estado ideal de renovación con una probabilidad q .
- Las investigaciones más recientes (Wang 2015) apuntan a modelos para dos tipos de acciones de mantenimiento correctivo diferidas en el tiempo.

El número de variaciones sobre el modelo original es significativo, constituyendo la lista anterior una breve reseña sobre el desarrollo que esta disciplina ha disfrutado durante las últimas décadas. Para mayor profundidad sobre las diferentes variaciones se puede consultar la tesis de Dr. Wenbin Wang (Wang 2008) en la que lleva a cabo una discusión detallada de las corrientes más destacadas dentro del campo de los Modelos de Tiempo de Retardo.

4.3.3. Estimación de los parámetros del modelo

Los métodos para estimar tanto las distribuciones que mejor aproximan la realidad como los parámetros que las definen se clasifican en Métodos Objetivos y Métodos Subjetivos.

Cuando existen datos históricos suficientes sobre la frecuencia de las inspecciones, reparaciones y penalizaciones, se pueden utilizar métodos estadísticos para caracterizar los parámetros del modelo, a saber, la tasa de

ocurrencia de fallos y la tasa de tiempo de retardo cuando como en este estudio, se utilizan distribuciones exponenciales para ajustar ambos parámetros. El método utilizado habitualmente es el de máximos verosímiles. Estos métodos se denominan Métodos Objetivos. Diferentes ejemplos de resolución de casos prácticos han sido descritos por varios autores (Kwang-Mook, 1997), (Baker y Wang ,1991), (Baker , 1997), (Tang ,2014).

Sin embargo, el caso más habitual en una explotación ferroviaria es que no existan suficientes datos históricos, bien porque el momento de cálculo es anterior a la puesta en marcha o porque simplemente la operación no cuenta con los recursos humanos e informáticos para la recogida de datos. En el caso más habitual se contará probablemente, con la tasa de ocurrencia de fallos de cada sistema, pues es un dato que habitualmente proporciona el fabricante externo, o es la propia compañía fabricante y mantenedora del material rodante la que lo calculó o estimó en base a la experiencia durante la fase de diseño. Dado que las distribuciones que se van a utilizar para modelar tanto la ocurrencia de fallos como el tiempo de retardo son exponenciales, la dificultad estriba pues en la estimación del parámetro restante, la *tasa de tiempo de retardo*.

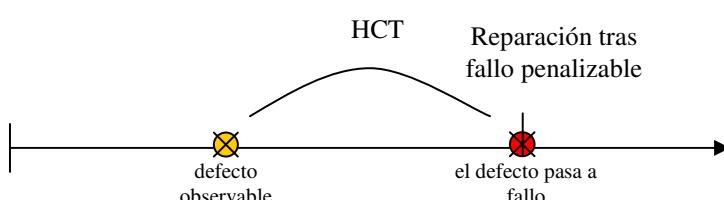
Para estimar la *tasa de tiempo de retardo* cuando no hay datos históricos se recurre a los denominados Métodos Subjetivos, en los que se utiliza el criterio de los ingenieros y técnicos de mantenimiento con experiencia para ajustar el tiempo de retardo.

4.3.3.1 Métodos subjetivos

A continuación se introducen tres métodos subjetivos en orden creciente de complejidad (Christer and Waller, 1984), (Wang, 1987) y (Wang y Jia, 2006) para estimar la distribución del tiempo de retardo y sus parámetros. En la aplicación ferroviaria al caso se utilizarán siempre distribuciones exponenciales, por lo que los métodos se simplifican.

a) Método de estimación subjetiva mediante investigación in-situ

Este método consiste en utilizar cuestionarios durante un periodo de tiempo en el que se recoja información en cada intervención de mantenimiento correctivo o fallo. En cada reparación, el técnico, a la vista del defecto, debe de estimar dos valores:



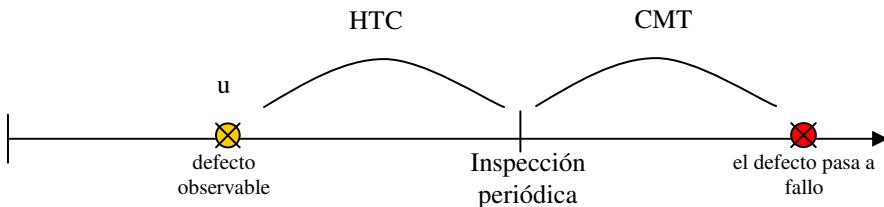


Figura 4.9. : Representación de los valores HCT (Hace Cuanto Tiempo) y CMT(Cuánto Más Tiempo). Fuente: Elaboración propia

- HCT: Hace Cuanto Tiempo que el defecto que está reparando podría haberse detectado en caso de que se hubiese inspeccionado
- CMT: Cuanto Más Tiempo cree que pasaría hasta que ese defecto que está reparando acabara convirtiéndose en un fallo penalizable.

A partir de los datos de HTC y CMT recogidos en los cuestionarios se puede utilizar un modelo de regresión para ajustar el parámetro de tiempo de tasa de retardo. En caso de no existir información sobre la tasa de ocurrencia de fallos, estos mismo cuestionarios aportan la suficiente información para ajustar también dicho parámetro y compararlo con la tasa suministrada por el fabricante.

El hecho de que sea un técnico formado y experimentado el que rellene el cuestionario al realizar la acción de mantenimiento presupone cierta verosimilitud al método, pues en el momento de contestar el técnico examina in-situ el sistema y puede emitir un diagnóstico tan exacto como permita su experiencia y criterio.

Este método resulta de gran practicidad y junto con el Método Gráfico General desarrollado constituye probablemente la herramienta apropiada para la optimización de las políticas de inspección en explotaciones de mantenimiento de flotas ferroviarias.

b) Método de estimación subjetiva del tiempo de retardo basado en modos de fallo pre-identificados.

El método anterior exige gran criterio y experiencia al técnico, lo que ha demostrado en ciertos casos tendencia a errores que habitualmente resultan en tiempos de retardo más cortos que la realidad (Christer and Waller, 1984), (Christer et al., 1998). Esta tendencia es natural, pues el técnico de mantenimiento, involuntariamente acorta la estimación de tiempo hasta el fallo, pues no es parte de su naturaleza el permitir que los equipos alarguen su fase con defecto hasta llegar al fallo. Wang (Wang, 1997) recomendó un nuevo

método para estimar tanto la distribución como los parámetros basado en varios modos principales de fallo. Se trata de guiar al técnico, preparando unos cuestionarios en que reduzcan la subjetividad a aplicar por el técnico, facilitando al mismo tiempo su cumplimentación.

En rasgos generales, el procedimiento sigue siete pasos:

1. Identificación del los modos de fallos y sus causas
2. Selección de personal experto en el sistema a estudiar
3. Formulación de preguntas de tipo "HCT", "CTM"
4. Representación de las respuestas en histogramas
5. Recogida de datos y calibración de los resultados
6. Combinación de los datos aportados por los expertos seleccionados
7. Recogida de datos en campo y actualización de cuestionarios.

Esta segunda metodología presentada también podría ser de utilidad en el caso ferroviario estudiado; sin embargo, requiere mayor preparación y recursos, lo que deberá de valorarse contra un proceso objetivo de ajuste en base a recogida de datos. Un ejemplo de aplicación de este método fue publicado por Akbarov (Akbarov et al., 2006). El artículo concluye indicando la complejidad de estimar el tiempo de retardo por tratarse de una variable compleja de explicar y no observable fácilmente

c) Método empírico bayesiano

La metodología más reciente en este campo parte de datos subjetivos para a continuación actualizar las estimaciones cuando existen datos registrados objetivamente. Las estimaciones iniciales se generan aplicando el método empírico bayesiano en base a un mínimo de parámetros aportados por personal experto en el sistema. A medida que se van recogiendo datos objetivos, la estimación inicial se irá corrigiendo aplicando el método de la máxima verosimilitud. Se trata por tanto de un proceso iterativo, en el que se utilizan unos datos iniciales que posteriormente se irán modificando y mejorando en base a la experiencia.

La complejidad matemática de este método implica una aplicabilidad baja en el caso ferroviario, por lo que no se considera de interés para esta investigación el abundar en esta metodología, descrita en detalle por Wang (Wang y Jia, 2006).

4.3.3.2 Método objetivo

El método objetivo utilizado con mayor profusión para la determinación de la distribución que mejor se ajusta a los datos históricos y a sus parámetros es el método de máximo verosímil. Este método consiste en encontrar el valor de los parámetros que maximicen la función de máxima verosimilitud, definida como:

$$L(\theta) = f(x_1, \theta) \cdot f(x_2, \theta) \cdot f(x_3, \theta) \cdots f(x_n, \theta)$$

Donde $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ son los valores registrados de la variable X y θ es el parámetro a estimar. La función de máxima verosimilitud es solo dependiente del parámetro a estimar. El proceso es el habitual en la optimización de funciones, consistente en derivar la función de máxima verosimilitud e igualar a cero para obtener los parámetros a estimar.

Para decidir la función que mejor se ajusta a los datos recogidos y estimar los parámetros que definen dicha función es necesario contar con los fallos y sus tiempos de ocurrencia y con el número de defectos hallados (y reparados) en cada inspección.

Christer (Christer, 1995) desarrolló la función de máxima verosimilitud para un sistema complejo, aplicándolo a un ejemplo práctico de una planta de tratamiento de cobre inglesa. La función de máxima verosimilitud propuesta consiste en el productorio de la probabilidad de observar m fallos en un periodo y la probabilidad de detectar y eliminar j defectos en un periodo, tomándose ambas como probabilidades de distribución de Poisson:

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^K \left\{ \left(\frac{e^{-E[N_f((i-1)T, iT)]} \cdot E[N_f((i-1)T, iT)]^{m_i}}{m_i!} \right) \cdot \left(\frac{e^{-E[N_s(iT)]} \cdot E[N_s(iT)]^{j_i}}{j_i!} \right) \right\} \quad [4.6.]$$

Donde θ es el conjunto de parámetros del Modelo de Tiempo de Retardo a estimar. Para la resolución de esta ecuación se toman logaritmos naturales y se procede a derivar, igualando a cero dicha derivada para obtener los valores de θ que maximizan la función.

En caso de que solo los tiempos de los fallos estén disponibles, Christer (Christer et al., 1998) proponen una formulación más refinada en la que se considera el patrón detallado de comportamiento en cada intervalo en términos del número de fallos y sus correspondientes tiempos de fallo.

Como puede observarse, la formulación analítica de la función de máxima verosimilitud tanto para el caso de sistema simple como para un sistema complejo exige importantes recursos, tanto humanos (técnicos especialistas con elevado dominio matemático) como materiales (potencia de computación y programación específica). Estas dificultades restan practicidad al modelo, lo que ha dificultado su popularización, como en el caso de otros modelos matemáticos de optimización del mantenimiento.

En la bibliografía existente en lo referente al ajuste de los parámetros del modelo se observa que el foco se desplaza del campo de la optimización del mantenimiento hacia el campo de la aplicación de métodos estadísticos de regresión, lo que no aporta valor al núcleo de esta investigación. El ajuste de los parámetros se trata de una suerte de problema embebido en el principal, para el que hay que utilizar un conjunto de métodos matemáticos independiente del necesario para el problema principal.

Afortunadamente, de cara a la aplicación al caso práctico del mantenimiento ferroviario de flotas el problema se simplifica por los dos motivos ya expuestos:

- a) No se considera necesario en una primera aproximación el seleccionar el tipo de distribución que mejor se ajusta a la realidad, pues en el sector ferroviarios se toman generalmente distribuciones exponenciales para modelar tanto la tasa de fallo y por ende el tiempo de retardo.
- b) La tasa de fallo de un sistema complejo que forma parte de un tren suele ser un valor conocido. O bien el proveedor del sistema (de puertas, de frenos, de asientos....) debe de aportar la tasa de fallos como parte de su alcance de suministro, o bien es el mantenedor el que conoce la tasa de fallo en base a su experiencia.

Tan solo resta estimar el parámetro del tiempo de retardo, para lo cual, de cara a la investigación plasmada en esta tesis, se optó por utilizar un método mixto de estimación: estimación subjetiva y análisis de sensibilidad gráfico.

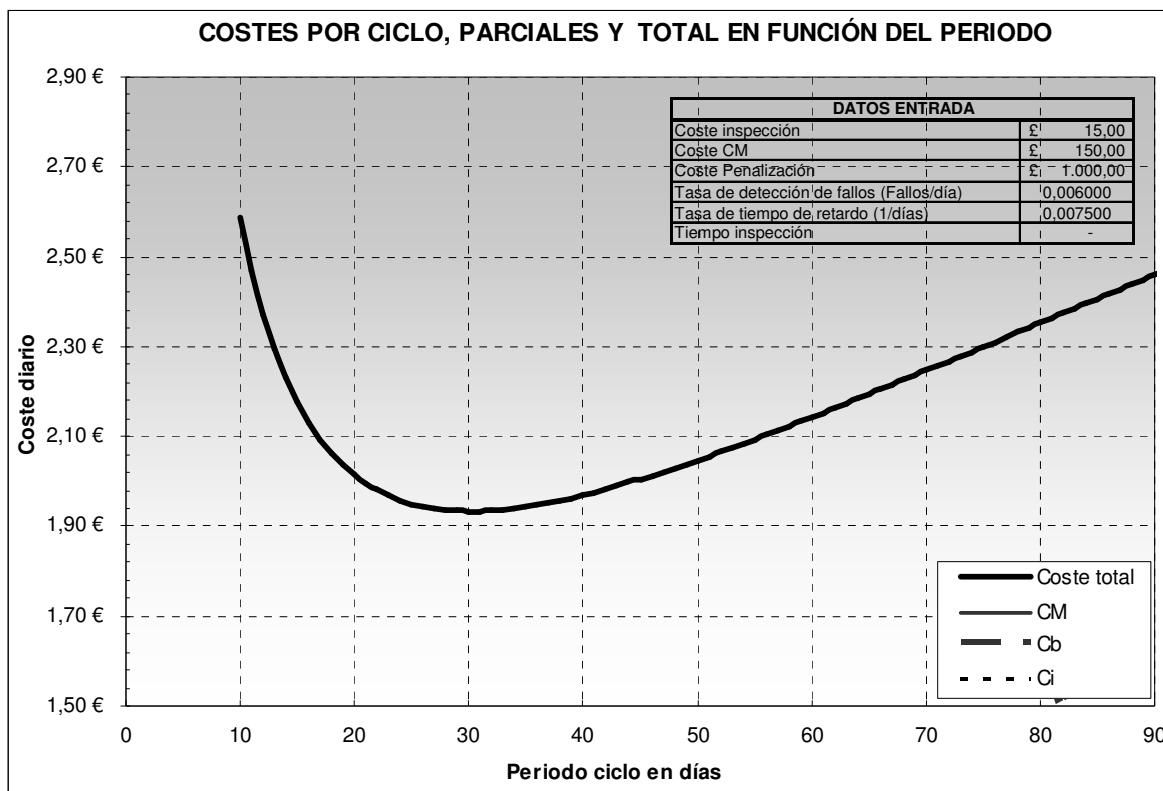
En el Capítulo 5 se resuelve un ejemplo para el caso de las puertas exteriores en el se utiliza el Método Gráfico presentado en este capítulo para llevar a cabo un análisis de sensibilidad objetivo a partir del valor del tiempo de retardo aportado, de manera subjetiva, por el ingeniero de mantenimiento responsable de cierta explotación.

4.3.4. Transformación del modelo a base anual y cálculo LCC

Una vez obtenido, mediante la aplicación del Método de Tiempo de Retardo expuesto en las secciones precedentes, el periodo que minimiza el coste por unidad de tiempo, resulta necesario calcular el coste óptimo anual. Una vez estimado el tiempo anual óptimo se podrá estimar la proyección de costes durante la vida útil del contrato de mantenimiento, para a continuación descontar dicha serie anual a un valor actual neto y obtener así el Coste de Ciclo de Vida (LCC) o Coste LCC.

4.3.4.1. Cálculo del coste en base anual

Las unidades del periodo óptimo obtenido variarán según las unidades utilizadas en el cálculo para la tasa de ocurrencia de fallos y la tasa de tiempo de retardo. Así, si la tasa se ha introducido en fallos por día, el periodo se obtendrá en días, si se ha introducido en fallos por horas, se obtendrá un periodo óptimo en horas, etc...



En el caso del mantenimiento de flotas ferroviarias es habitual que la tasa de ocurrencia de fallos venga expresada en horas o más frecuentemente en millones de horas. Los resultados del Modelo de Tiempo de Retardo se obtendrán pues en unidades monetarias por hora y obviamente, para una unidad (una puerta exterior, un compresor....) del sistema bajo estudio que estará comprendido por decenas o centenas de unidades según el número de coches de la explotación. Resulta habitual estudiar los costes globales de la explotación en base anual y englobando todas las unidades existentes en la flota del sistema bajo estudio. Esto es debido a que los resultados han de ser compatibles con los ciclos fiscales y presupuestarios, siempre calculados en base anual o como fracción de la misma (semestres, trimestres...).

Para pasar de coste por hora a coste anual resulta necesario conocer el número de horas de operación del tren por año. Dado que es habitual en el sector medir el funcionamiento anual en kilómetros en vez de en horas, será necesario conocer la velocidad media para poder obtener el valor de horas anuales de operación del tren.

$$nº\ horas\ operación\ anuales\ [h] = \frac{\text{kilometros anuales}\ [km]}{\text{velocidad media}\ [km/h]} \quad [4.7.]$$

Para calcular el coste anual bastaría con multiplicar el coste por hora obtenido para el periodo óptimo por el número de horas de operación al año.

$$\text{Coste anual unitario} = nº\ horas\ operación\ anuales\ [h] \times \text{Coste por ciclo}\ [u.m./h] \quad [4.8.]$$

Una vez conocido el coste unitario (una puerta exterior, un compresor....) se procede a calcular el coste anual de todos los sistemas existentes en la flota. Para hallar este valor se multiplica el coste anual unitario por el número de unidades existentes en cada coche para sacar el coste por coche. Para obtener el coste de la flota bastará multiplicar por el número de coches existentes en la flota:

$$\begin{aligned} \text{Coste anual total} &= \text{Coste anual unitario} \times nº\ unidades\ por\ coche \times \\ &\quad \times nº\ de\ coches\ por\ tren \times nº\ trenes\ en\ flota \end{aligned} \quad [4.9.]$$

Este coste anual de la flota no incluye, como ya se ha expuesto en capítulos anteriores, los costes plurianuales de carácter especial, como las modificaciones, levantes o renovaciones. Estos costes presentan una naturaleza diferente, ajena a los procesos de optimización objeto de esta tesis. Se trata más bien de inversiones programadas, que podrán añadirse a los términos aquí calculados según sea el objeto de cada caso particular. Estas modificaciones, levantes o renovaciones suelen ser tratadas por personal ajeno a mantenimiento, y requieren la intervención de los departamentos de ingeniería que diseñaron el tren dado que se modifica la colección de planos (diseño) original.

4.3.4.2. Cálculo del Coste de Ciclo de Vida (LCC)

Tal y como se introdujo en el Capítulo 3, una vez estimados los costes de mantenimiento anuales será necesario estimar los costes del ciclo de vida LCC. En el ámbito ferroviario es habitual referirse con esta denominación a los costes sujetos a la incertidumbre de la fiabilidad y de la eficiencia en el mantenimiento, descartando todo el resto de parámetros que formalmente incluye un cálculo de costes de ciclo de vida: los costes de operación, de combustible, medioambientales, de reformas, vandalismo, de eliminación y de adquisición quedan fuera de este análisis por los motivos expuestos en el Capítulo 3.

Queda por tanto proyectar la variación de los costes de mantenimiento a lo largo de los años de duración del contrato t , para luego descontarlos con una tasa k y hallar así el valor actual neto:

$$LLC = \sum_{t=1}^n \frac{(Coste\ anual)_t}{(1+k)^t} \quad [4.10.]$$

La proyección de la variación de costes y la elección de la tasa de descuento son dos cuestiones habitualmente ajena al ingeniero de mantenimiento y más propias del responsable de riesgo de la compañía o responsable financiero en su defecto. La estimación de estas dos variables implica análisis econométricos y de riesgo país (en caso de explotaciones en países distintos al de la compañía matriz) fuera del alcance principal de esta investigación y con entidad e interés suficiente como para constituir una línea de investigación en si mismas. Aunque en el Capítulo 6 se indican como futuras líneas de trabajo, en los siguientes párrafos se aportan unas pinceladas básicas para entender la volatilidad de estas dos variables.

Estimación de la tasa de descuento

La selección de la tasa de descuento de los futuros flujos de costes de mantenimiento depende en gran medida del uso que se le vaya a dar. Así, probablemente variará si se trata de un estudio en fase licitación, en el que probablemente la tasa venga impuesta por la Administración, o si se trata de un estudio interno comparativo de las explotaciones internacionales de una matriz. En el primer caso no resulta necesario cálculo alguno, pues es la Administración u Operador el que indica la tasa de descuento a utilizar por todos los licitadores para así homogeneizar criterios de comparación en la adjudicación.

En el segundo caso, para estudios internos, en general, se pueden utilizar varias aproximaciones:

- Por una parte, se puede utilizar el Costo del Capital Medio Ponderado (CCMP) de la empresa mantenedora para descontar los costes anuales en el cálculo de los costes de vida útil. Esta tasa de descuento, denominada más habitualmente en los mercados por sus siglas en inglés "WACC" - Weighted Average Cost of Capital - es un parámetro interno de cada compañía, en este caso del mantenedor. El índice refleja el coste del capital de la empresa como una media ponderada entre la proporción de recursos propios y la proporción de recursos ajenos, es decir, mide el coste de los recursos financieros de la empresa. Analíticamente la expresión para calcular el CCMP es:

$$CCMP = K_e \cdot \frac{CAA}{CAA + D} + K_d \cdot (1 - T) \cdot \frac{D}{CAA + D} \quad [4.11.]$$

En el que:

- CAA: es la deuda contraída por los accionistas
- D: es la deuda financiera
- Ke: tasa de costo de oportunidad de los accionistas
- Kd: costo de la deuda financiera
- T: tasa de impuesto de las ganancias.

El descontar utilizando el valor del CCMP es un método válido tanto en cuanto clarificará el valor que el contrato aporta a la empresa. En el caso de valoración de una inversión se trata de la rentabilidad mínima que debería obtener una empresa de una inversión, puesto que todo proyecto debe superar el coste de los recursos necesarios para financiarlo. El rango habitual de esta tasa de descuento oscila entre el cinco y el quince por ciento.

- Alternativamente al CCMP se pueden aplicar otras tasas siempre que , aplicando el principio de prudencia financiera, sean mayores que la primera. De un modo más simplificado, se puede utilizar como tasas mínimas alternativas:
 - El coste de oportunidad del dinero en un proyecto alternativo
 - El coste de los recursos financieros externos que necesitará el proyecto.
 - La rentabilidad que, por las razones que sean, exige el accionista a esta explotación.

- Por último, cabe la posibilidad de que la tasa de descuento no sea constante durante la vida del contrato. En este caso, será necesario considerar dicha variación a la hora de descontar el flujo de costes de mantenimiento y por tanto alternativamente al CCMP se pueden aplicar otras tasas siempre que , aplicando el principio de prudencia financiera, sean mayores que la primera. De un modo más simplificado, se puede utilizar como tasas mínimas alternativas

Estimación de la variación anual de los costes.

La variación anual de los costes de una explotación implica frecuentemente un incremento en base a la variación de los diferentes factores que impactan en el coste total. Así pues, de un modo simplificado, podría tenerse en cuenta tan solo la proyección de la inflación en el área geográfica de la explotación. Sin embargo, para un cálculo detallado procede desglosar esta estimación inicial en la variación de cada uno de los costes, particularizando cada partida en función de las características de la explotación.

- Los costes directos en mano de obra son una partida común a todas las explotaciones y su incremento vendrá dado por la variación interanual de los salarios negociados por convenio.
- Los costes directos en materiales son fundamentalmente repuestos y materiales fungibles (aceites, material de limpieza....) y variarán en función de la naturaleza de la explotación. El coste de mantener el inventario de repuestos necesarios en la explotación es un coste que varía de forma importante. En las explotaciones tradicionales, en las que gran parte de los repuestos provenían del mismo país en el que se operaban los trenes, coincidente con el país de la empresa matriz mantenedora y habitualmente fabricante, el coste del inventario no estaba sujeto a variaciones no ligadas a la inflación nacional.

Sin embargo, el caso más habitual en la actualidad es el de una explotación en un país diferente al de la matriz de la empresa mantenedora, que puede coincidir o no con el país de fabricación. Así, puede tratarse de una operación de mantenimiento de una empresa europea en Latinoamérica, cuyos trenes hayan sido fabricados parcialmente en el país de destino por una empresa de matriz europea o directamente en Europa. En estos casos, además de los fenómenos inflacionarios del país de explotación, será necesario contar al menos con las siguientes variables:

- Los fenómenos inflacionarios de los países de origen de los repuestos,
- La variación de los tipos de cambio de las monedas de los países de origen de los repuestos frente a la moneda del país de explotación.
- La política de los precios de transferencia de la empresa matriz, que cargará costes cruzados a la explotación por repuestos y mano de obra en función de variables internas de la compañía. Estas variables internas no forzosamente coincidirán con la evolución de los mercados emisor y receptor de los repuestos y pueden constituir una variable muy relevante, al llegar a ser una fuente de extracción de beneficios de la explotación local por parte de la compañía matriz o bien a la inversa, una fuente de crédito de la compañía matriz a la explotación local.
- Finalmente, la partida de costes indirectos de la explotación es probablemente la menos homogénea. Dentro de esta partida están englobados costes como:
 - Coste de arrendamiento de las instalaciones y oficinas de mantenimiento
 - Costes de energía de las instalaciones
 - Coste de servicios externos: asesoría fiscal, laboral, contable, consultoría técnicas, legal, etc...
 - Coste de los mandos indirectos
 - Costes cruzados, de imputación de gastos de otros departamentos: asistencia técnica de la casa matriz, costes de representación, etc....

Para poder estimar convenientemente el cálculo LCC lo habitual a la hora de generar un presupuesto de proyecto es estimar estos gastos como un porcentual del total de los gastos directos en materiales y mano de obra. El porcentual variará obviamente según la explotación, pero a efectos prácticos se considera que representan entre el 5 y el 15% del total de los gastos directos.

Representando el Coste de Ciclo de Vida (LCC) frente al periodo óptimo de inspección se observa que la curva presenta idéntica forma a la representación del coste por unidad de tiempo frente al periodo óptimo. Sin embargo, la variación será obviamente importante en el eje de ordenadas, en el que los valores de coste pasarán de unos pocos euros a miles o decenas de miles de euros. Estas gráficas ayudan al responsable de mantenimiento a entender la verdadera magnitud que tiene la selección del periodo óptimo de inspección.

A continuación se reproducen una gráficas ilustrativas del citado fenómeno. Las gráficas consisten en una sucesión de cambio de escala de costes en las que se observa que la forma y mínimo de la curva no varían, siendo solo la magnitud representada frente al periodo la que sufre variación.

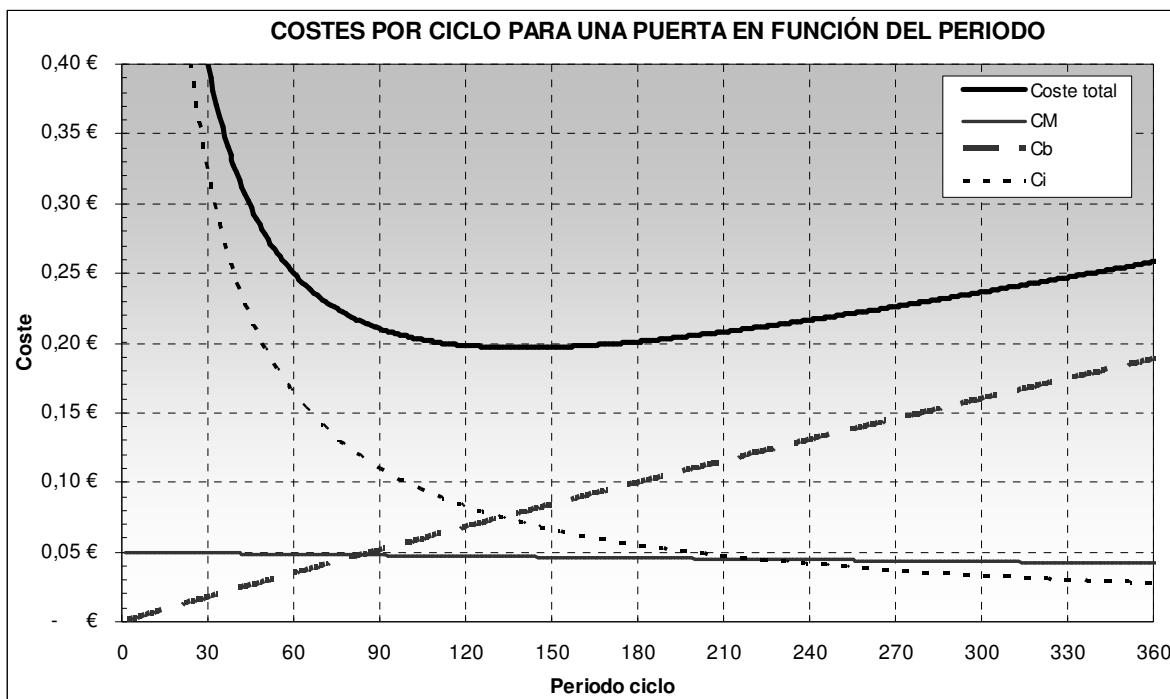


Figura 4.10. : Costes por ciclo en función del periodo para una puerta de un coche, en base DIARIA, euros/día en este ejemplo

Fuente: Elaboración propia

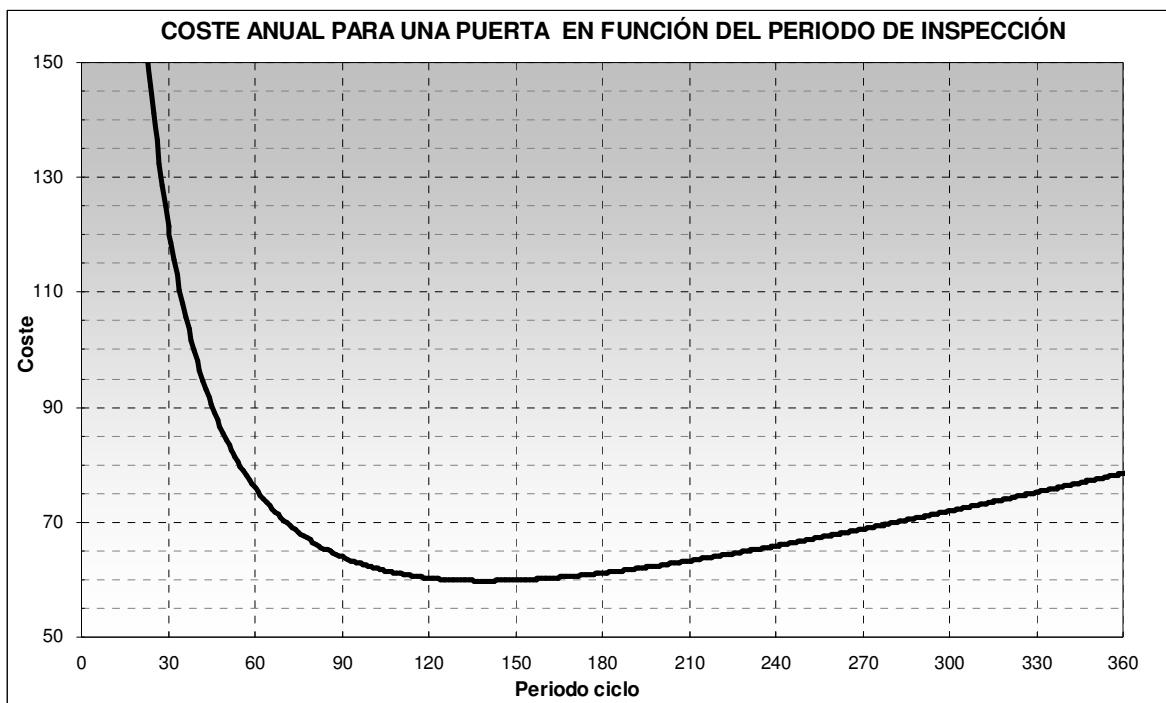


Figura 4.11. : Costes por ciclo en función del periodo para una puerta de un coche, en base ANUAL, euros/año en este ejemplo

Fuente: Elaboración propia

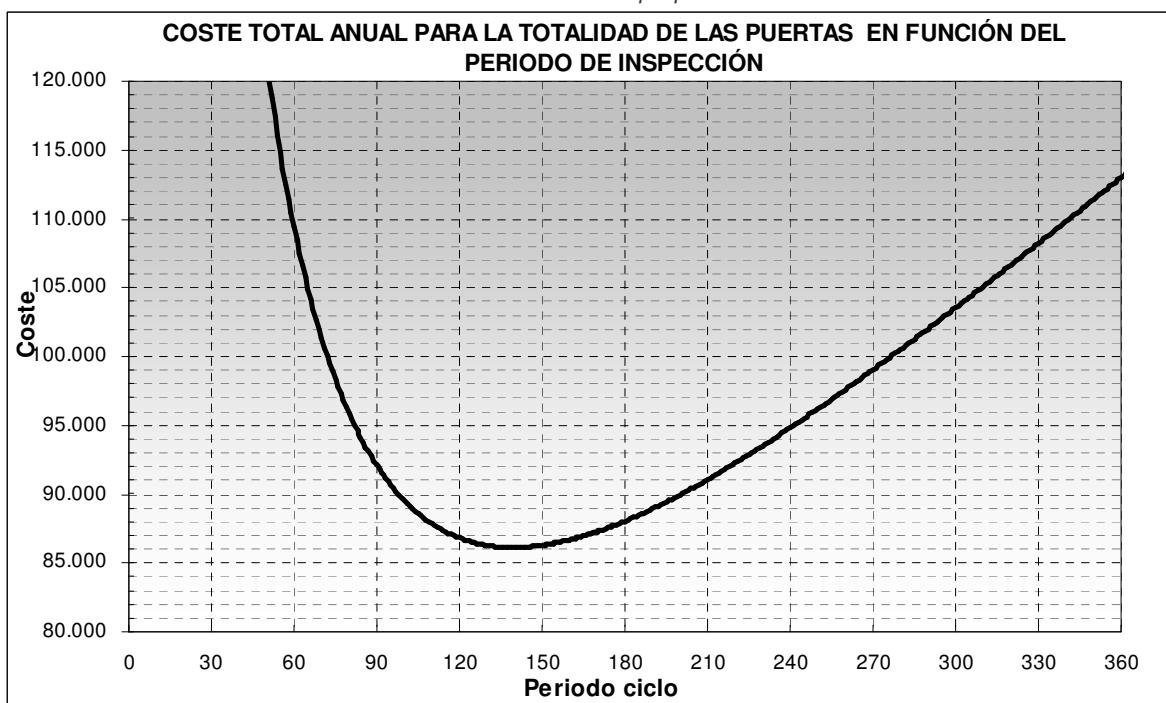


Figura 4.12. : Costes por ciclo en función del periodo para todas las 1440 puertas de una flota, en base ANUAL, euros/año en este ejemplo

Fuente: Elaboración propia

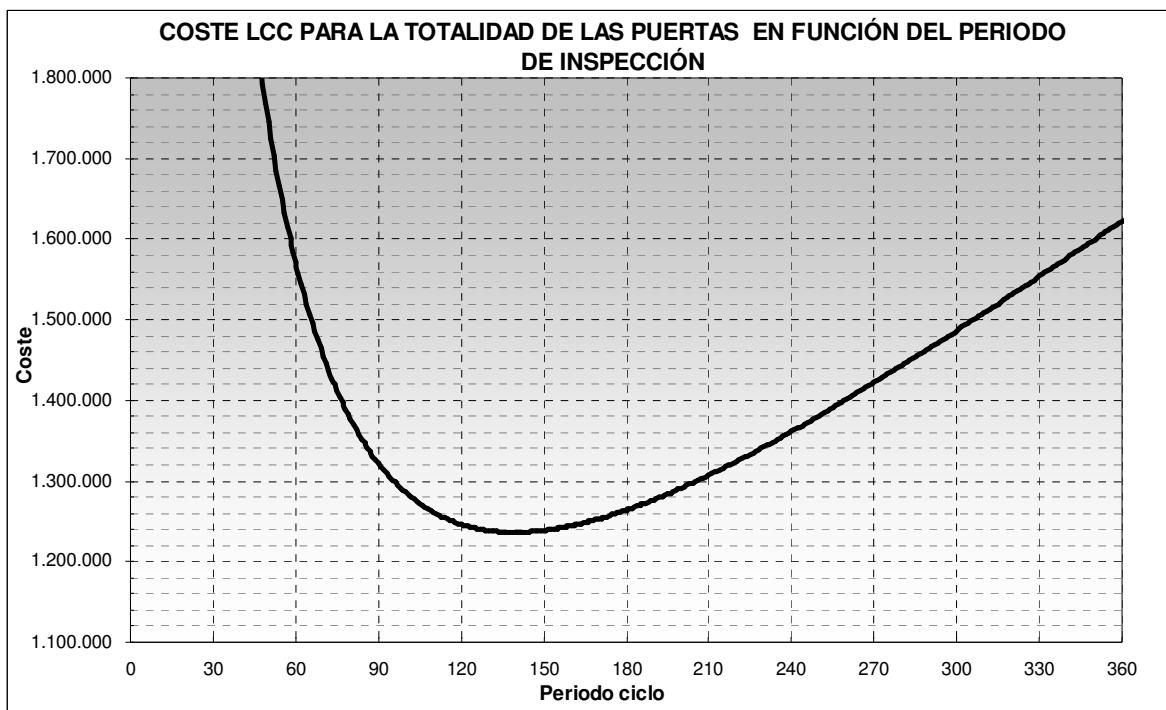


Figura 4.13. : Costes por ciclo en función del periodo para todas las puertas de una flota, en base LCC de 30 años, euros/vida útil
en este ejemplo Fuente: Elaboración propia

4.4. Desarrollo de un método gráfico para la aplicación del modelo

4.4.1. Motivación

Las motivaciones para desarrollar un método gráfico para la aplicación del Modelo de Tiempo de Retardo (Delay Time Model, DTM) al mantenimiento ferroviario son múltiples, pudiendo clasificarse en tres grupos según su principio:

1. Idoneidad de la formulación

El Modelo de Tiempo de Retardo en su formulación generalizada ofrece al ingeniero de mantenimiento ferroviario la posibilidad de evaluar la eficiencia de los programas de inspecciones del plan de mantenimiento de su explotación de un modo sencillo y eficaz, obteniendo resultados suficientemente precisos sin tener que recurrir a modelos más detallados.

Tal y como se ha expuesto en capítulos anteriores, los modelos de optimización de costes de mantenimiento en base a inspecciones y fallos revelados son los más apropiados para la optimización de las inspecciones de seguridad ferroviarias.

2. Ventajas de un método gráfico

Los nomogramas o ábacos desarrollados permiten el cálculo gráfico y aproximado del periodo de inspección óptimo que conlleva un coste de ciclo mínimo. El nomograma presenta simultáneamente el conjunto de ecuaciones que definen el problema, y lo que resulta en este caso igualmente relevante, el rango total de sus soluciones, aportando las siguientes ventajas:

Rapidez

Los nomogramas constituyeron, hasta la popularización de las computadoras a finales del siglo XX, potentes herramientas de cálculo pues permitían realizar rápidamente cálculos exactos sin que el usuario tuviera ni siquiera necesidad de entender la formulación implícita en el gráfico. Incluso en la actualidad se continúan utilizando nomogramas y ábacos en problemas de ingeniería civil, eléctrica, química, electrónica, etc...

El nomograma desarrollado permite resolver con gran rapidez el problema de optimización de coste de mantenimiento en un programa de inspecciones con fallos revelados.

Sencillez de manejo

Los responsables de mantenimiento de una explotación ferroviaria se esfuerzan aplicando métodos objetivos y subjetivos en mejorar su operación, minimizando los costes de mantenimiento. En general, la operativa diaria no suele permitir a estos técnicos el estudio profundo de los modelos matemáticos de optimización de coste de mantenimiento apropiados para cada equipo, recurriendo al criterio basado en la experiencia para ajustar los planes de mantenimiento. Una herramienta gráfica como la desarrollada permite resolver en campo o taller la formulación sin recurrir a complejos cálculos o necesidad de comprensión profunda del modelo, constituyendo una herramienta de apreciable valor a hora de evaluar las mejoras propuestas en los ciclos de inspección.

Análisis de sensibilidad inmediato

Los nomogramas desarrollados permiten analizar de modo inmediato y muy visual el impacto en el resultado final de la variación de cualquiera de las variables principales del problema. La interpolación visual y el hecho de que todo el rango de aplicación esté representado permite entender al técnico el impacto de cada acción (variación del ciclo, variación de los costes...) en el coste anual.

El nomograma resulta de gran utilidad en la resolución de escenarios en los que no se conoce con exactitud alguna de las variables. Se trata de un planteamiento similar al análisis de sensibilidad. En estos casos, dado que el nomograma presenta simultáneamente el conjunto de ecuaciones que definen el problema y el rango total de sus soluciones, incluso contando con una variable de entrada poco precisa, se puede hallar fácilmente la zona aproximada donde se encontrará la solución, pudiendo entender de un modo muy visual el impacto de la variable poco precisa en el resultado final

3. Novedad

Una clasificación habitual de las decisiones de optimización de mantenimiento es la división de los modelos en dos tipologías básicas:

- a) Modelos de reemplazo preventivo de componentes, en los que se optimiza el tiempo de reemplazo que resuelve un coste óptimo de ciclo

frente al reemplazo a la rotura, que es el escenario si no hay política de reemplazo preventivo.

- b) Modelos de inspección, en los que se pretende optimizar el coste óptimo de ciclo frente al reemplazo y penalización a la rotura, mediante inspecciones periódicas.

El primer grupo de modelos, los modelos de reemplazo preventivo, cuenta con un método gráfico de resolución; desde la década de los setenta, los gráficos de Glasser (ver Capítulo 3, apartado 3.2.3) se han venido utilizando profusamente por los ingenieros de mantenimiento para la resolución del modelo general de reemplazo preventivo de componentes.

Los gráficos de Glasser permitían resolver gráficamente los dos planteamientos generales:

- Reemplazo basado en calendario (también denominado en bloque)
- Reemplazo basado en tiempo.

Los gráficos de Glasser permiten obtener el tiempo de reemplazo preventivo óptimo a partir de un ratio de costes ($C_{\text{fallo}}/C_{\text{reemplazo}}$) y un ratio estadístico que define la forma de la función de probabilidad de fallo (media partida por la varianza). El mismo gráfico permite obtener el ahorro resultante frente a una política de reemplazo al fallo (sin reemplazo preventivo).

El modelo gráfico presentado en este capítulo introduce la novedad de un método gráfico para la resolución del segundo grupo de modelos, los modelos de inspecciones periódicas.

4.4.2. Hipótesis del modelo.

Además de las hipótesis básicas del Modelo de Tiempo de Retardo ya expuestas en el capítulo anterior, el método gráfico se ha desarrollado en base de dos hipótesis adicionales:

- a) El tiempo de inspección es despreciable frente al tiempo de ciclo.

Esta simplificación de la formulación general del Modelo de Tiempo de Retardo (DTM) resulta evidente en la aplicación al mantenimiento ferroviario, en el que en un rango general el periodo de las inspecciones de seguridad suele ser al menos dos órdenes de magnitud superior al tiempo que dura la inspección. En ciertas operaciones en las que los periodos pudieran ser más cortos, de por ejemplo, semanas o incluso días, los tiempos de inspección mantendrán proporciones similares. En base a la tecnología actual no sería admisible utilizar

en explotaciones como la ferroviaria equipos cuyo periodo entre inspecciones y su tiempo de inspección fuesen del mismo orden de magnitud

- b) El tiempo de detección de defectos y el tiempo de retardo siguen distribuciones exponenciales.

En la distribución exponencial, la tasa de fallos es constante, lo que se ajusta al comportamiento de un equipo complejo en un estado estacionario. En este punto ya se superado la primera parte de la curva de la bañera, donde la tasa de fallos es decreciente al ir ajustándose el equipo, pero no se ha alcanzado todavía la fase final, donde la tasa de fallos es creciente debido a la degradación por envejecimiento.

El uso de la distribución exponencial para modelar sistemas complejos es lo habitual y recomendable en sistemas complejos en los que el sistema falla si falla cualquier componente independiente del mismo o cuando ocurre cualquiera de sus múltiples modos de fallo.

Respecto al uso de la distribución exponencial para modelar el tiempo de retardo en el modelo gráfico, queda justificado por resultar la primera opción de modelado en cualquier investigación de operaciones y en particular de optimización de costes de mantenimiento. En este tipo de investigaciones, es habitual partir de una distribución exponencial, y en caso de llegar a resultados de utilidad, se continúa la investigación estudiando la aplicabilidad de otras distribuciones, habitualmente la distribución de Weibull.

El desarrollo de un modelo gráfico basado en distribuciones diferentes a la exponencial, tanto para modelar la ocurrencia y detección de fallos como para ajustar el tiempo de retardo, queda abierto a futura investigación.

4.4.3. Resolución gráfica del Modelo de Tiempo de Retardo

La formulación seleccionada es un modelo de tiempo de retardo (Delay Time Model) con distribuciones exponenciales tanto para la ocurrencia de defectos $u(t)$ como para el tiempo de retardo $h(t)$. El estudio se ciñe a un periodo en el que habrá una única inspección y podrán ocurrir N defectos, de los cuales un número B de ellos no serán detectados e implicarán una penalización. La fórmula general de este modelo para el coste por unidad de tiempo en el ciclo según lo desarrollado en el apartado 4.3. es:

$$C(T) = \frac{B(T) \cdot C_p + C_{CM} [N(T) - B(T)] + C_i}{T + d_i} \quad [4.12.]$$

En la que

- $C(T)$ es el coste total por unidad de tiempo incurrido en el ciclo,
- $C_b > C_{CM} > C_i$ son los costes de penalización, de mantenimiento correctivo (reparación en caso de detección del fallo), y de inspección respectivamente.
- T es el tiempo del ciclo de inspección periódica,
- d_i el tiempo que conlleva realizar una inspección periódica.
- N es el número total de defectos en un ciclo. Dado que se trata de un conjunto complejo, la tasa de detección de defectos se considera que sigue una distribución exponencial, por lo que el número total de fallos en el periodo será:

$$N(T) = \lambda \cdot T \quad [4.13.]$$

- B es el número de fallos en un ciclo, es decir, los defectos que no se han detectado durante el tiempo de retardo, llevando a un fallo final penalizable. Dado que se ha optado por utilizar una distribución exponencial para el tiempo de retardo, el número de fallos por ciclo será:

$$B(T) = \int_0^T \lambda \cdot F(T-u) du = \int_0^T \lambda \cdot (1 - e^{-\beta(T-u)}) du = \lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta} + T \right] \quad [4.14.]$$

Sustituyendo los valores de $N(T)$ y $B(T)$ en la ecuación de coste total por ciclo presentada al inicio de la sección se obtiene la expresión:

$$C(T) = \frac{\lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta} + T \right] \cdot C_b + C_{CM} \left[\lambda \cdot T - \lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta} + T \right] \right] + C_i}{T + d_i} \quad [4.15.]$$

Se trata de una ecuación con la que se pretende obtener el coste total por unidad de tiempo para un periodo de inspección programada. Se observa que el resultado depende las tres variables de coste - C_i , C_b , CCM - y de dos variables estadísticas - λ, β - además del tiempo de inspección. La múltiple dependencia de la ecuación en esta forma general hace que resulte poco útil para su aplicación, pues no es intuitivo entender las variaciones del resultado final en función de la precisión de cada una de las variables disponibles en la práctica. Se pretende comprender el peso de cada una de las variables en el total, a la vez que desarrollar un método simplificado para la estimación del ciclo de inspección de coste mínimo. Para ello, se llevan a cabo ciertas manipulaciones algebraicas para intentar entender cuales son las variables que rigen la dependencia temporal.

Inicialmente, se reordenan los términos de la ecuación:

$$C(T) = \frac{\lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta} + T \right] \cdot C_b + C_{CM} \left[\lambda \cdot T - \lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta} + T \right] \right] + C_i}{T + d_i};$$

$$C(T) = \frac{\lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta} + T \right] \cdot C_b - \lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta} \right] \cdot C_{CM} + C_i}{T + d_i} \quad [4.16.]$$

A continuación, dado que el tiempo de inspección en el caso del mantenimiento ferroviario es despreciable frente al periodo de inspección, se elimina de la ecuación, manteniendo el coste de inspección que sí es relevante

$$\text{dado que } T \gg t_i, \Rightarrow C(T) = \frac{\lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta} + T \right] \cdot C_b - \lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta} \right] \cdot C_{CM} + C_i}{T} \quad [4.17.]$$

Como se ha justificado en el capítulo anterior, esta simplificación de la formulación general del modelo de tiempo de retardo (DTM) resulta evidente en la aplicación al mantenimiento ferroviario, en el que en un rango general las inspecciones de seguridad duran minutos y los periodos de inspección meses.

A continuación se reordenan los términos de la ecuación, buscando el agrupar los términos en función de su dependencia del periodo de inspección.

$$C(T) = \frac{\lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta \cdot T} + 1 \right] \cdot C_b - \lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta \cdot T} \right] \cdot C_{CM} + C_i}{T} = \lambda \cdot C_b + \frac{C_i}{T} + \lambda \cdot (C_b - C_{CM}) \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta \cdot T} \right]$$

$$C(T) = \lambda \cdot C_b + \frac{C_i}{T} + \lambda \cdot (C_b - C_{CM}) \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta \cdot T} \right] = \lambda \cdot C_b + C_i \cdot \left\{ \frac{1}{T} + \lambda \cdot \frac{(C_b - C_{CM})}{C_i} \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta \cdot T} \right] \right\}$$

[4.18.]

A continuación se define *la tasa corregida de fallo* como,

$$\Lambda = \lambda \cdot \frac{(C_b - C_{CM})}{C_i} = \lambda \cdot K$$

[4.19]

Dado que $C_b > C_{CM} > C_i$, y $C_b > C_{CM} + C_i$, el *Ratio de coste K*, será siempre igual o mayor que uno y adimensional.

$$\frac{C_b > C_{CM} > C_i}{C_b > C_{CM} + C_i} \Rightarrow K = \frac{(C_b - C_{CM})}{C_i} > 1$$

[4.20]

Estas relaciones entre los diferentes costes son lógicas, pues si cualquiera de las dos no se cumpliese no tendría sentido llevar a cabo un programa de inspecciones, pasando a convertirse en un programa de mantenimiento por reemplazo bien basado en calendario o en edad.

Por lo que la tasa corregida de fallo Λ , variable fundamental del método gráfico presentado, será la tasa de fallo del equipo ponderada por un factor que habitualmente elevará su orden de magnitud uno o dos órdenes en el caso ferroviario.

Sustituyendo *la tasa corregida de fallo* en la ecuación simplificada se obtiene,

$$C(T) = \lambda \cdot C_b + C_i \cdot \left\{ \frac{1}{T} + \Lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta \cdot T} \right] \right\}$$

[4.21]

Observando la ecuación se deduce que el coste del ciclo se obtiene como suma de dos términos:

1. El primer término, $\lambda \cdot C_b$, es el coste de un ciclo en el que no se lleva a cabo inspección alguna. Representa pues el coste máximo, calculado como el número de fallos en el ciclo λ por el coste que implicaría que todos los fallos fuesen penalizables, C_b . Este término no

depende del periodo de inspección y se denominará en el modelo coste máximo de ciclo, C_{\max}

2. El segundo término, $C_i \cdot \left\{ \frac{1}{T} + \Lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta \cdot T} \right] \right\}$, representa el ahorro alcanzable mediante una política de inspecciones periódicas. Este término, sí depende del periodo de inspección y es el término a optimizar, denominándose .

La ecuación puede por tanto expresarse también como

$$C(T) = C_{\max} - A(T) \quad [4.22]$$

siendo,

$$C_{\max} = \lambda \cdot C_b \quad [4.23]$$

y

$$A(T) = -C_i \cdot \left\{ \frac{1}{T} + \Lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta \cdot T} \right] \right\} \quad [4.24]$$

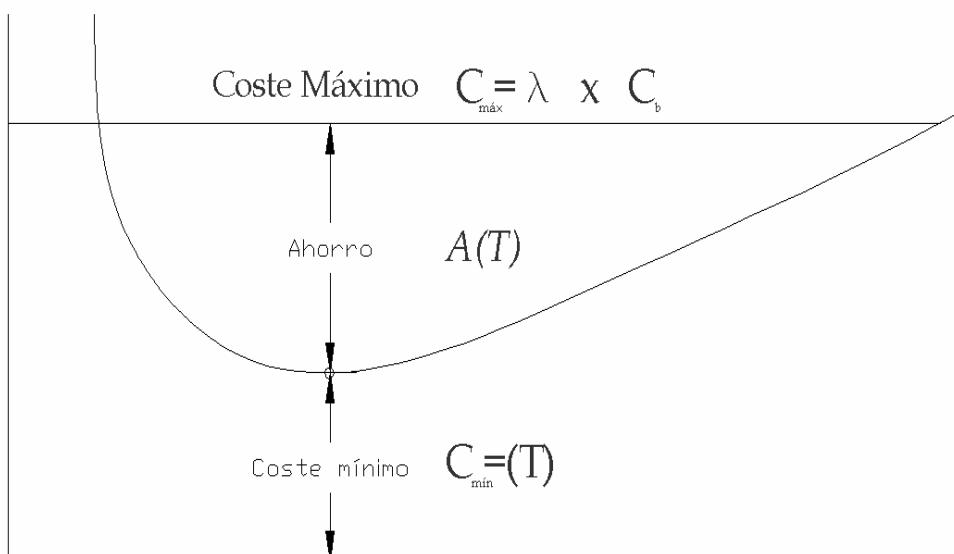


Figura 4.14. : Costes por ciclo en función del periodo de inspección. Representación del coste máximo sin inspección, del coste mínimo y del ahorro en función del periodo. Fuente: Elaboración propia

Gracias a la manipulación algebraica llevada a cabo, ahora solo el término de ahorro $A(T)$ presenta dependencia del periodo. Además se ha reducido el

número de variables del problema a tres: periodo, factor de retardo β y tasa de fallo corregida Λ .

Con objeto de estudiar la relación entre las diferentes variables y su impacto en el resultado final, se propone un método gráfico de cálculo. El objetivo es calcular el periodo óptimo para el cual el término del ahorro sea máximo. Para poder graficar los resultados, se trabajará solo sobre el término que presenta variación con el periodo, es decir, con la función:

$$\frac{A(T)}{-C_i} = \left\{ \frac{1}{T} + \Lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta \cdot T} \right] \right\} \quad [4.24]$$

Se pretende resolver la ecuación en dos dominios, tiempo y coste, siendo los objetivos:

1. Obtener el periodo óptimo de inspección T_o que maximice la función ahorro en función del factor de retardo β y tasa de fallo corregida Λ ;
2. Y obtener el ahorro máximo alcanzable A_o para dicho periodo de inspección óptimo, en función del factor de retardo β y tasa de fallo corregida Λ .

Estos dos objetivos se abordan, resuelven y comentan en los dos apartados siguientes.

4.4.4. Resolución gráfica del periodo óptimo de inspección

Para obtener el periodo óptimo de inspección T_o que maximice la función ahorro en función del factor de retardo β y tasa de fallo corregida Λ será necesario maximizar la función

$$\frac{A(T)}{-C_i} = \left\{ \frac{1}{T} + \Lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta \cdot T} \right] \right\} \quad [4.25]$$

Derivando la función ahorro e igualando a cero, se obtiene:

$$\frac{\partial A(T)}{\partial T} = 0 \Rightarrow \frac{\Lambda \cdot e^{-\beta}}{\beta \cdot T} - \Lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta \cdot T^2} \right] - \frac{1}{T^2} = 0 \quad [4.25]$$

Ahora ya es posible representar la familia de funciones resultantes $\beta = \varphi(\Lambda)$ para diferentes periodos de inspección óptimos, $T_o=25$, $T_o=50$, $T_o=100\dots$

obteniendo un gráfico de contornos de gran utilidad para la comprensión del modelo.

Para poder representar gráficamente las soluciones se ha desarrollado un algoritmo en lenguaje de programación Python utilizando la librería SymPy de cálculo simbólico cuyo código se adjunta en el apartado de anexos de este documento. El gráfico de contornos resultante se reproduce en la siguiente figura:

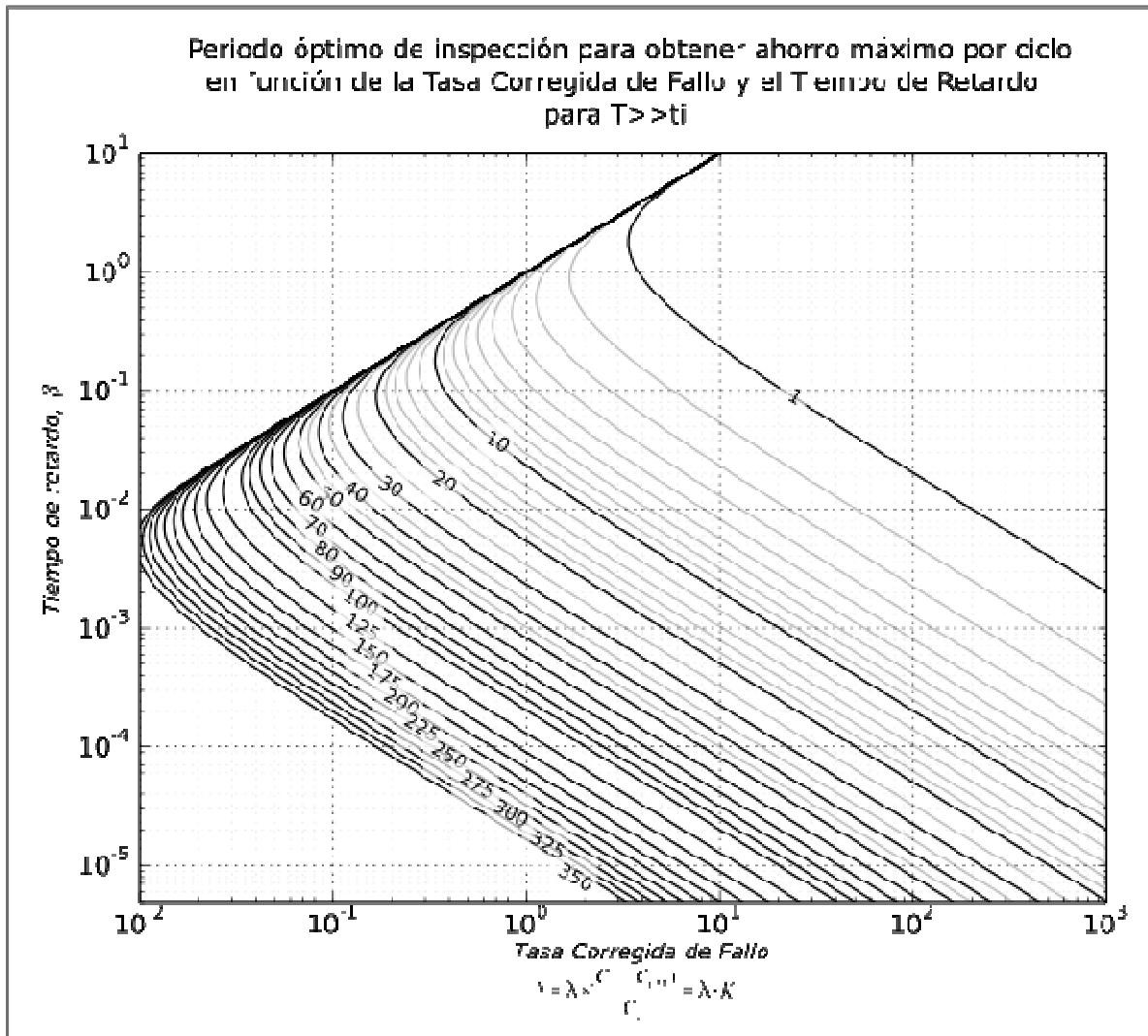


Figura 4.15.: Periodo óptimo de inspección para obtener ahorro máximo por ciclo en función de la Tasa Corregida de Fallo y el Tiempo de Retardo para $T>>t_i$. Fuente:
Elaboración propia

En el gráfico se ha representado la tasa corregida de fallo λ en el eje de abscisas y el factor de retardo β en ordenadas, representando cada una de las isolíneas graficadas en negro $T_o=25, T_o=50, T_o=100\dots$ el valor de tiempo óptimo que corresponde a la cada dupla (λ, β) . Se trata de un campo continuo, por lo que será necesario interpolar entre isolíneas en caso de que el punto definido por la dupla valores (λ, β) así lo requiera.

4.4.5. Resolución gráfica del ahorro máximo y cálculo del coste mínimo

Una vez obtenido el campo de tiempos óptimos de inspección $T_o=25, T_o=50, T_o=100\dots$, en función del factor de retardo β y tasa de fallo corregida Λ , se puede obtener el valor de la función ahorro para cada tiempo óptimo sustituyendo los valores de β, Λ , y T_o en la ecuación:

$$A(T) = -C_i \cdot \left\{ \frac{1}{T} + \Lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta \cdot T} \right] \right\} \quad [4.26]$$

Observando la expresión se deduce que para un tiempo óptimo T_o dado, el ahorro dependerá del factor de retardo β y tasa de fallo corregida Λ , y además del factor C_i , que representa un dato de entrada del problema que a su vez no depende ni del factor de retardo β ni de la tasa de fallo corregida Λ . Por tanto, para obtener gráficamente la solución $A(T)$, resulta conveniente desacoplar el problema, representando en primer lugar la función que depende de β y Λ para a continuación representar la multiplicación de ese factor por el coste de inspección C_i .

Definiendo por tanto ψ como el *Coeficiente de Ahorro*, se obtiene:

$$A(T) = -C_i \cdot \psi \quad \text{siendo} \quad \psi = \left\{ \frac{1}{T} + \Lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta \cdot T} \right] \right\} \quad [4.27]$$

A continuación se procede a representar el *Coeficiente de Ahorro* en función del factor de retardo β y tasa de fallo corregida Λ :

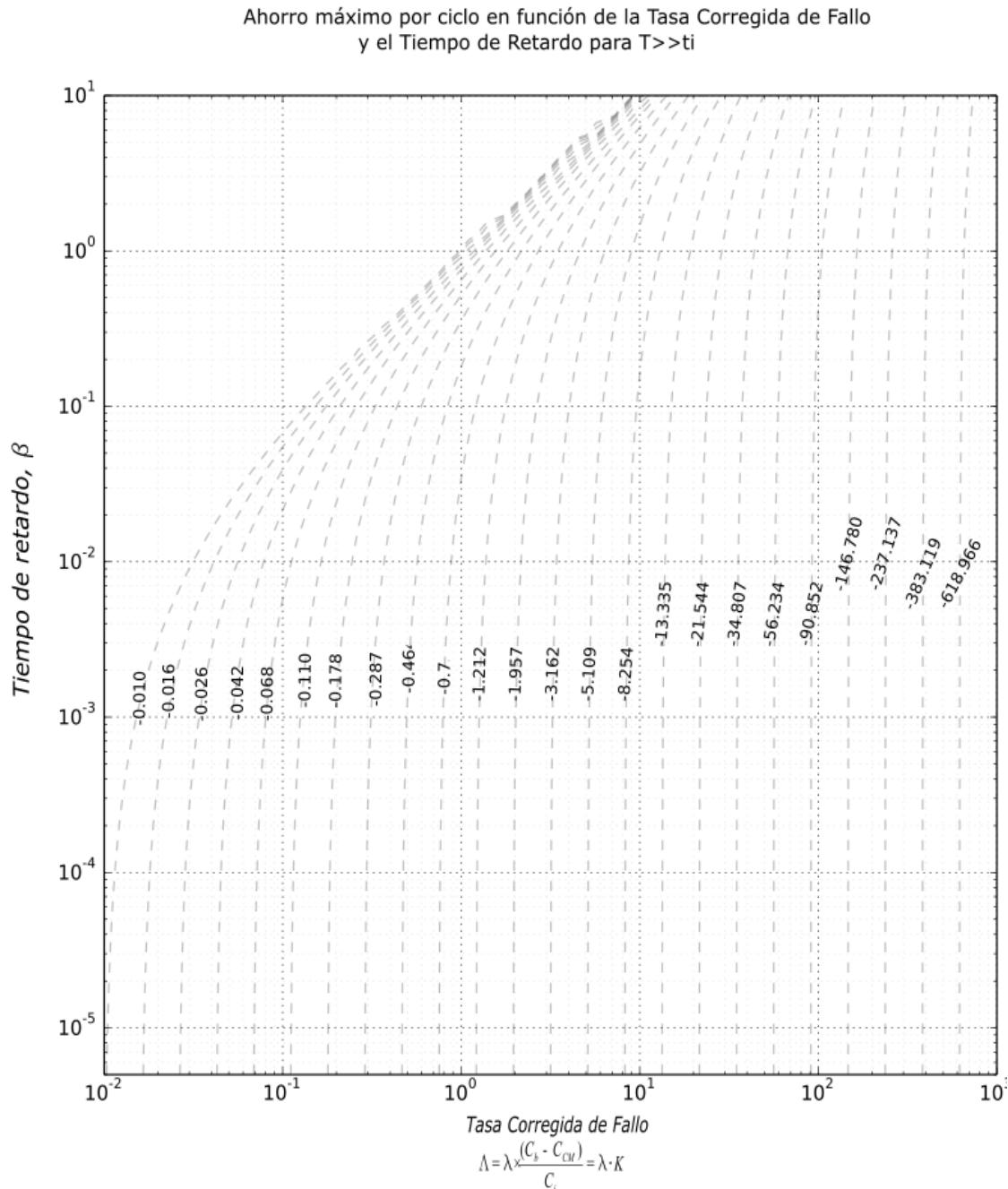


Figura 4.16.: Ahorro máximo por ciclo en función de la Tasa Corregida de Fallo y el Tiempo de Retardo para $T \gg t_i$. Fuente: Elaboración propia

El campo de resultados se ha ilustrado utilizando los mismos dominios del factor de retardo β y tasa de fallo corregida Λ con objeto de poder posteriormente utilizar el mismo gráfico para obtener el tiempo óptimo T_o y su correspondiente Coeficiente de Ahorro ψ . En el siguiente ábaco se han representado simultáneamente los valores del periodo óptimo y del ahorro máximo en función de las dos variables principales del modelo, la tasa de

tiempo de retardo y la tasa de fallo corregida. Este ábaco es el resultado fundamental del modelo, aportando la practicidad de poder calcular simultáneamente periodo óptimo y ahorro máximo:

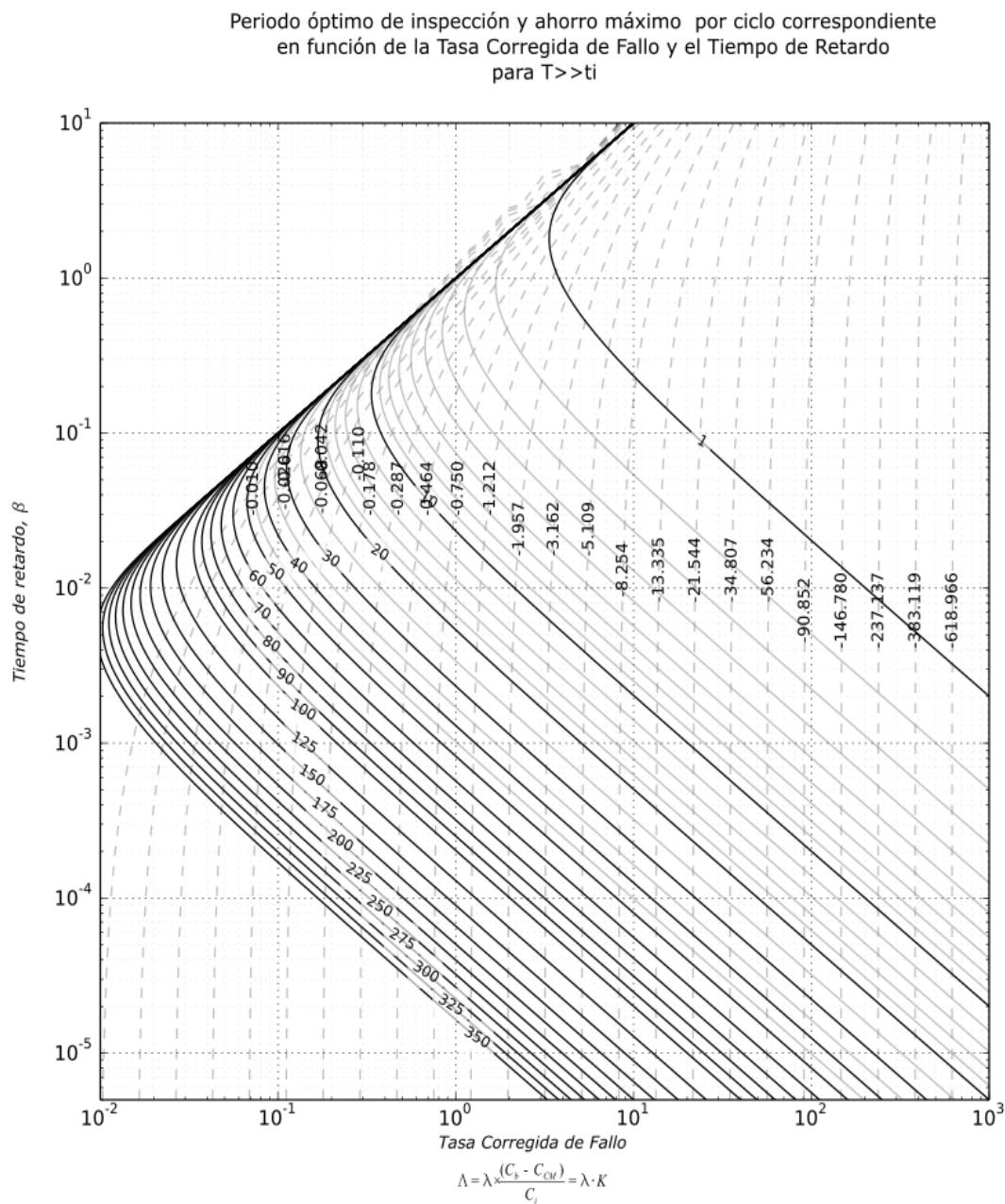
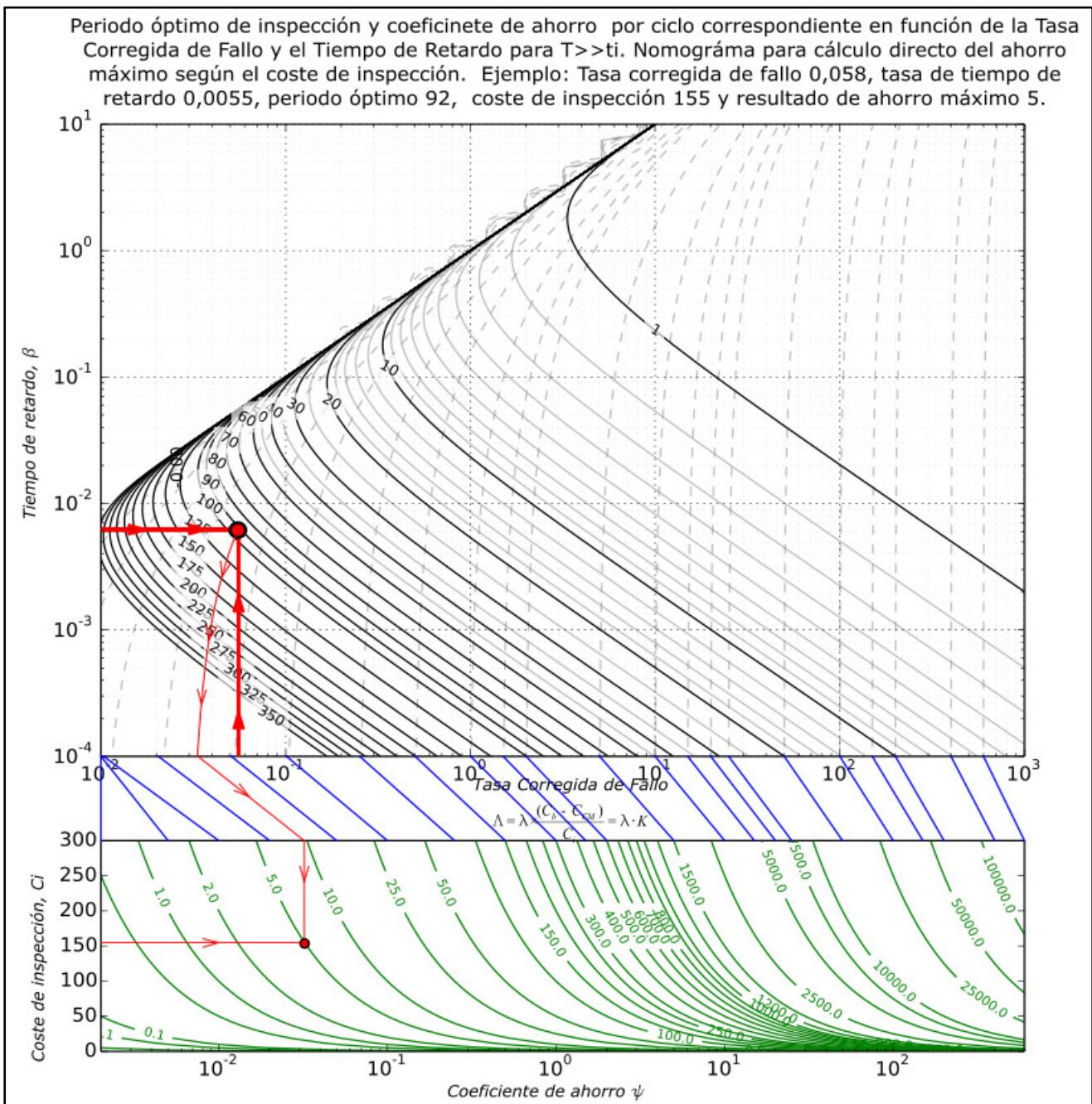


Figura 4.17.: Periodo óptimo de inspección y ahorro máximo por ciclo correspondiente en función de la Tasa Corregida de Fallo y el Tiempo de Retardo para $T \gg t_i$. Fuente: Elaboración propia

Se observa que el *Coeficiente de Ahorro* ψ es un valor negativo en el dominio de estudio, que concuerda con la formulación expuesta,

$$C(T) = C_{\max} - A(T); \quad C_{\max} = \lambda \cdot C_b; \quad A(T) = -C_i \cdot \psi \quad [4.28]$$

Una vez obtenido gráficamente el *Coefficiente de Ahorro* ψ , tan solo queda multiplicar el valor obtenido por el coste de inspección para obtener así el ahorro $A(T)$. Aunque se trata de una mera multiplicación, se ha optado por desarrollar un nomograma de cálculo de la operación $C_i \times \psi$ para poder calcular el valor del ahorro $A(T)$ de un modo más elegante y rápido. Utilizando el siguiente nomograma, se puede obtener de modo gráfico el valor del ahorro



$A(T) = \varphi(\psi, C_i)$ a partir de las variables fundamentales del problema:

Figura 4.18.: Período óptimo de inspección y coeficiente de ahorro por ciclo correspondiente en función de la Tasa Corregida de Fallo y el Tiempo de Retardo para $T > t_i$. Nomograma para cálculo directo del ahorro máximo según el coste de inspección. Ejemplo: Tasa corregida de fallo 0,058, tasa de tiempo de retardo 0,0055, período óptimo 92, coste de inspección 5 y resultado de ahorro máximo 155 Fuente: Elaboración propia

Para obtener el resultado total, se siguen los siguientes pasos:

- a) Primero es necesario ubicar en el gráfico superior el valor del *Coeficiente de Ahorro* ψ correspondiente a los valores de factor de retardo β y tasa de fallo corregida λ del caso bajo estudio. Es probable que sea necesario interpolar entre dos isolíneas para hallar el valor $\psi = \varphi(\beta, \lambda)$.
- b) Una vez localizada la isolínea del *Coeficiente de Ahorro* ψ correspondiente, se sigue dicha isolínea hasta su punto de corte con el eje de abscisas. En el eje de abscisas se ha realizado un cambio de escala y trazado unos rayos guía que permiten entrar al gráfico inferior por su eje de abscisas. Alternativamente, conocido el valor $\psi = \varphi(\beta, \lambda)$ se puede entrar en el gráfico inferior por la escala de su eje de abscisas.
- c) Finalmente, conocido el valor ψ , para obtener el valor $A(T) = \varphi(\psi, C_i)$ se selecciona el valor del coste de inspección C_i en el eje de ordenadas y se busca la isolínea correspondiente al ahorro total por unidad de tiempo para el tiempo de ciclo óptimo.

Gracias al método gráfico desarrollado es posible calcular el ahorro de un modo gráfico. Para obtener el coste mínimo por unidad de tiempo, bastará con sustraer el ahorro del coste máximo, obtenido como la multiplicación el coste de penalización por la tasa de fallo:

$$C(T) = C_{\max} - A(T) = \lambda \cdot C_b - C_i \cdot \psi \quad [4.29]$$

4.4.6. Definición de los límites del dominio de trabajo

Interesa estudiar el comportamiento del modelo gráfico en un rango de valores positivos de la *tasa corregida de fallo* Λ y del factor de retardo β acotados para la aplicación en el mantenimiento ferroviario, pero utilizando un campo lo suficientemente amplio como para entender los límites de la función en el caso de estudio.

Para estudiar el rango de valores posibles de la *tasa corregida de fallo* Λ será necesario acotar cada uno de sus términos, K y λ

$$\Lambda = \lambda \cdot \frac{(C_b - C_{CM})}{C_i} = \lambda \cdot K \quad [4.30]$$

Para acotar superiormente el *ratio de coste* K , se toma un coste de penalización máximo y unos valores de costes de mantenimiento correctivo e inspección mínimos.

$[C_b]_{máx}$	$[C_{CM}]_{mín}$	$[C_i]_{mín}$	$K_{máx} = \frac{(C_b - C_{CM})}{C_i}$
10.000 u.m.	10 u.m.	5 u.m.	1998

Tabla 4.1. :Acotación superior del ratio de coste K . Fuente: Elaboración Propia.

Del mismo modo, para acotar inferiormente el *ratio de coste* K , se toma un coste de penalización mínimo y unos valores de costes de mantenimiento correctivo e inspección máximo.

$[C_b]_{mín}$	$[C_{CM}]_{máx}$	$[C_i]_{máx}$	$K_{mín} = \frac{(C_b - C_{CM})}{C_i}$
100 u.m.	51 u.m.	50 u.m.	1.01

Tabla 4.2. :Acotación inferior del ratio de coste K . Fuente: Elaboración Propia.

En ambos casos se han respetado las dos condiciones que debe de cumplir la relación de costes en un programa de mantenimiento con inspecciones, a saber,

$$\begin{aligned} C_b &> C_{CM} > C_i \\ C_b &> C_{CM} + C_i \end{aligned} \quad [4.31]$$

Los valores seleccionados para acotar superior e inferiormente el *ratio de coste* K son valores que representarían casuísticas límite:

- Cuando el *Ratio de coste* K es cercano a la unidad, no resultaría lógico llevar a cabo un programa de inspecciones, pues en caso de que en una inspección se

detecte un fallo y se repare, el coste de la inspección y el correctivo son muy similares al coste de la penalización que se hubiera incurrido sin programa de inspecciones.

- b) Cuando el *Ratio de coste K* es muy elevado, siendo los costes de inspección y de correctivo muy bajos, el programa de inspecciones queda plenamente justificado. Sin embargo, en estos casos suele ser conveniente implementar un programa de tipo Mantenimiento Basado en la Condición, en el que las variables que diagnostican el desgaste son monitorizadas en continuo. En estos casos, tal y como quedó expuesto en el Capítulo 3, la problemática consiste en calcular cual es el nivel máximo de deterioro permitido que minimiza el tiempo de ciclo.

Una vez acotado el *Ratio de coste K* resulta necesario seleccionar los valores de la *tasa de fallo λ* para así acotar la *Tasa corregida de fallo, $\Lambda = \lambda \cdot K$* . que constituye una de las dos variables de entrada del mapa de contorno. Para acotar la tasa de fallo se partirá de un valor central real, tomando límites extremos a partir del mismo. Como tasa de fallo real se parte del valor correspondiente a un conjunto de puerta exterior de una explotación de metro. La exactitud de este valor es irrelevante, puesto que se trata tan solo de establecer un orden de magnitud a partir del cual definir unos valores máximos y mínimos y así poder estudiar cómo se comporta la función entre esos valores.

$\lambda_{\text{mínima}} = \lambda_{\text{cto puerta}} \div 100$	$\lambda_{\text{conjunto puerta}}$	$\lambda_{\text{máxima}} = \lambda_{\text{cto puerta}} \times 100$
$2 \cdot 10^{-7} \text{ fallos / hora}$	$2 \cdot 10^{-5} \text{ fallos / hora}$	$2 \cdot 10^{-3} \text{ fallos / hora}$
$48 \cdot 10^{-7} \text{ fallos / día}$	$48 \cdot 10^{-5} \text{ fallos / día}$	$48 \cdot 10^{-3} \text{ fallos / día}$

Tabla 4.3. :Acotación del rango de estudio de la tasa de fallo. Fuente: Elaboración Propia.

Habiendo acotado los valores máximos y mínimos del *Ratio de coste K* y de la *tasa de fallo λ* , se calculan los valores máximos resultantes de la *Tasa corregida de fallo, $\Lambda = \lambda \cdot K$* :

$K_{\text{mín}}$	λ_{min}	$\Lambda_{\text{min}} = \lambda_{\text{min}} \cdot K_{\text{min}}$
1.01	$48 \cdot 10^{-7} \text{ fallos / día}$	$\cong 50 \cdot 10^{-7} \text{ fallos / día}$

$K_{\text{máx}}$	$\lambda_{\text{máx}}$	$\Lambda_{\text{máx}} = \lambda_{\text{máx}} \cdot K_{\text{máx}}$
1998	$48 \cdot 10^{-3} \text{ fallos / día}$	$\cong 100 \text{ fallos / día}$

Tabla 4.4. :Acotación del rango de estudio de la tasa corregida de fallo. Fuente: Elaboración Propia.

Con estos valores extremos del dominio se representa el campo de líneas de isovalores para períodos de inspección óptimos. Para estudiar el dominio, se ha limitado la Tasa de Tiempo de Retardo a valores idénticos a los del rango de la Tasa Corregida de Fallo. Adicionalmente, se han representado isolíneas de valores de períodos entre un día y un año, pues no se considera práctico para el objeto de esta tesis el estudiar inspecciones más frecuentes que las diarias ni menos frecuentes que las anuales.

El gráfico obtenido con los valores límite justificados para cada variable se reproduce a continuación

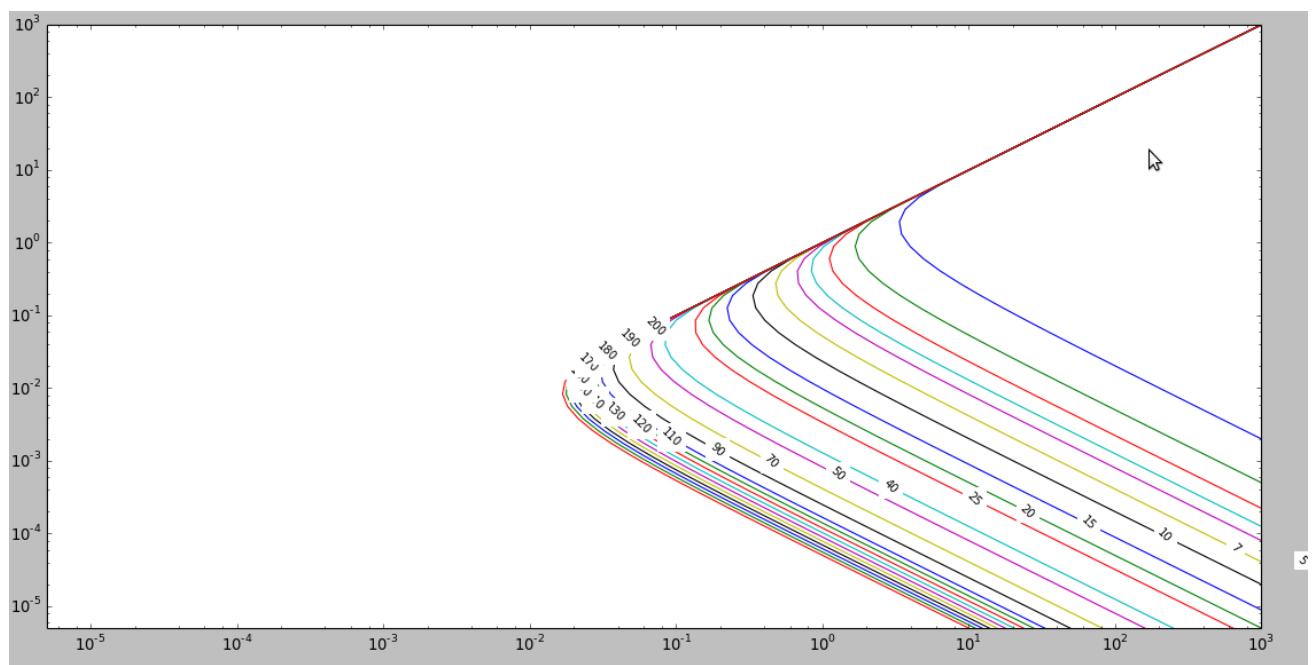


Figura 4.19.: Estudio del dominio del periodo óptimo en función de la tasa de fallo corregida y la tasa de tiempo de retardo. Periodo hasta $T=200$. Fuente: Elaboración propia

Los valores representados en la figura 4.19. se han limitado a un periodo de 200 días. Si se aumenta el valor para entender la evolución de la gráfica, se observa que se sigue poblando el espacio delimitado por la asíntota $\Lambda = \beta$, como se observa en la siguiente figura, en la que se han representado valores hasta un periodo de 1000.

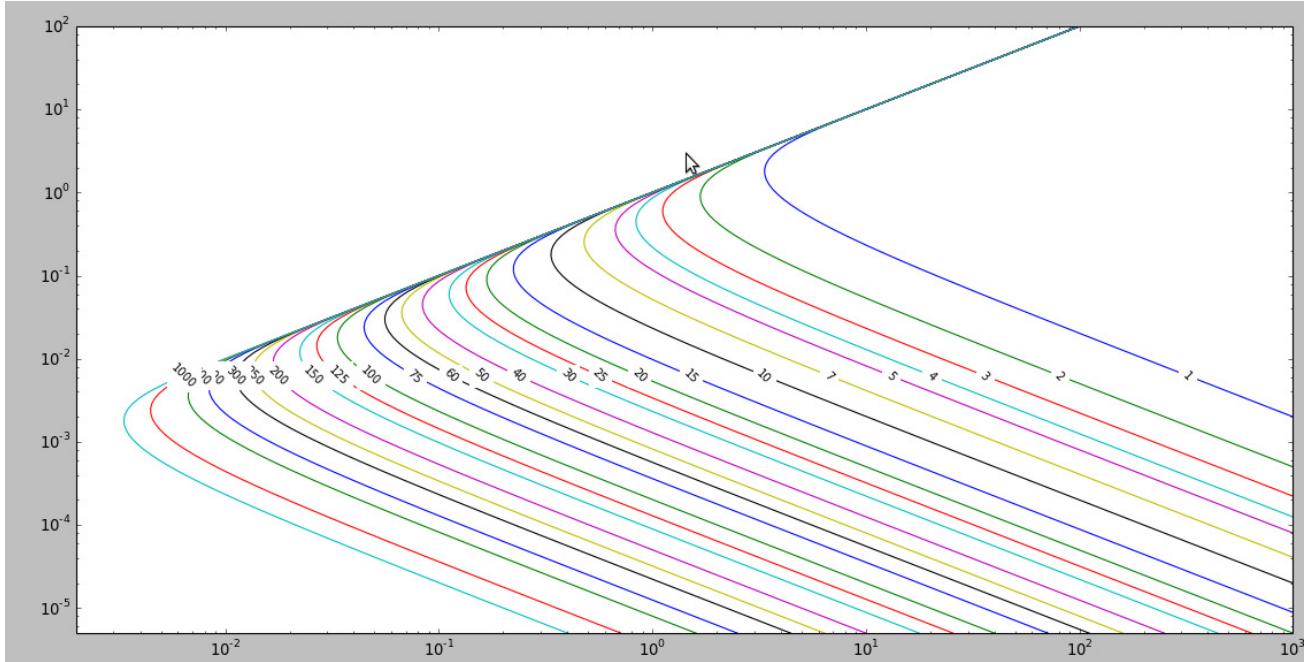


Figura 4.20.: Estudio del dominio del periodo óptimo en función de la tasa de fallo corregida y la tasa de tiempo de retardo. Periodo hasta $T=1000$. Fuente: Elaboración propia

Por encima de dicha asíntota se observa que el modelo de tiempo de retardo planteado no un periodo óptimo para valores lógicos:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A(T)}{\partial T} = 0 &\Rightarrow \frac{\Lambda \cdot e^{-\beta}}{\beta \cdot T} - \Lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta \cdot T^2} \right] - \frac{1}{T^2} = 0 \\ \Lambda = \beta &\Rightarrow \frac{\beta \cdot e^{-\beta}}{\beta \cdot T} - \beta \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta \cdot T^2} \right] - \frac{1}{T^2} = 0 \\ \frac{e^{-\beta}}{T} - \frac{e^{-\beta T}}{T^2} + \frac{1}{T^2} - \frac{1}{T^2} &= 0 \\ \frac{e^{-\beta}}{T} - \frac{e^{-\beta T}}{T^2} &= 0 \end{aligned} \quad [4.32]$$

Ecuación esta última que solo presenta solución en el campo de los números reales cuando $T=1$ y $\beta = 1$, caso que no tiene significado práctico en este caso.

4.4.7. Estimación del riesgo: apuntamiento y asimetría de la función coste

El método gráfico desarrollado permite hallar fácilmente el periodo de inspección óptimo correspondiente al coste mínimo. Para cada periodo óptimo la función coste presentará una forma u otra dependiendo de los datos de entrada. El estudio de la forma de la función coste en el entorno del periodo óptimo aporta información práctica sobre el riesgo asociado al punto de trabajo. Los óptimos que presenten una concavidad muy pronunciada serán situaciones de riesgo significativo, pues una política de mantenimiento que no se ajuste al periodo óptimo conllevará elevados costes. Por el contrario, funciones coste prácticamente planas alrededor del punto óptimo podrán ser interpretadas por el ingeniero de mantenimiento como situaciones de bajo riesgo, pues una desviación respecto al óptimo no implica grandes variaciones en el coste total.

Para estudiar el riesgo de un óptimo determinado se utilizan dos factores de forma:

Apuntamiento o riesgo

La pendiente de la función coste en el entorno de ese mínimo aporta información sobre el riesgo asociado a dicho óptimo. Esta medida de forma es habitualmente referida como "apuntamiento" en teoría de la probabilidad y estadística, y aunque habitualmente se aplica al estudio de la distribución normal, se adopta por analogía el término de aquí en adelante para referirse a la concentración de datos muy cerca del periodo de coste mínimo.

El apuntamiento es el factor de forma que cualitativamente indica el valor del riesgo intrínseco del periodo de coste óptimo. Funciones muy apuntadas implicarán gran riesgo, por lo que valdrá la pena estudiar con mayor profundidad el caso práctico para acotar los errores permisibles en la estimación de cada parámetro. Sin embargo, apuntamientos poco relevantes corresponderán a funciones más planas en el entorno del óptimo. Esta segunda situación (riesgo bajo) será la preferida por los ingenieros de mantenimiento, pues permitirá ajustar los periodos de inspección con cierta flexibilidad, sin que esta variación respecto al periodo óptimo implique grandes cambios en el coste total.

Asimetría

La asimetría es un factor de forma que aporta información sobre la asimetría de la función coste en el entorno del periodo óptimo. Conocer esta asimetría ayuda al ingeniero de mantenimiento a entender el riesgo que implica el separarse del periodo óptimo de inspección por aplicar una política de inspecciones bien de

mayor o menor frecuencia. Se trata de nuevo de un término que se aplica al estudio de la distribución normal, y que por mera analogía se utiliza en esta investigación para estudiar la forma de la función coste.

4.4.7.1. Variación cualitativa de la forma de la función coste

A continuación se describe cómo varía cualitativamente, el apuntamiento y la asimetría en función de las cinco variables del problema, a saber: tiempo de retardo, tasa de fallo, coste de inspección, coste de correctivo y coste de penalización. Para entender la relación entre variables se utiliza un ejemplo numérico, sobre el que se modifica una variable cada vez, dejando el resto de variables con su valor inicial. El ejemplo y los rangos de valores caen dentro de los esperados en un caso de mantenimiento de flotas ferroviarias, y coinciden con los utilizados en el Capítulo 5 como caso de estudio:

a) Variación de la forma con la tasa de fallo.

Al variar la tasa de fallo cambia tanto la forma de la función (en apuntamiento y sesgo) como la ubicación del punto óptimo (periodo para coste mínimo). Obviamente tasas de fallo más elevadas conducen a costes por ciclo más elevados y períodos de inspección más cortos. Estos dos valores ya se deducen del Método Gráfico General y son tan solo expresión de la ubicación del punto óptimo, no aportando información sobre la forma de la función.

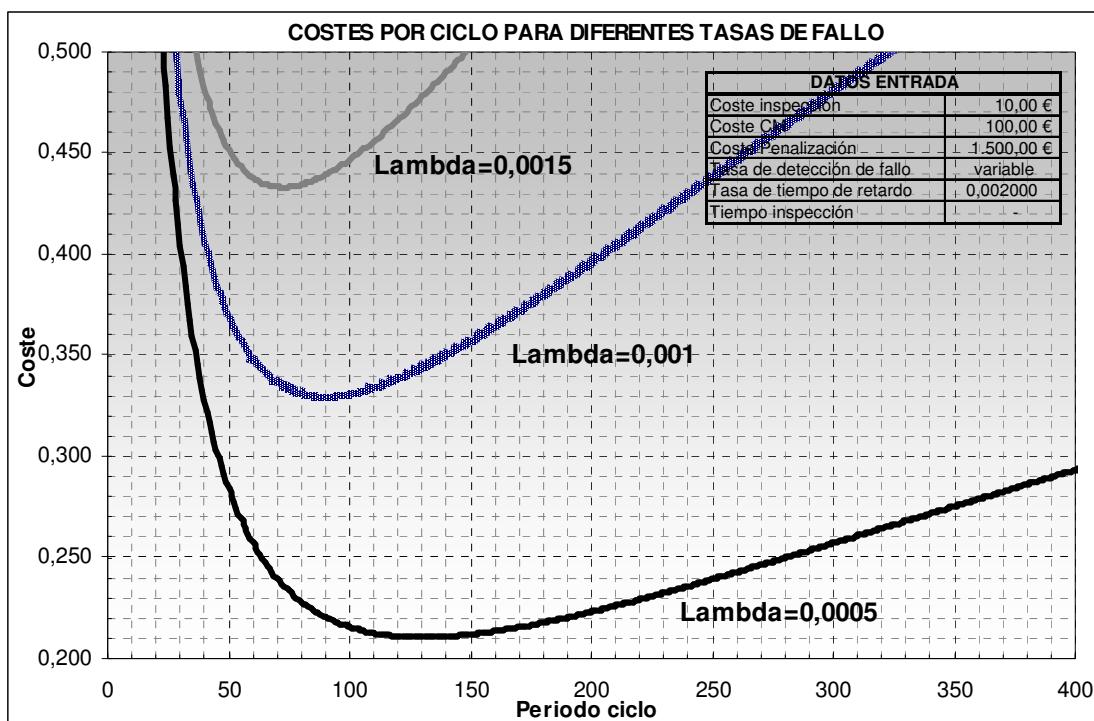


Figura 4.21.: Costes por ciclo para diferentes tasas de fallo. Fuente: Elaboración propia

Respecto a la forma de la función, se observa que un aumento en la tasa de fallos implica mayor apuntamiento de la función (mayor riesgo), así como menor asimetría.

b) Variación de la forma con el tiempo de retardo.

Al variar la tasa del tiempo de retardo cambia tanto la forma de la función (en apuntamiento y simetría) como la ubicación del punto óptimo (periodo para coste mínimo). Tiempos de retardo cortos (tasas de tiempo de retardo grandes) conducen a costes por ciclo más elevados y periodos de inspección más cortos. Estos dos valores ya se deducen del Método Gráfico General y son tan solo expresión de la ubicación del punto óptimo, no aportando información sobre la forma de la función.

Respecto a la forma de la función, se observa que un aumento en las tasas de los tiempos de retardo (disminución de los tiempos de retardo) implica mayor apuntamiento de la función (mayor riesgo), así como menor asimetría. Tiempos de retardo mayores significan mayor tiempo entre que un defecto es observable y la ocurrencia del fallo, por lo que su incremento implica la relajación del riesgo.

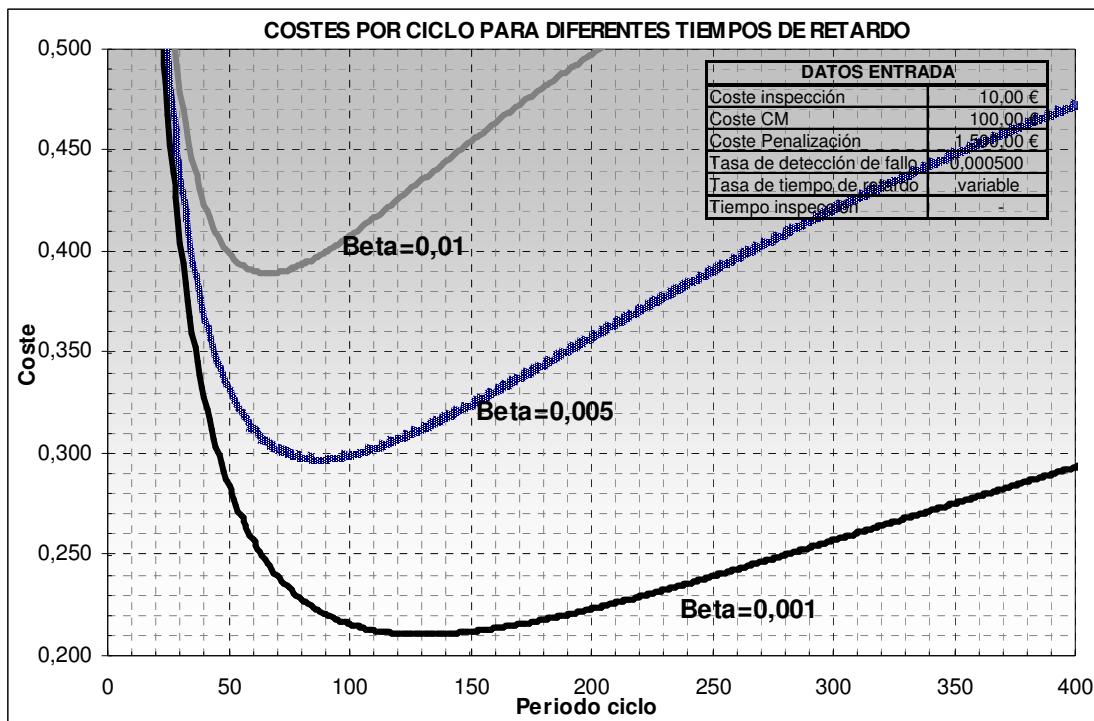


Figura 4.22.: Costes por ciclo para diferentes tasas de tiempo de retardo. Fuente: Elaboración propia

c) Variación de la forma con el coste de inspección.

Al variar el coste de inspección cambia tanto la forma de la función (en apuntamiento y simetría) como la ubicación del punto óptimo (periodo para coste mínimo). Costes de inspección más elevados conducen a costes por ciclo más elevados y períodos de inspección más largos. Estos dos valores ya se deducen del Método Gráfico General y son tan solo expresión de la ubicación del punto óptimo, no aportando información sobre la forma de la función.

Respecto a la forma de la función, se observa que un aumento en el coste de inspección implica menor apuntamiento de la función (menor riesgo), así como mayor asimetría.

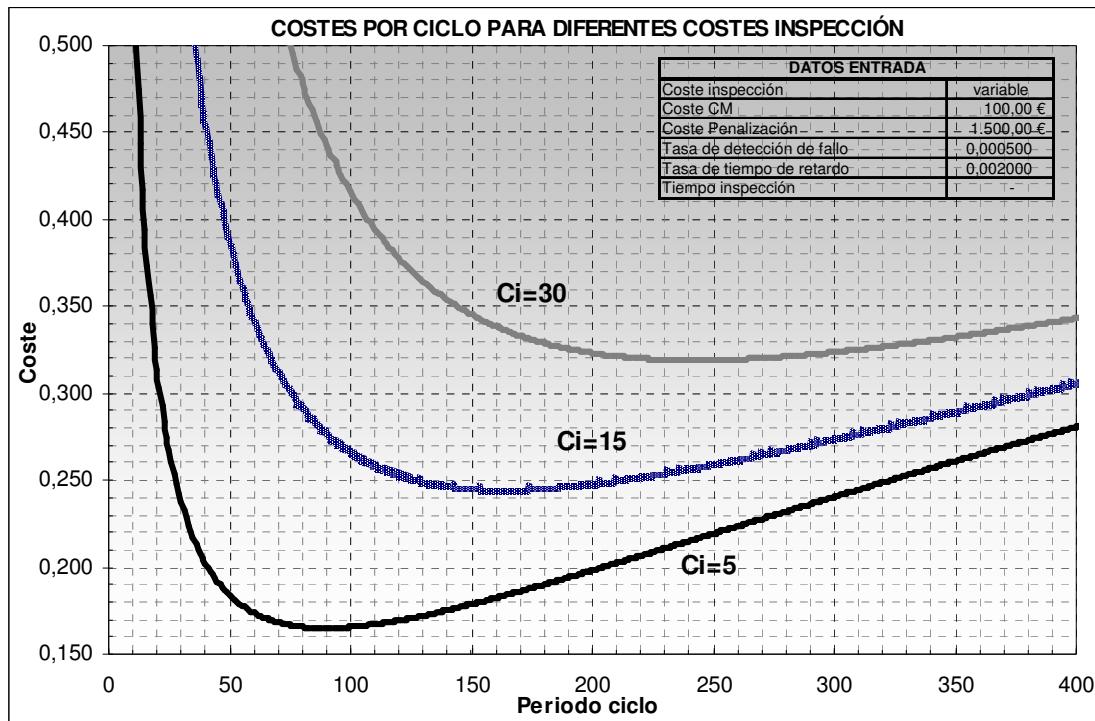


Figura 4.23.: Costes por ciclo para diferentes costes de inspección. Fuente: Elaboración propia

d) Variación de la forma con el coste de penalización.

Al variar el coste de penalización cambia tanto la forma de la función (en apuntamiento y asimetría) como la ubicación del punto óptimo (periodo para coste mínimo). Costes de penalización más elevados conducen a costes por ciclo más elevados y períodos de inspección más cortos. Estos dos valores ya se deducen del Método Gráfico General y son tan solo expresión de la ubicación del punto óptimo, no aportando información sobre la forma de la función.

Respecto a la forma de la función, se observa que un aumento en el coste de penalización implica mayor apuntamiento de la función (mayor riesgo), así como menor asimetría.

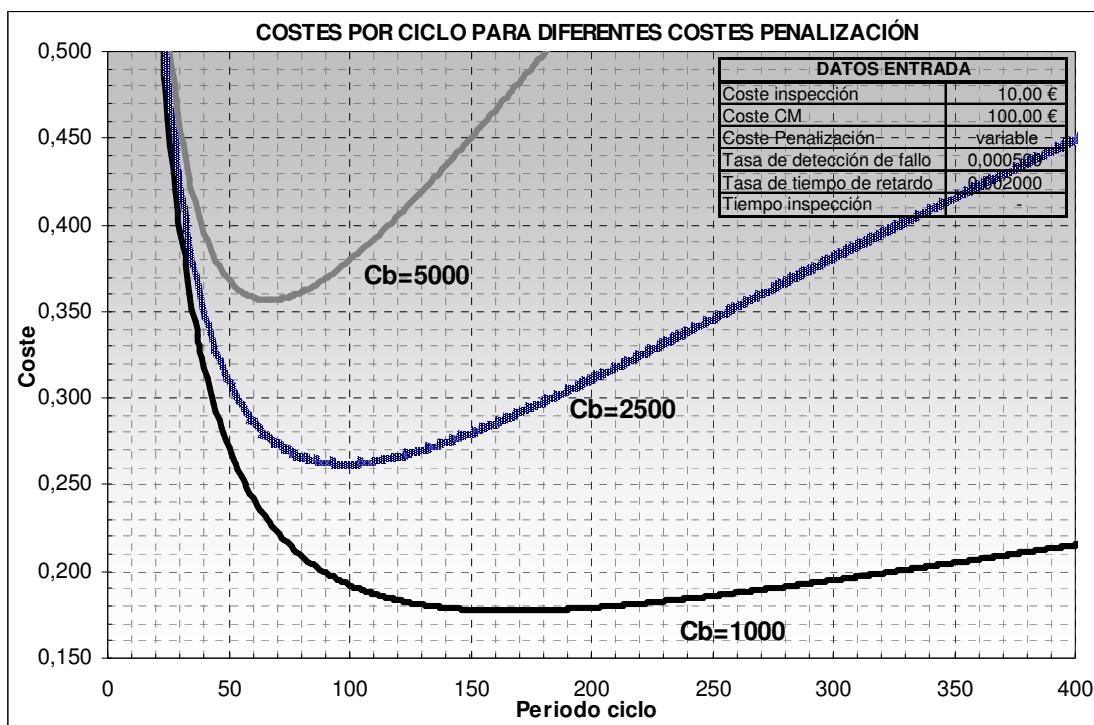


Figura 4.24.: Costes por ciclo para diferentes costes de penalización. Fuente: Elaboración propia

e) Variación de la forma con el coste de correctivo.

Al variar el coste de correctivo cambia tanto la forma de la función (en apuntamiento y asimetría) como la ubicación del punto óptimo (periodo para coste mínimo), aunque en este caso las variaciones son menores. Costes de correctivo más elevados conducen a costes por ciclo más elevados y períodos de inspección más largos, aunque la tendencia es menor que cuando se varían el resto de variables. Estos dos valores ya se deducen del Método Gráfico General y son tan solo expresión de la ubicación del punto óptimo, no aportando información sobre la forma de la función.

Respecto a la forma de la función, se observa que prácticamente no hay variación ni en apuntamiento ni en asimetría.

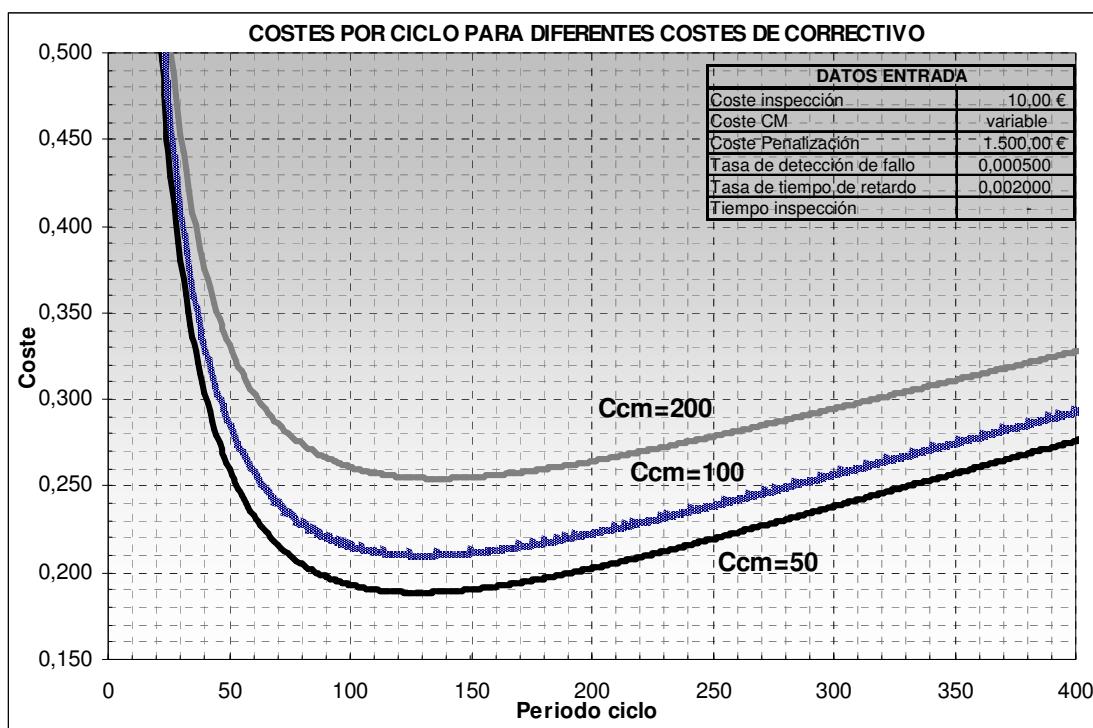


Figura 4.25.: Costes por ciclo para diferentes costes de correctivo. Fuente: Elaboración propia

La siguiente tabla reúne, a modo de resumen, la variación cualitativa de la forma de la función en apuntamiento y asimetría así como la tendencia en coste y periodo en función de las variaciones de las cinco variables de entrada del problema.

	Apuntamiento	Asimetría	Coste	Periodo
$\Delta\lambda$	↑↑	↓	↑↑	←
$\Delta\beta$	↑↑	↓	↑↑	←
ΔC_i	↓↓	↑	↑↑	→
ΔC_p	↑↑	↓	↑↑	←
ΔC_{CM}	~	~	↑	→

Tabla 4.5. :Variación de forma de la función coste en función de los cinco parámetros principales. Fuente: Elaboración Propia.

4.4.7.2. Influencia del uso de distribuciones exponenciales en el modelado

En el Modelo Gráfico desarrollado se han utilizado distribuciones exponenciales para modelar tanto la tasa de fallos como el tiempo de retardo.

Respecto al modelado de la tasa de fallo, en el campo de la Ingeniería de la Fiabilidad es habitual utilizar la distribución exponencial cuando el fallo del sistema puede ser causado por el fallo de cualquiera de los múltiples componentes de los que el sistema está formado. Es decir, es la función más habitual para modelar sistemas complejos y así ha sido demostrado por diferentes autores a lo largo de las últimas décadas (Drenik 1960). La distribución exponencial presenta un único parámetro, la tasa de fallo, que se considera constante (no hay degradación) durante la madurez del sistema bajo estudio. Este modelo, además de aportar tiempos de fallo precisos en sistemas complejos, presenta gran sencillez de manejo frente al resto de distribuciones (Weibull, gamma, etc...) razones que justifican su uso universal en el mundo de la Ingeniería de la Fiabilidad aplicada al sector ferroviario.

En lo referente al modelado del tiempo de retardo, se ha utilizado la distribución exponencial por la facilidad de manipulación algebraica que aporta a la hora de desarrollar un método gráfico. En el Capítulo 6 se señala como futura línea de investigación el desarrollo de métodos gráficos para otras distribuciones, en particular la Weibull.

Idealmente, a la hora de aplicar un Modelo de Tiempo de Retardo, el primer paso es seleccionar la tipología de distribución a utilizar para modelar tanto la tasa de fallo como el tiempo de retardo. El método elegido suele ser la aplicación de estimación por máximos verosímiles sobre un universo de datos históricos de

los tiempos de renovación (por fallo o por inspección positiva). A partir de estos datos se obtienen los parámetros de ajuste de dichas funciones al universo de datos históricos. En el campo del Modelo de Tiempo de Retardo habitualmente (Baker 1995, Tang 2014), se utilizan ajustes por medio de las distribuciones exponencial y de Weibull. Una vez obtenidos los parámetros se utiliza alguna medida de la bondad de la regresión (Akaike Information Criteria, Test de Kolmogorov-Smirnov...) para seleccionar la pareja de distribuciones que mejor definen el escenario.

Opción	Tiempo de fallo	Tiempo de retardo	Parámetros obtenidos por máximos verosímiles	Criterio de selección (bondad regresión)
1	Exponencial	Exponencial	λ, β	∇/Δ
2	Exponencial	Weibull	$\lambda; \beta_1, \beta_2$	∇/Δ
3	Weibull	Exponencial	$\lambda_1, \lambda_2; \beta$	∇/Δ
4	Weibull	Weibull	$\lambda_1, \lambda_2; \beta_1, \beta_2$	∇/Δ

Tabla 4.6.: Combinatoria de tipos de distribución y parámetros más frecuentes. Fuente:
Elaboración Propia.

En el desarrollo del Método Gráfico se ha optado a priori por la Opción 1 "Exponencial-Exponencial" por los motivos expuestos en párrafos anteriores. Sin embargo, conviene entender las implicaciones a nivel de riesgo que conlleva esta decisión.

Para estudiar la influencia del uso de distribuciones exponenciales en el riesgo se parte del estudio gráfico de cada uno de los términos que componen la función coste en función de periodo. En la sección 4.4. se presentó la expresión de la función coste:

$$C(T) = \frac{B(T) \cdot C_p + C_{CM} [N(T) - B(T)] + C_i}{T + d_i} \quad [4.33]$$

que particularizando para el caso Exponencial-Exponencial y con la manipulación algebraica ya expuesta en dicho capítulo se convierte en:

$$C(T) = \frac{\lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta} + T \right] \cdot C_b}{T} - \frac{\lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta} \right] \cdot C_{CM}}{T} + \frac{C_i}{T} \quad [4.34]$$

- Se observa que para el término de los costes penalizables es una exponencial que tiende al valor máximo de $\lambda \cdot C_b$:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \left[\lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta \cdot T} + 1 \right] \cdot C_b \right] = \lambda \cdot C_b \quad [4.35]$$

- El término de los costes de correctivo tiende a cero:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \left[\lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta \cdot T} \right] \cdot C_{CM} \right] = 0 \quad [4.36]$$

- El término de los costes de inspección es una hipérbola que tiende a cero:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{C_i}{T} \right] = 0 \quad [4.37]$$

Estas tendencias pueden observarse en el siguiente gráfico en el que se representan tanto la función coste como la influencia de cada uno de sus términos:

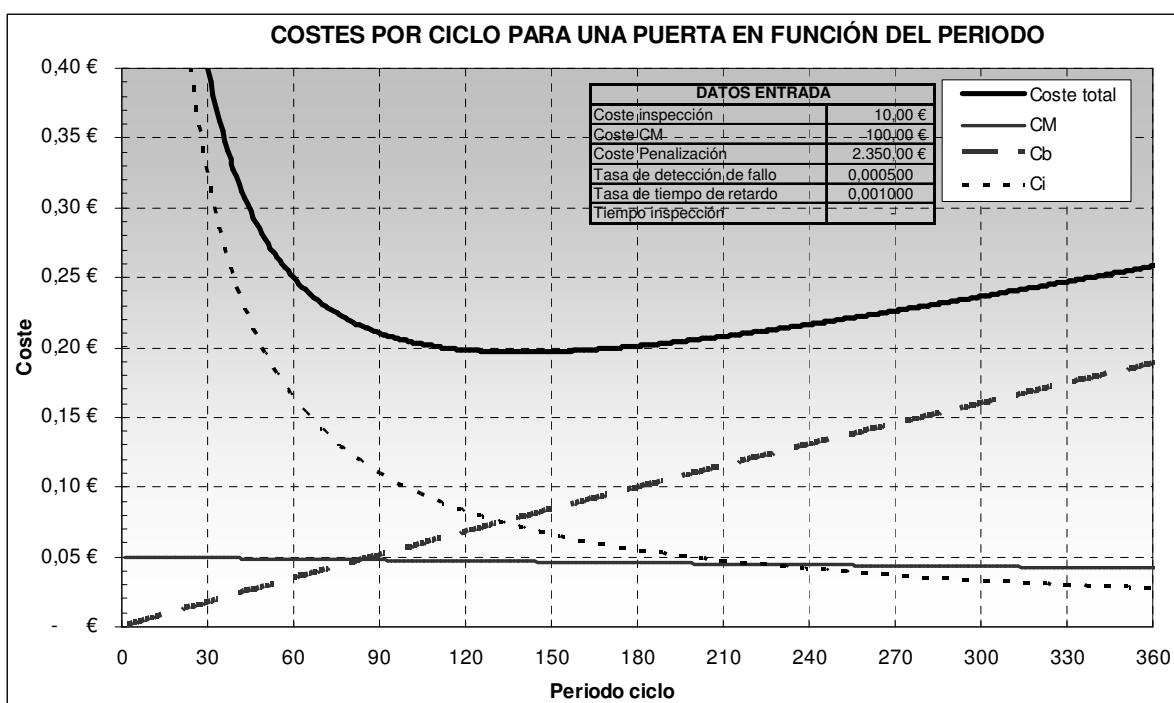


Figura 4.26.: Costes por ciclo para una puerta en función del periodo. Fuente: Elaboración propia

En este capítulo se está estudiando la forma de la función coste, y en particular, su apuntamiento como medida del riesgo. El uso de exponentiales condiciona la forma de cada uno de los términos que componen la función coste, que a su vez varía en función del periodo. Así, durante la investigación se ha observado que las soluciones de casos cuyo coste mínimo se da para un periodo bajo son más susceptibles de presentar un alto apuntamiento que las soluciones cuyo óptimo se da para un periodo alto.

Para estudiar este efecto se procede a llevar a cabo un estudio gráfico representando familias de curvas por medio de la librería Simpy de Phyton. Inicialmente se resuelven, para una tasa de fallo dada, las soluciones posibles para un periodo y una familia de tiempos de retardo, forzando la tasa de fallo para que la curva a estudiar presente siempre el periodo óptimo en el tiempo elegido. Se opta por estudiar la influencia del tiempo de retardo dejando fija la tasa de fallo por ser precisamente este tiempo de retardo la variable que mayor incertidumbre aporta al modelo, siendo la tasa de fallo un valor frecuentemente conocido en los casos de ingeniería ferroviaria.

Puesto que solo se quiere estudiar el apuntamiento o riesgo de la función y no sus valores absolutos de coste, se fuerzan todos los mínimos de la función a un mismo valor de coste, obteniéndose la siguiente gráfica de coste para un periodo de inspección de un día:

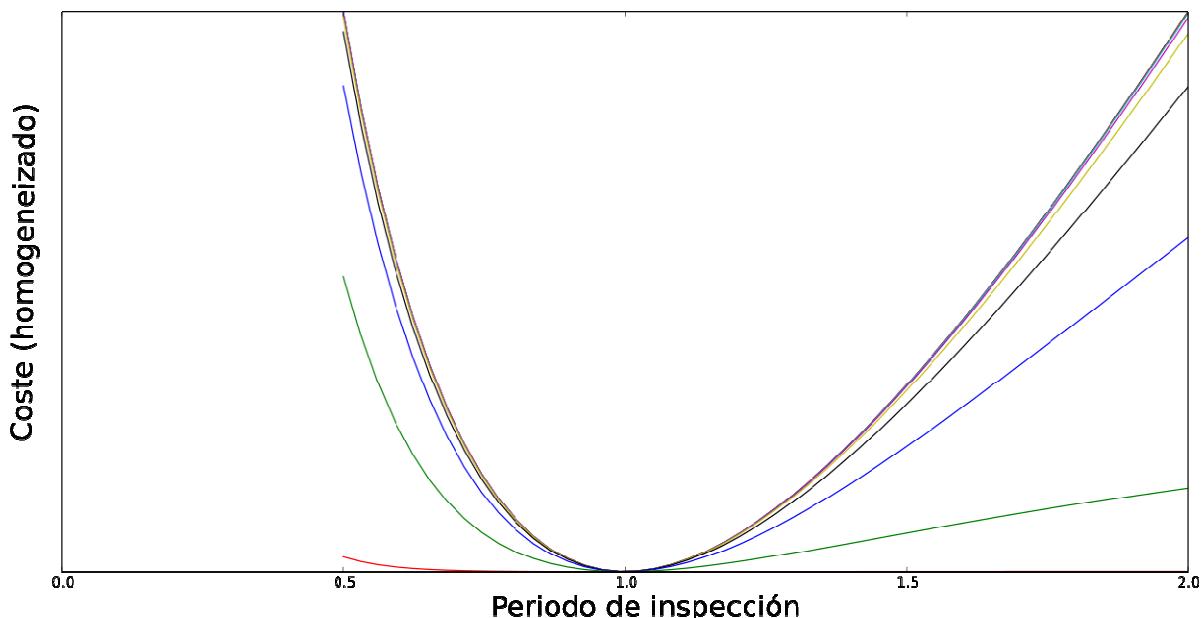


Figura 4.27.: Funciones de coste en función del periodo para un mismo periodo de $T=1$ día, idéntica tasa de fallo y tasa de tiempo de retardo variable. Curvas llevadas al mismo punto de abscisas para estudiar la forma
Fuente: Elaboración propia

Al variar solo el tiempo de retardo se observa una tendencia similar a la expuesta en la sección anterior en los dos parámetros de forma:

- Un tiempo de retardo menor (una mayor beta) implica mayor riesgo o apuntamiento. La variación del tiempo de retardo modifica la curva desde un mínimo apuntamiento (curva prácticamente plana) hasta un apuntamiento máximo, del que no es posible pasar por más que se

aumente beta. Este es el punto en el que se cumple que la tasa de tiempo de retardo es igual a la tasa corregida de fallo:

$$\beta = \Lambda, \quad \text{siendo} \quad \Lambda = \lambda \cdot \frac{(C_b - C_{CM})}{C_i} = \lambda \cdot K \quad [4.38]$$

Este fenómeno es fácilmente observable en el ábaco del Método Gráfico General reproducido a continuación.

de retardo

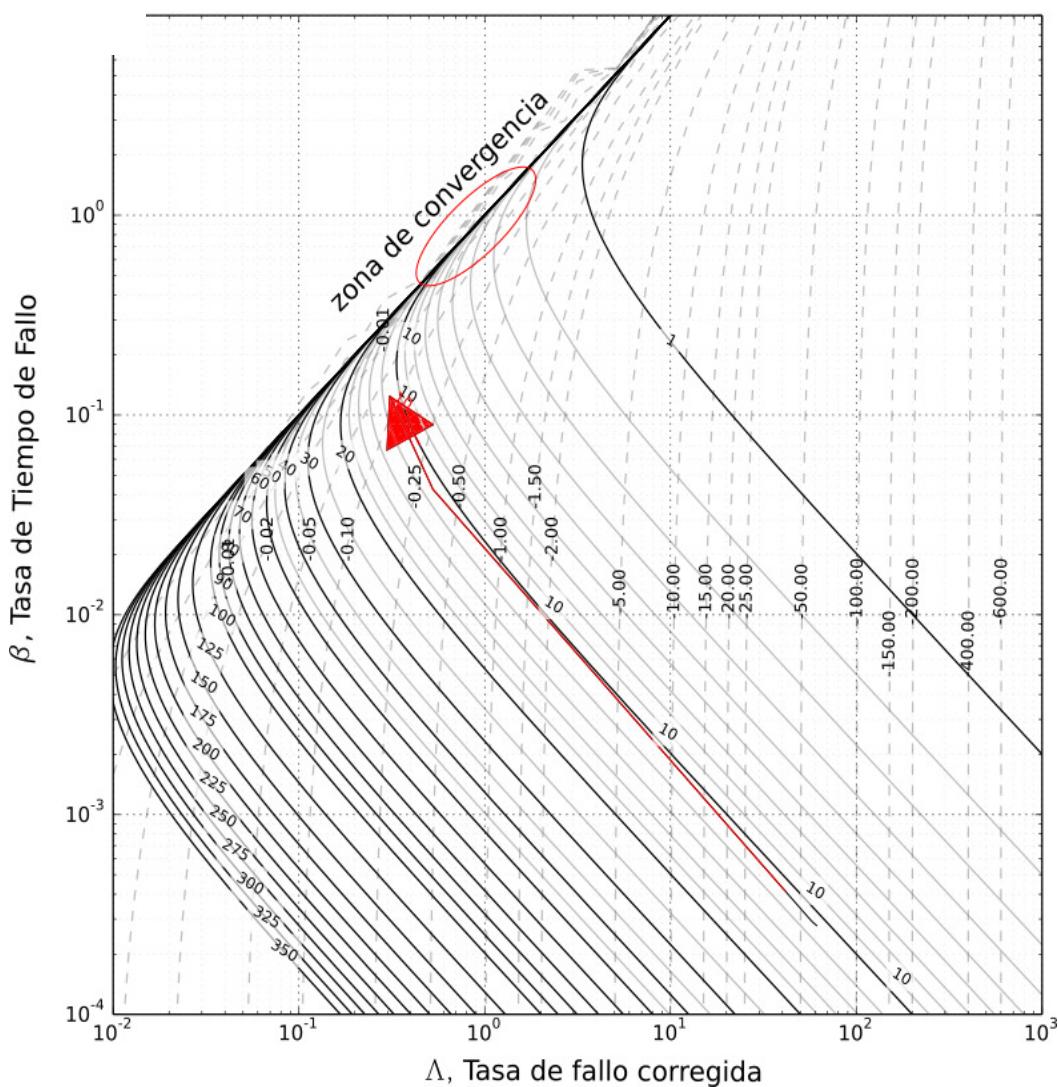


Figura 4.28.: Movimiento por una línea de periodo constante de 10 días, en dirección a menor tasa de tiempo de retorno, hasta la asíntota. Fuente: Elaboración propia

Si en este ábaco se estudia una línea de isovalores de periodo de inspección, digamos $T=10$, se concluye que el aumentar β obliga a avanzar en la línea de isovalores $T=10$ hacia zonas de tasa corregida de fallo menores, hasta que se llega a la zona de convergencia, más allá de la cual no existen valores de la función bajo estudio.

- Respecto al segundo parámetro de forma, la asimetría, se observa que para cualquier tiempo de retardo existe cierta asimetría, siendo las pendientes de cada punto más elevadas para periodos menores que el óptimo que para periodos superiores al óptimo.

Para estudiar la variación del apuntamiento con el periodo, se procede a reproducir esta misma figura para varios periodos. El proceso para cada periodo es idéntico al seguido para reproducir la figura anterior:

- Se parte de unos valores fijos de coste de inspección, penalización y correctivo.
- Se representan las familias de funciones coste de idéntico periodo de inspección óptimo ($T=10$ día, 20 días y 50 días) para un conjunto de tiempos de retardo.
- Se fuerza que el algoritmo halle la tasa de fallo correspondiente para cada tupla de datos.
- Dado que para cada tiempo óptimo los valores de coste mínimo varían al variar el tiempo de retardo, se homogeneiza la escala de costes, llevando todas las gráficas a un cero común y seleccionando la escala apropiada en ordenadas que facilite distinguir apuntamiento y asimetría. En caso de no llevar al mismo cero de coste y no ajustar la escala, la familia de curvas resultaría confusa, tal y como se observa en la siguiente gráfica:

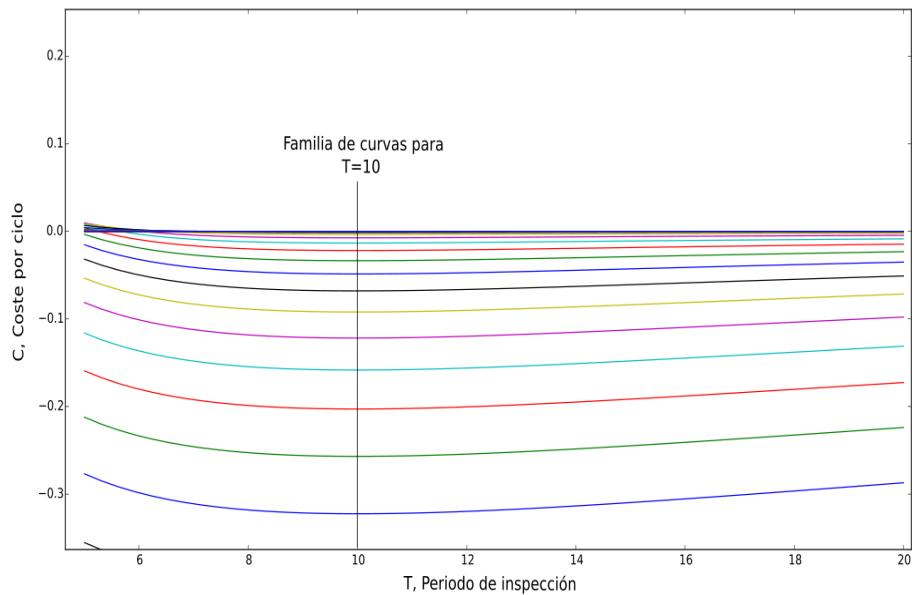


Figura 4.29.: Familia de curvas de coste en función del período antes de homogeneizar la escala de costes (abscisas). Fuente: Elaboración propia

Con esto, se consigue la siguiente representación gráfica de las posibles funciones coste para diferentes períodos óptimos en función de los tiempos de retardo:

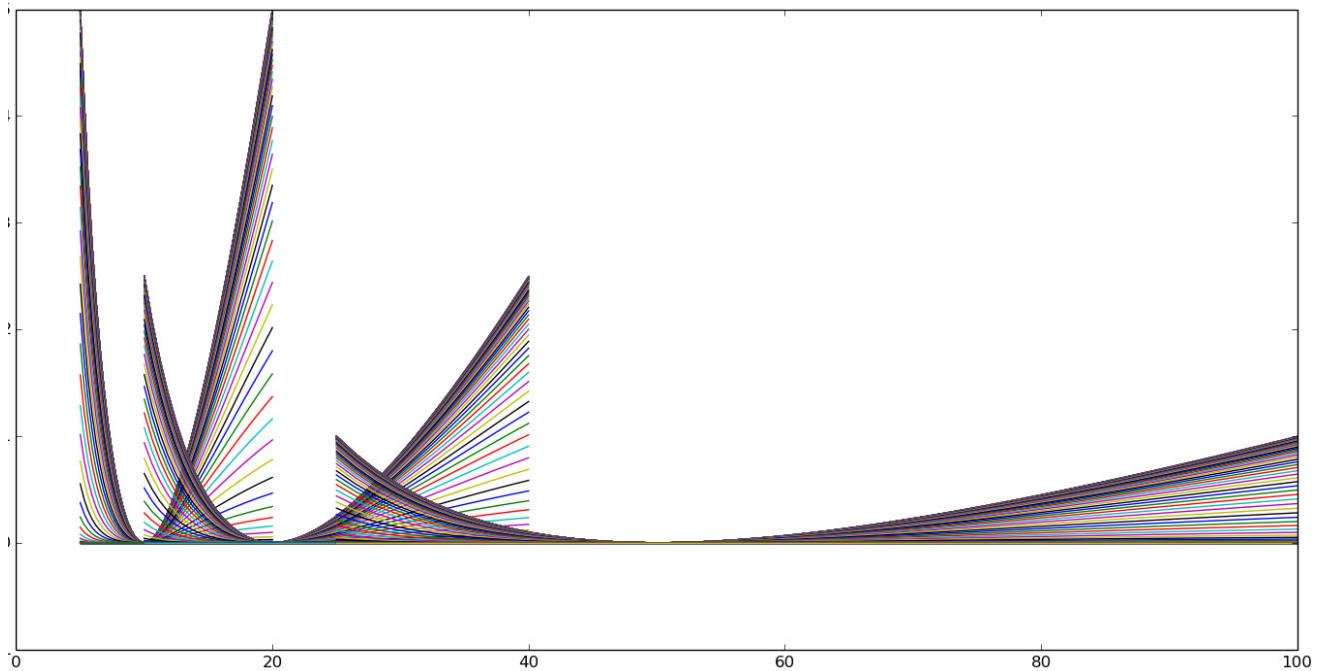


Figura 4.30.: Familias de curvas de coste para períodos $T=10$, $T=20$ y $T=50$; Escala de costes (abscisas) homogeneizada y tiempo de retardo variable. Fuente: Elaboración propia

El estudio de esta gráfica arroja dos conclusiones sobre la influencia del uso de distribuciones exponenciales en la forma de la función coste:

- Se da cierta asimetría en la función coste, existiendo mayor riesgo de incrementar el coste cuando se opta por mayor frecuencia de inspección que la óptima que cuando se relaja el periodo de inspección. Esta asimetría disminuye a medida que los tiempos de retardo disminuyen.
- Como se quería demostrar, se dan valores de apuntamiento máximo superiores a medida que el periodo de inspección disminuye. Este comportamiento se debe al uso de distribuciones exponenciales para modelar tanto el tiempo de retardo como la tasa de fallo. Por tanto, según el Modelo de Tiempo de Retardo (Christer 1985) con distribuciones exponenciales arroja soluciones de riesgo decreciente a medida que el periodo óptimo crece. Este fenómeno conlleva que los casos cuyas soluciones implican periodos de inspección elevados tendrán un riesgo intrínseco bajo. Así, un ingeniero de mantenimiento observará que en caso de periodo de inspección óptimo elevado, la variación del mismo en la práctica no arrojará incrementos de coste elevados. El estudio de este comportamiento se desarrolla en la siguiente sección.

4.4.7.3. Uso del Método Gráfico General para predecir el riesgo

En este capítulo se ha desarrollado un Método Gráfico General que permite, de modo inmediato, obtener el periodo de inspección para coste óptimo. Sin embargo, y aunque a continuación se ha estudiado la forma de función coste y la influencia en dicha forma de cada una de las variables del problema, el Método Gráfico General desarrollado no permite estimar el riesgo asociado al punto óptimo. Por tanto, sería deseable completar el método gráfico para que además de calcular el periodo y coste óptimo diese una idea del apuntamiento o riesgo de la solución.

Para representar sobre el mismo ábaco del Método Gráfico General el apuntamiento para todo punto del dominio bajo estudio, se propone el siguiente método:

- En primer lugar se divide el estudio en apuntamiento para menor periodo de inspección (mayor frecuencia) y para mayor periodo (menor frecuencia). Se sigue idéntica metodología para obtener las gráficas correspondientes a los dos caos.
- Para cada dupla (Λ, β) se calcula el ahorro máximo y su correspondiente periodo óptimo utilizando el ábaco del Método Gráfico General.

- Sabiendo el periodo óptimo, se vuelve a calcular el ahorro, esta vez para un periodo de mitad valor, es decir, con una frecuencia de inspecciones del doble.
- Este nuevo punto tiene un coste mayor (un ahorro menor) por no ser el óptimo. Se calcula el cociente entre el nuevo ahorro obtenido y el ahorro óptimo, calculando así un factor que representa la pérdida del ahorro.

A continuación se calcula este factor de pérdida de ahorro para todos los puntos del dominio, representándose el campo de valores sobre el mismo ábaco. El resultado es la siguiente gráfica:

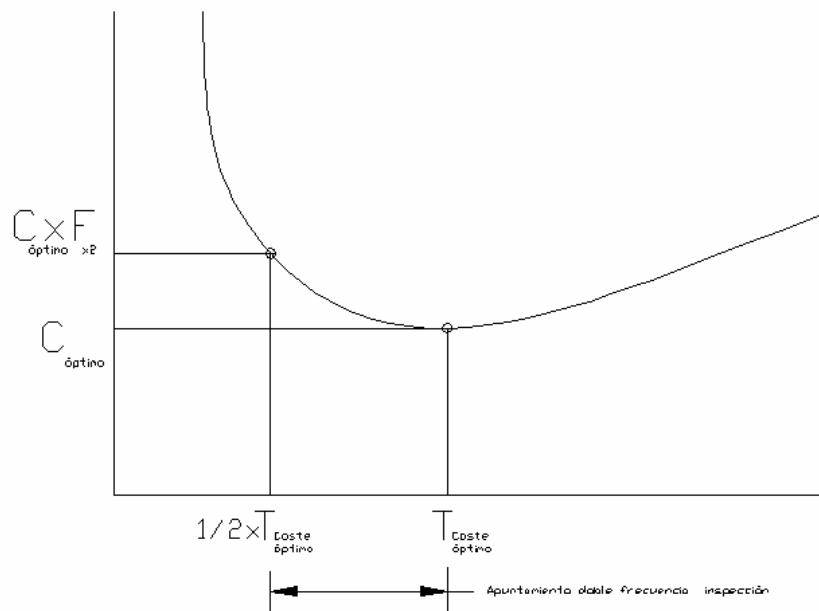


Figura 4.31.: Gráfica de Coste en función del periodo indicando los parámetros grafados para estudiar la variación del apuntamiento en todo el dominio. Fuente: Elaboración propia

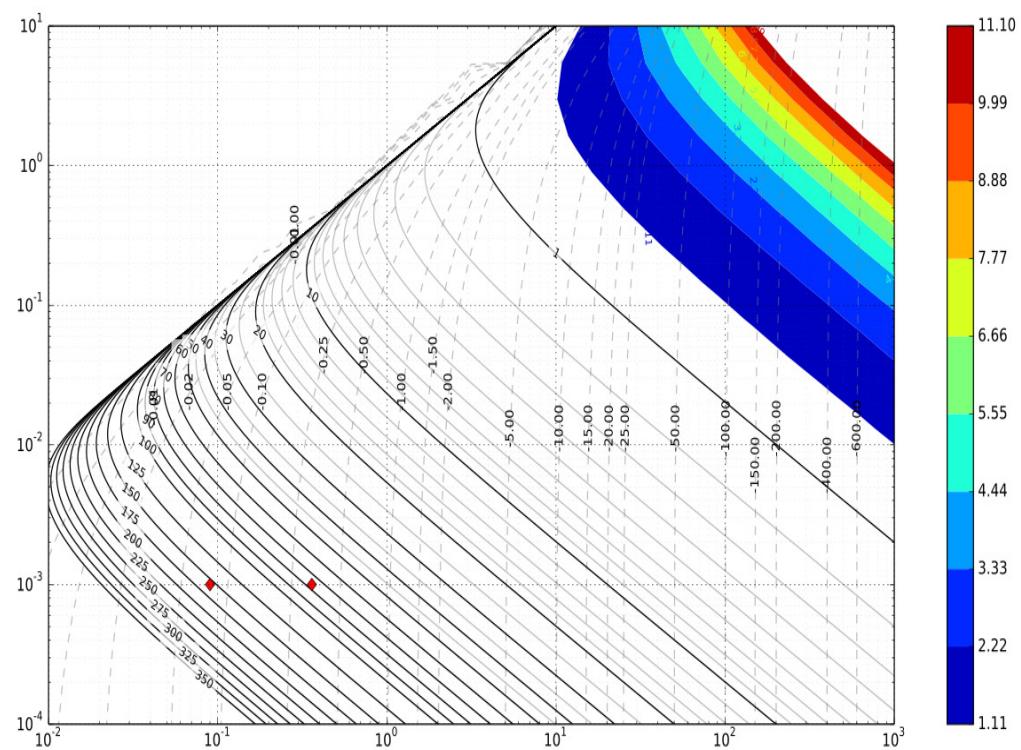


Figura 4.32.: Gráfica de periodo óptimo y ahorro máximo, indicando el gradiente del factor de pérdida de ahorro al duplicar frecuencia de inspección. Fuente: Elaboración propia

- Para cada dupla (Δ, β) se calcula el ahorro máximo y su correspondiente periodo óptimo utilizando el ábaco del Método Gráfico General.
- Sabiendo el periodo óptimo, se vuelve a calcular el ahorro, esta vez para un periodo de doble valor, es decir, con una frecuencia de inspecciones de la mitad.
- Este nuevo punto tiene un coste mayor (un ahorro menor) por no ser el óptimo. Se calcula el cociente entre el nuevo ahorro obtenido y el ahorro óptimo, calculando así un factor que representa la pérdida del ahorro.

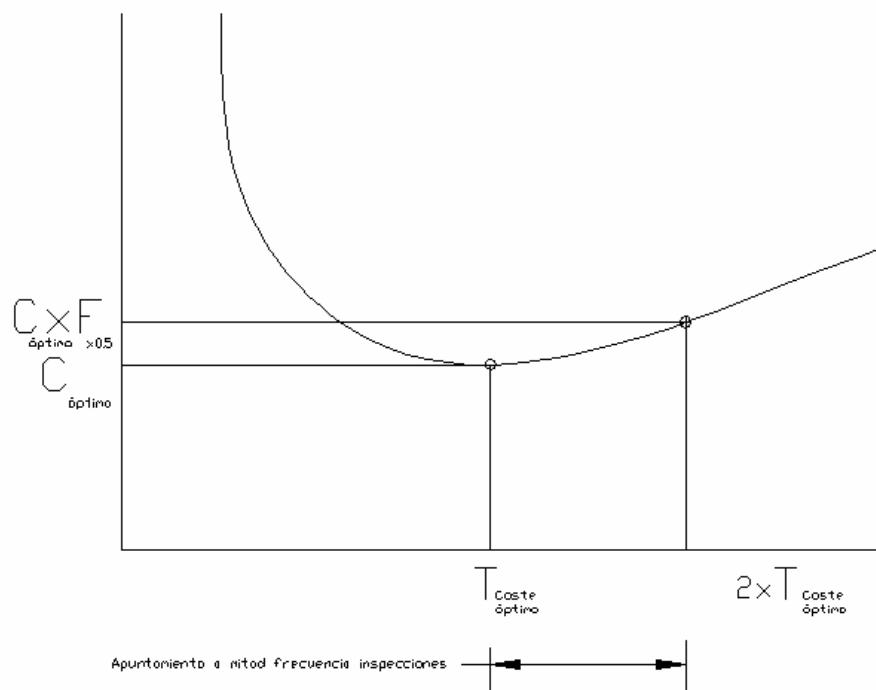


Figura 4.33.: Gráfica de Coste en función del periodo indicando los parámetros grafados para estudiar la variación del apuntamiento en todo el dominio. Fuente: Elaboración propia

- A continuación se calcula este factor de pérdida de ahorro para todos los puntos del dominio, representándose el campo de valores sobre el mismo ábaco. El resultado es la siguiente gráfica:

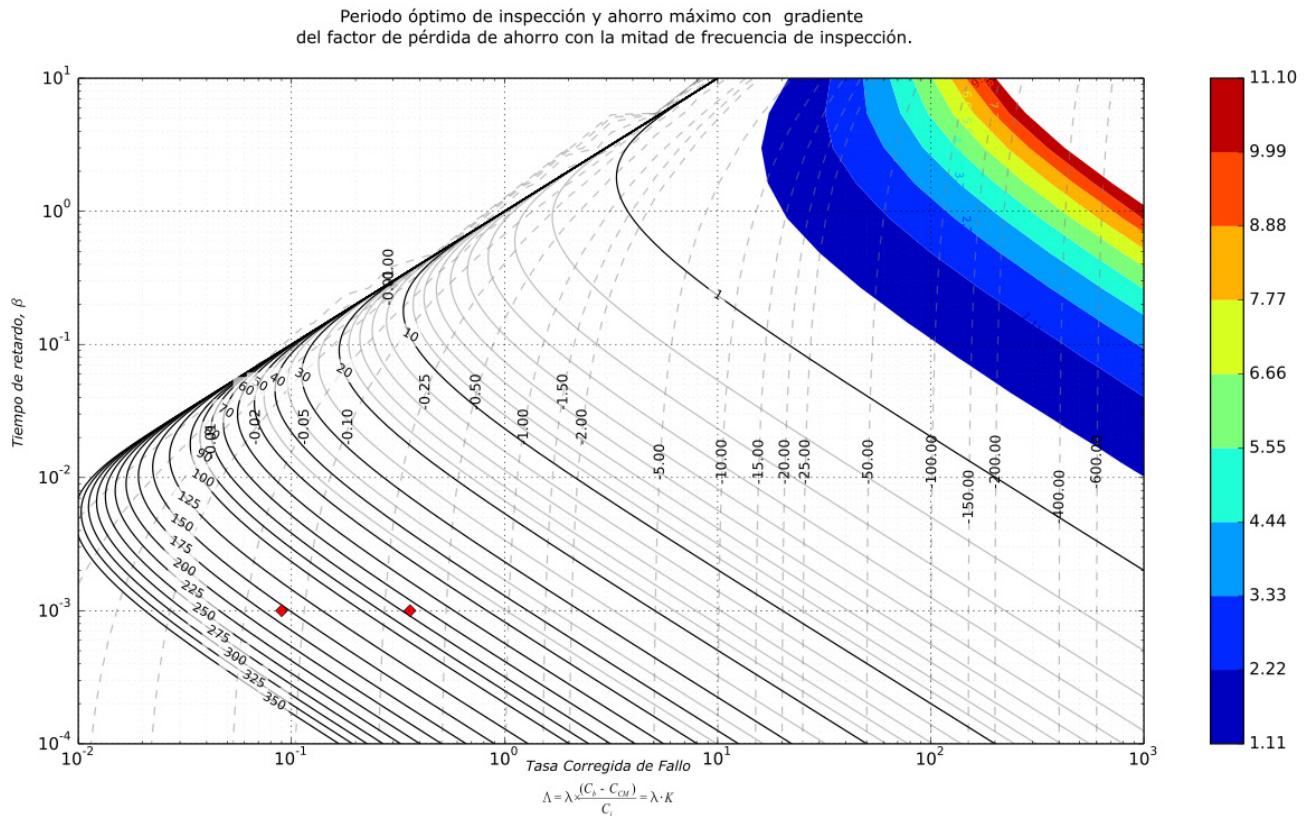


Figura 4.34.: Gráfica de periodo óptimo y ahorro máximo, indicando el gradiente del factor de pérdida de ahorro al efectuar la mitad de inspecciones. Fuente: Elaboración propia

En esta gráfica se observa la tendencia ya adelantada de modo cualitativo en la sección anterior, de que existe mayor apuntamiento a medida que el periodo disminuye. El ábaco muestra el campo del factor de pérdida de ahorro al duplicar la frecuencia de inspección. Por ejemplo, para una dupla $(L,b) = (102,1)$ el factor de pérdida de ahorro obtenido es de aproximadamente 3. Esto significa que si se dobla la frecuencia de inspección el coste será tres veces superior al óptimo.

Para entender el apuntamiento para mayor periodo de inspección se procede de igual manera.

Los campos de valores de factor de pérdida de ahorro son presentan un comportamiento similar en ambos casos. Sin embargo se aprecia cómo el gradiente del factor es mayor en el caso de mayor frecuencia de inspecciones, tal y como se justificó en la sección anterior.

Estas dos gráficas completan el Método Gráfico General, objetivo enunciado al inicio de esta sección. El ábaco del Método Gráfico General permite la resolución gráfica del coste y periodo óptimo de una política de inspección mediante el Modelo de Tiempo de Retardo. Los campos de valores de factor de ahorro

completan esta solución, aportando al Ingeniero de Mantenimiento la evaluación del riesgo que conlleva apartarse del periodo óptimo de inspección hallado.

4.4.8. Categorización en función de riesgo y coste

Conociendo el coste mínimo de un elemento y la forma de su curva de coste en función del periodo de inspección $C(T)=f(T)$, se pueden categorizar los elementos en función de su coste y riesgo.

El análisis descrito a continuación se lleva a cabo con la curva de coste por ciclo. Sin embargo, a la vista de la linealidad del cálculo, sería equivalente si se refiriese a coste anual o Coste de Ciclo de Vida (LCC), siempre y cuando todos los elementos se computaran sobre la misma base.

- Respecto a la clasificación según el importe del coste mínimo, existirán elementos que por su naturaleza presentarán un coste por ciclo mayor o menor. Gráficamente las curvas se desplazan en el eje vertical, expresando un mayor coste cuanto más alejadas del origen se encuentre ese mínimo.

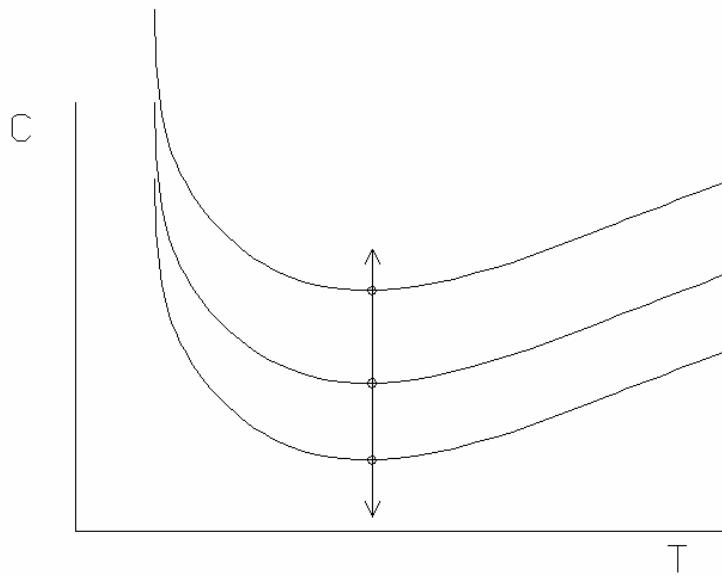


Figura 4.35.: Funciones Coste en función del Periodo T con idéntico periodo óptimo y apuntamiento pero diferentes valores de coste óptimo. Fuente: Elaboración propia

- Respecto al riesgo, como se ha desarrollado en la sección anterior, se puede asimilar al apuntamiento de la función: cuanto más apuntada sea la función más riesgo existe de que un error en el periodo óptimo de inspección conlleve una gran desviación del coste óptimo.

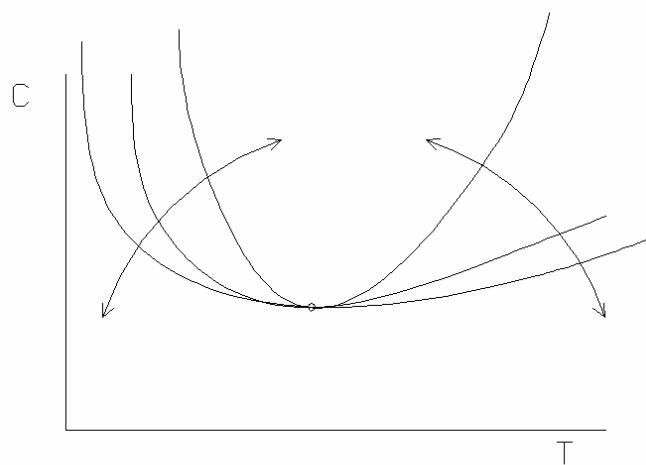


Figura 4.36.: Funciones Coste en función del Periodo T con idéntico coste y periodo óptimo y diferentes valores de apuntamiento. Fuente: Elaboración propia

Asignando a cada elemento estudiado un valor de coste (el coste óptimo) y un valor para el riesgo (la media de las pendientes alrededor del óptimo), se pueden categorizar los elementos, ordenándolos visualmente en un mapa perceptual en el que se represente cada valor en función de su coste y riesgo:

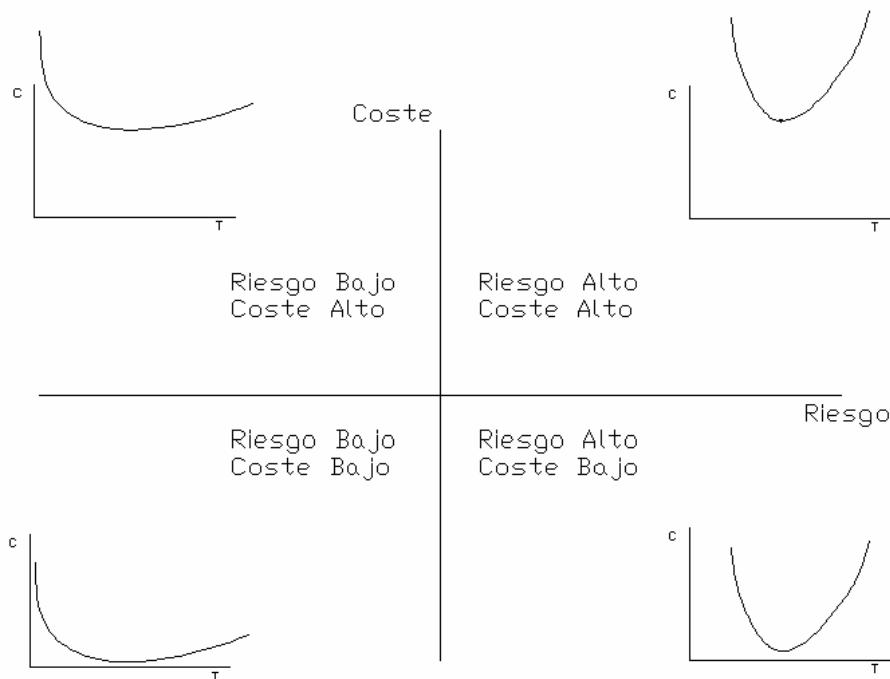


Figura 4.37.: Clasificación gráfica cualitativa en función de riesgo y coste. Fuente: Elaboración propia

Con esta categorización el mantenedor puede determinar visualmente cuales son los equipos o sistemas que requieren mayor atención a la hora de asignar los recursos disponibles a cada uno. La categorización aporta un criterio claro para por ejemplo, investigar la tasa de fallo mediante nuevos ensayos acelerados de vida o refinar la estimación de la tasa de tiempo de retardo mediante campañas de muestreo más intensas

El método presentado presenta una categorización en base a una clasificación cualitativa, dejando para futuras investigaciones el desarrollo de un método cuantitativo de categorización.

4.8. Desarrollo del Método Gráfico Simplificado

4.8.1. Motivación

Durante el estudio de los diferentes casos de aplicación del Método de Tiempo de Retardo disponibles en la bibliografía existente, se observó que diferentes autores utilizaban una tasa de tiempo de retardo idéntica a la tasa de fallo. Esta simplificación suele llevarse a cabo porque la tasa de fallo es un parámetro que, al contrario de la tasa de tiempo de retardo, frecuentemente se puede calcular en base a históricos de mantenimiento tradicionales o incluso es aportada por un tercero (fabricante del equipo, mantenedor, etc...).

Para poder analizar esta tipología de casos se decide desarrollar un método gráfico más sencillo, quedando reducidas de cinco ($C_b, C_i, C_{CM}, \lambda, \beta$) a cuatro las variables del problema.

4.8.2. Nomograma del Método Grafico Simplificado

Para desarrollar el nomograma bajo la hipótesis de igualdad entre tasa de tiempo de retardo y tasa de fallo, basta con sustituir esta condición ($\lambda = \beta$) en la ecuación de optimización presentada en el punto 4.4.4:

$$\frac{\partial A(T)}{\partial T} = 0 \Rightarrow \frac{\Lambda \cdot e^{-\beta}}{\beta \cdot T} - \Lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta \cdot T^2} \right] - \frac{1}{T^2} = 0 \quad [4.39]$$

sustituyendo $\lambda = \beta$ se obtiene:

$$\begin{aligned} \frac{K \cdot \lambda \cdot e^{-\beta}}{\beta \cdot T} - K \cdot \lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta \cdot T^2} \right] - \frac{1}{T^2} &= \frac{K \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda}}{\lambda \cdot T} - K \cdot \lambda \cdot \left[\frac{e^{-\lambda T} - 1}{\lambda \cdot T^2} \right] - \frac{1}{T^2} = 0 \\ \frac{K \cdot e^{-\lambda}}{T} - K \cdot \left[\frac{e^{-\lambda T} - 1}{T^2} \right] - \frac{1}{T^2} &= 0 \end{aligned} \quad [4.40]$$

A continuación se procede a grafiar la solución, representando el periodo óptimo en función del ratio de coste K y la tasa de fallo λ . Recordar que el ratio de coste K es la relación entre los diferentes costes implicados en la formulación:

$$\frac{C_b > C_{CM} > C_i}{C_b > C_{CM} + C_i} \Rightarrow K = \frac{(C_b - C_{CM})}{C_i} > 1 \quad [4.41]$$

El nomograma resultante grafiado utilizando la librería Phyton Matplotlib se presenta a continuación.

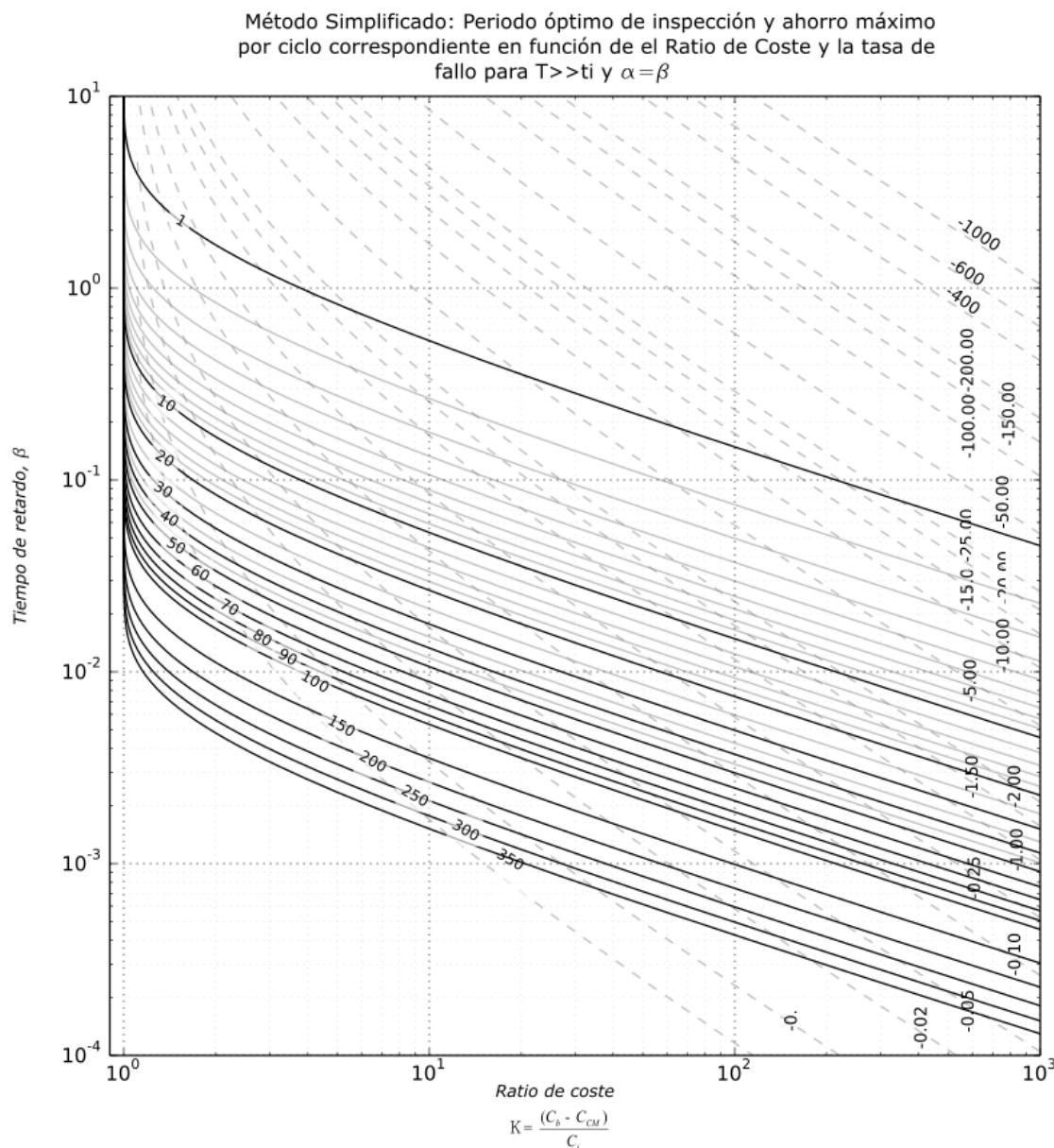


Figura 4.38.: Nomograma del Método Simplificado. Fuente: Elaboración propia

La belleza del Método Simplificado radica en la utilización de variables comunes y sencillas de estimar en cualquier explotación, como son los costes unitarios y la tasa de fallo, para determinar el periodo óptimo.

Sin embargo, como quedará demostrado en el Capítulo 5, el tomar una tasa del tiempo de retardo igual a la tasa de fallo es una simplificación que, aunque utilizada en diversas publicaciones con objeto de profundizar en otros aspectos del modelo, resulta poco útil en la resolución de casos prácticos reales. Esto se debe a que la tasa de tiempo de retardo es una variable cuya correlación con la tasa de fallo es inexistente en la mayoría de los casos, y cuya variación compromete el resultado final (periodo de inspección óptimo) en gran medida.

Capítulo 5

VALIDACIÓN DEL MÉTODO GRÁFICO DE OPTIMIZACIÓN Y APLICACIÓN A UN CASO PRÁCTICO DE MANTENIMIENTO DE FLOTAS FERROVIARIAS

RESUMEN: Este capítulo presenta inicialmente la validación del método gráfico por medio de su aplicación a casos prácticos del Método de Tiempo de Retardo ya resueltos por métodos analíticos, para a continuación demostrar su utilidad en un caso de mantenimiento de flotas ferroviarias. Para ello, y en primer lugar, se aplica tanto el Método Gráfico General como el Método Gráfico Simplificado, ambos desarrollados en esta tesis, a varios casos prácticos resueltos por terceros por métodos analíticos.. A continuación, una vez demostrada la validez del método, se procede a su aplicación a un caso práctico de mantenimiento de flotas ferroviarias, haciendo hincapié en su utilidad para la optimización económica del mantenimiento de flotas, y en particular en el enfoque de Costes de Ciclo de Vida "LCC". En la aplicación del caso práctico de flotas ferroviarias se comienza analizando el contexto desde el punto de vista del mantenedor, estimando los costes por medio de una herramienta informática adaptada a la aplicación. A continuación se resuelve el caso analíticamente y se comprueban los resultados obtenidos aplicando tanto el Método Gráfico General como por el Método Gráfico Simplificado, concluyendo los rangos de aplicación de cada hipótesis aplicada así como la utilidad de los modelos. Finalmente se introduce la adaptación de una herramienta informática de gestión de costes, que se ha adaptado para incorporar el modelo desarrollado.

5.1. VALIDACIÓN DEL MÉTODO GRÁFICO MEDIANTE RESOLUCIÓN DE CASOS PRÁCTICOS RESUELTOS ANÁLITICAMENTE⁵

1.1. Metodología

Para validar el método gráfico se van a utilizar datos de casos reales de aplicación del Método de Tiempo de Retardo (DTM). Se tomarán casos reales de artículos publicados en revistas indexadas, asegurando así la validez tanto de los datos estadísticos de entrada (tasa de fallo, tiempo de retardo...) como de las soluciones obtenidas.

En general, un porcentaje elevado de los artículos publicados sobre el Modelo de Tiempo de Retardo (Delay Time Model) versan o bien sobre diferentes variaciones matemáticas del mismo (inspecciones imperfectas, correctivo demorado...) o bien sobre diferentes métodos de ajuste de los parámetros del modelo. Existe por tanto cierta brecha entre el progreso puramente matemático del método y su popularización o aplicación a casos prácticos. El método gráfico expuesto en esta tesis pretende acercar el modelo científico a las aplicaciones del campo de la ingeniería, con énfasis en el mantenimiento ferroviario en particular.

En este capítulo se comprueba la validez del método gráfico desarrollado resolviendo gráficamente casos prácticos ya resueltos de modo analítico. Los casos seleccionados han sido publicados en revistas indexadas de reconocido prestigio. Cada ejemplo se resuelve gráficamente utilizando el método gráfico, comparando los resultados con los obtenidos por los diferentes autores. Cada caso aporta singularidades útiles tanto para la verificación del método gráfico, como para futuras aplicaciones del mismo.

El procedimiento de validación aplicado en cada caso es el siguiente:

1. Inicialmente se presenta el caso práctico, presentando tanto al autor como la casuística descrita en el artículo, pasando a continuación a detallar los datos de entrada del modelo y el resultado de coste y periodo óptimo obtenido.
2. A continuación se resuelve el analíticamente el problema con los datos de entrada propuestos en artículo, comprobando que la solución obtenida por métodos propios coincide con la publicada por el autor del caso.
3. Dado que el método gráfico desarrollado es válido para periodos sensiblemente más grandes que el tiempo de inspección ($T >> t_i$), se repite el cálculo analítico para $t_i=0$. Los resultados así obtenidos (coste y periodo óptimos) son los que se obtendrán aplicando el método gráfico.

4. Se lleva a cabo un análisis de sensibilidad de los resultados para varios valores de t_i , para entender así la severidad de la restricción $T \gg t_i$ impuesta por el método gráfico.
5. A continuación se lleva a cabo la resolución utilizando el método gráfico general, concluyendo idénticos resultados.
6. Una vez comprobados los resultados para este caso, se lleva a cabo un análisis de sensibilidad mediante interpolación visual. Esta es sin duda una de las grandes ventajas del método, pues permite al usuario entender el error en la solución final si cualquiera de los datos de entrada no fuese correcto.
7. En el caso de que el autor haya considerado el tiempo de retardo igual a la tasa de fallo, se comprueba con el método gráfico simplificado.
8. Finalmente se resumen las conclusiones obtenidas en cada caso.

Los casos resueltos en particular son los expuestos en los siguientes artículos:

- ZAJĄC, PAWEŁ. Use of delay-time concept in modelling process of technical and logistics systems maintenance performance. Case study zastosowanie koncepcji opóźnień czasowych w procesie modelowania utrzymania w stanie zdolności systemów technicznych i logistycznych. Studium przypadku. Eksploatacja i niezawodność, 2015, vol. 17, no 2, p. 174.
- BAKER, R. D.; SCARF, P. A. Can models fitted to small data samples lead to maintenance policies with near-optimum cost?. IMA Journal of Mathematics applied in Business and Industry, 1995, vol. 6, no 1, p. 3-12.

5.1.2. Caso de mantenimiento de flota de carretillas

1. Presentación del caso práctico

En este primer ejemplo se va a resolver el caso práctico presentado en el artículo WerbińskiA-WojciechoWskA s, ZAjac P. Use of delay-time concept in modelling process of technical and logistics systems maintenance performance. case study. eksploatacja i Niezawodnosc - Maintenance and reliability 2015; 17 (2): 174-185

La utilización de este artículo para validar el método gráfico resulta gran interés por varios motivos:

- Se trata de un artículo publicado en 2015, constituyendo una de las últimas publicaciones en el campo del Método de Tiempo de Retardo.
- Los autores utilizan distribuciones exponenciales tanto para modelar la tasa de detección de fallos como la tasa de tiempo de retardo.
- El campo de aplicación resulta afín al tratarse de una flota de vehículos. En particular, el artículo resuelve la optimización de ciclos de mantenimiento de una flota de carretillas que operan en la manutención de cargas transportadas por ferrocarril en una playa de vías.

El artículo utiliza el Modelo de Tiempo de Retardo para optimizar el modelo de mantenimiento de cierta flota de carretillas en operación en una fundición. Las carretillas llevan a cabo la manutención desde cada almacén al horno según el siguiente diagrama.

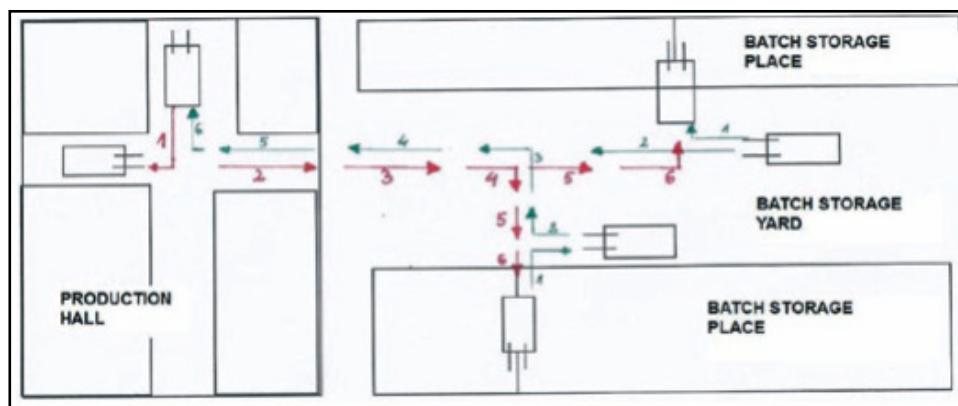


Figura 5.1.: Diagrama de rutinas de trabajo de las carretillas en la fundición. Fuente: Werbiński, 2015

Los autores llevaron a cabo un trabajo de campo en el recogiendo datos estadísticos y estudiaron modos de fallos y costes de cada operación para obtener así los datos de entrada del modelo. En particular, concluyen que para el caso práctico los datos son:

- Coste de cada inspección de 250 Zloty . Se utilizará a partir de ahora la abreviatura internacional del la moneda polaca - PLN - en vez de su denominación, Zloty.
- Coste de cada operación de mantenimiento correctivo de 1500 PLN
- Coste de cada operación de reparación en caso de fallo no detectado, 2500 PLN
- Tiempo de inspección de 2h.
- Tasa de fallo $\lambda = 0.017155$ fallos por hora y MTBF de 58.29 mth (horas de motor)
- Tasa de tiempo de retardo idéntica a la tasa de fallo $\beta = 0.01755$

En base a estos datos, los autores resuelven el modelo para coste mínimo obteniendo un periodo óptimo de 45 mth (horas de motor) y un coste mínimo de 35.60 PLN. A continuación se reproduce la solución gráfica presentada en el artículo.

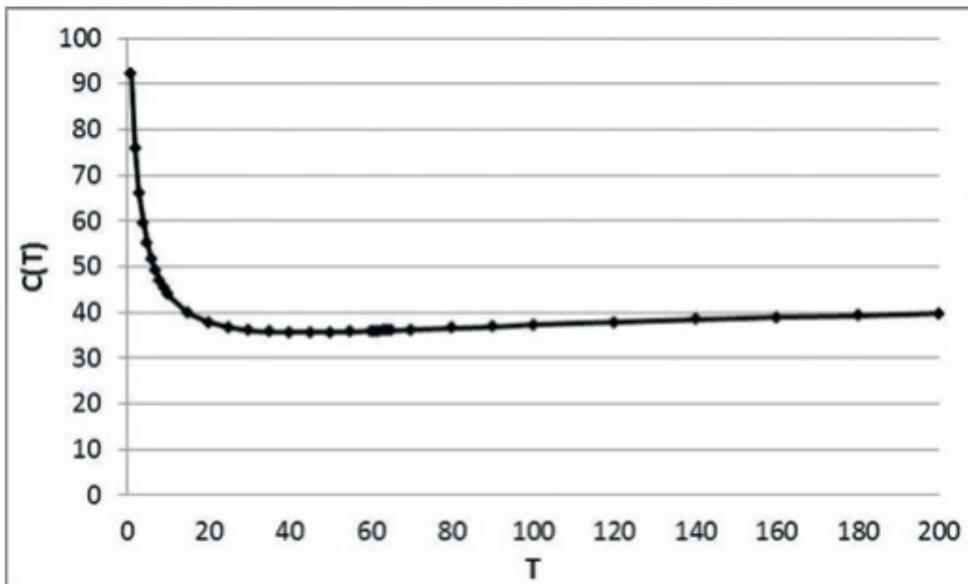


Figura 5.2.: Función coste en función del periodo de inspección. Fuente: Werbiński, 2015

2. Comprobación de la solución analíticamente

A la vista de los datos existentes, el primer paso para validar el método gráfico consiste en resolver, utilizando medios propios, el modelo con los datos de entrada utilizados en el caso práctico. En gráfico reproducido a continuación se representa el coste por ciclo en función del periodo para los datos del caso, obteniéndose una solución prácticamente idéntica a la expuesta en el artículo.

La gráfica representada muestra la curva del coste total de ciclo en función del periodo. Adicionalmente, aporta información visual sobre la variación de cada

uno de los componentes de coste en función de la variación del periodo. Así se ve la variación asintótica de los costes de inspección (C_i) si el periodo es muy bajo, el crecimiento de los costes debidos a defectos no detectados (C_b) si el periodo de inspección crece y el correspondiente decremento de los costes de reparación de fallos detectados (C_m) a medida que sube el periodo de inspección y por tanto se detectan menos fallos.

Los valores obtenidos son de un periodo óptimo de 45 mth (horas de motor) y un coste mínimo de 34.94 PLN.

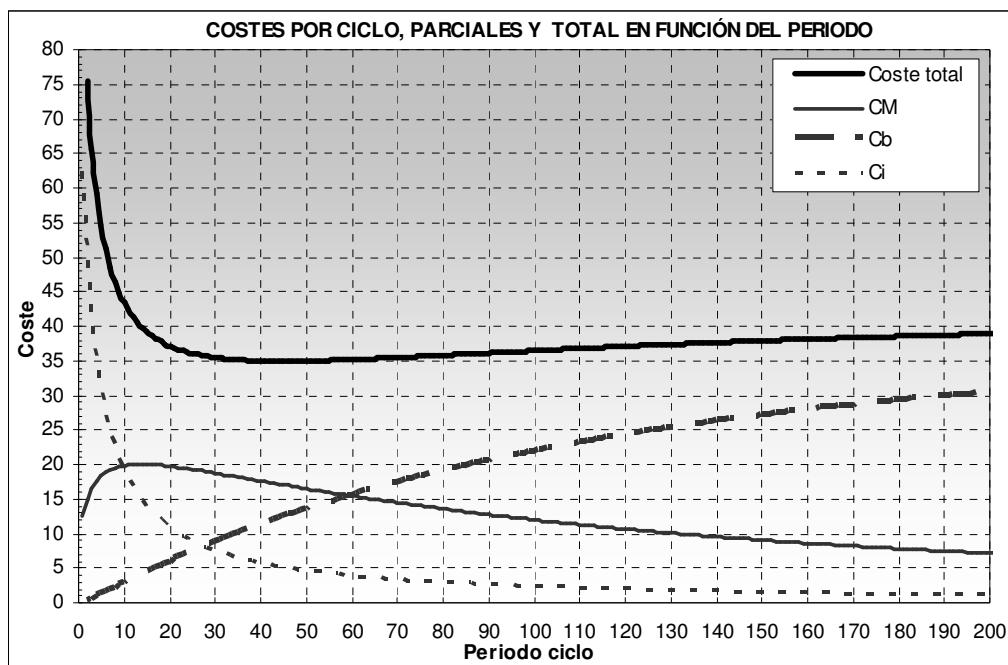


Figura 5.3.: Comprobación de la solución gráfica por medios analíticos . Fuente: Elaboración propia.

3. Resolución para $t_i=0$

A continuación, dado que en el método gráfico desarrollado se desprecia el valor del tiempo de inspección, se resuelve el caso utilizando los mismos valores que los propuestos en el artículo, pero utilizando un tiempo de inspección igual a cero.

Los valores obtenidos en este caso son de un periodo óptimo de 56 mth (horas de motor) y un coste mínimo de 36.33 PLN.

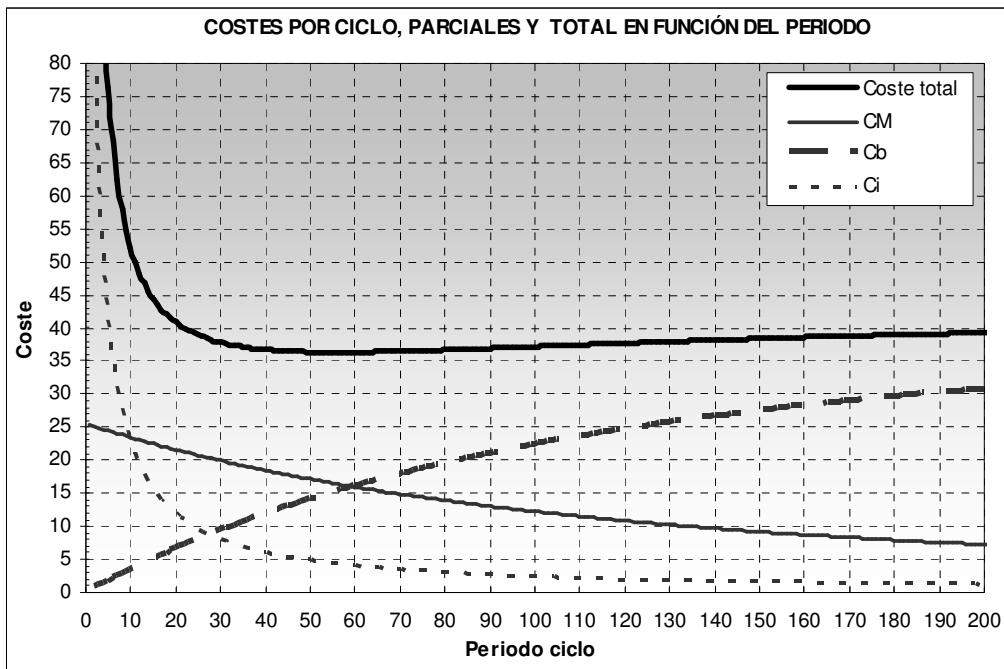


Figura 5.4.: Comprobación de la solución gráfica por medios analíticos con $t_i=0$. Fuente: Elaboración propia

4. Análisis de sensibilidad para $t_i \neq 0$

Este caso práctico en particular, en el que el tiempo de inspección es de un 4.45% del periodo óptimo, la variación de los resultados obtenidos al despreciar el tiempo de inspección son:

	Periodo óptimo	Coste mínimo
$t_i = 2 \text{ mth}$	45 mth	34.94 PLN
$t_i = 0 \text{ mth}$	56 mth	36.33 PLN.
Diferencia	11 mth	1.39 PNL
Variación en %	24.4%	3.97 %

Tabla 5.1.: Variación de periodo óptimo de inspección y coste resultante para $t_i= 0$ y $t_i= 2$.
Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que aunque la variación en periodo óptimo es sustancial (24.4%), el error cometido en el coste mínimo es un orden de magnitud menor (3.97%), válido en el contexto de esta tesis a la vista de la precisión del resto de parámetros (estimación de costes, cálculo variables estadísticas...).

Repetiendo el cálculo para un valor del tiempo de inspección de $t_i = 1 \text{ mth}$, que supone un 2% del periodo óptimo, se obtienen los siguientes resultados.

	<i>Periodo óptimo</i>	<i>Coste mínimo</i>
$t_i = 1 \text{ mth}$	50 mth	35.66 PLN
$t_i = 0 \text{ mth}$	56 mth	36.33 PLN.
Diferencia	6 mth	1.39 PNL
Variación en %	12%	1.87 %

Tabla 5.2.: Variación de periodo óptimo de inspección y coste resultante para $t_i= 0$ y $t_i= 1$.

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa la disminución lógica del error a medida que el tiempo de inspección disminuye frente al periodo óptimo. Así, cuando el tiempo de inspección es de aproximadamente un 2% del periodo óptimo ($t_i=1$, $T=50$), el error cometido es menor del 2% en coste.

En el marco de esta investigación, el método gráfico se ha desarrollado para optimizar las inspecciones de seguridad que se llevan a cabo en el mantenimiento ferroviario, en las que el tiempo de inspección es prácticamente despreciable frente al periodo de inspección.

5. Resolución utilizando el Método Gráfico General.

A continuación se procede a utilizar el método gráfico para resolver el problema del caso con los siguientes datos de entrada:

- Coste de cada inspección de 250 Zloty . Se utilizará a partir de ahora la abreviatura internacional del la moneda polaca - PLN - en vez de su denominación, Zloty.
- Coste de cada operación de mantenimiento correctivo de 1500 PLN
- Coste de cada operación de reparación en caso de fallo no detectado, 2500 PLN
- Por tanto, el Ratio de Coste será:

$$K = \frac{(C_b - C_{CM})}{C_i} = \frac{(2500 - 1500)}{250} = 4 \quad [5.1]$$

- Dado que la Tasa de fallo es de $\lambda = 0.01755$ fallos por hora, la tasa corregida de fallo será:

$$\Lambda = \lambda \cdot K = 0.017155 \cdot 4 = 0.0702 \quad [5.2]$$

- Tasa de tiempo de retardo idéntica a la tasa de fallo $\beta = 0.01755$
- Tiempo de inspección despreciable frente a periodo de inspección.
- El coste máximo es de:

$$C_{máx} = \lambda \cdot C_b = 0.017155 \cdot 2500 = 43.87 PLN \quad [5.3]$$

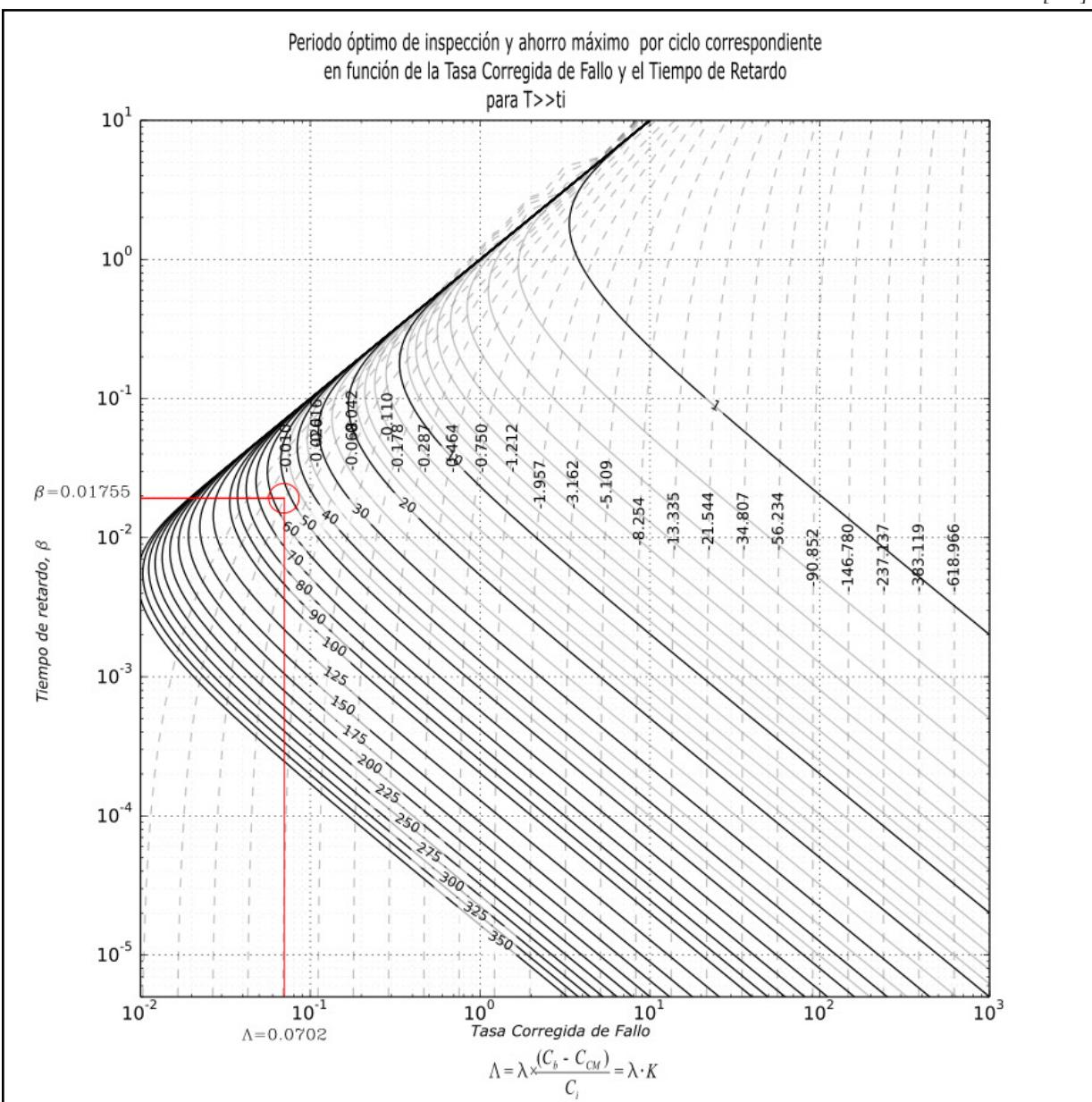
Entrando en el gráfico con la dupla $(\lambda, \beta) = (0.0702, 0.01755)$ e interpolando visualmente se obtienen unos valores aproximados de $T_{óptimo} = 56.035$ y el *Coeficiente de Ahorro* $\psi(T=56.035) = -0.02624$. Por tanto el ahorro queda:

$$A(T) = -C_i \cdot \psi = -250 \cdot (-0.02624) = 6.56 PLN$$

$$C_{máx} = \lambda \cdot C_p = 0.017155 \cdot 2500 = 42.89 PLN \quad [5.4]$$

Por lo que el coste total obtenido es,

$$C(T) = C_{\max} - A(T) = 42.89 - 6.815 = 36.33 \text{ PLN} \quad [5.5]$$



*Figura 5.5.: Comprobación de la solución gráfica aplicando el Método Gráfico General.
Fuente: Elaboración propia*

5. Análisis de sensibilidad mediante interpolación visual.

A la vista de la ubicación del punto de la gráfica se pueden extraer varias conclusiones de manera inmediata:

- Las líneas de isovalores de periodo óptimo se encuentran sensiblemente espaciadas en las inmediaciones de la solución, lo que indica que la curva $C=f(T)$ es relativamente plana en ese punto. Pequeñas variaciones en la Tasa de Tiempo de Retardo b o de la Tasa Corregida de Fallo L desplazarían el punto vertical y horizontalmente, sin causar grandes cambios en el periodo óptimo de inspección.
- El punto que representa la solución óptima se encuentra en una zona del campo de líneas de isovalores de ahorro en la que las líneas presentan menor potencial (líneas muy separadas) y además se trata de la zona de isolíneas de menor ahorro.

Así para obtener un ahorro del doble del obtenido serían necesarios incrementos de $X\%$ en la Tasa de Tiempo de Retardo b , de $Y\%$ en la Tasa Corregida de Fallo L o una combinación de ambas

Para mayor agilidad, se puede utilizar en lugar del gráfico simple, el gráfico que incluye el ábaco de cálculo del ahorro en función del factor de coste y el coste de inspección. En este ejemplo se pone de manifiesto la utilidad de este gráfico compuesto, pues se obtiene el resultado final del ahorro de un modo muy visual, facilitando la labor de análisis de sensibilidad.

En el gráfico que se reproduce a continuación se ha resaltado la solución obtenida para los datos de entrada.

Periodo óptimo de inspección y coeficiente de ahorro por ciclo correspondiente en función de la Tasa Corregida de Fallo y el Tiempo de Retardo para $T > t_i$. Nomograma para cálculo directo del ahorro máximo según el coste de inspección. Ejemplo: Tasa corregida de fallo 0.0702, tasa de tiempo de retardo 0.01755, periodo óptimo 56, coste de inspección 250 y resultado de ahorro máximo 6.

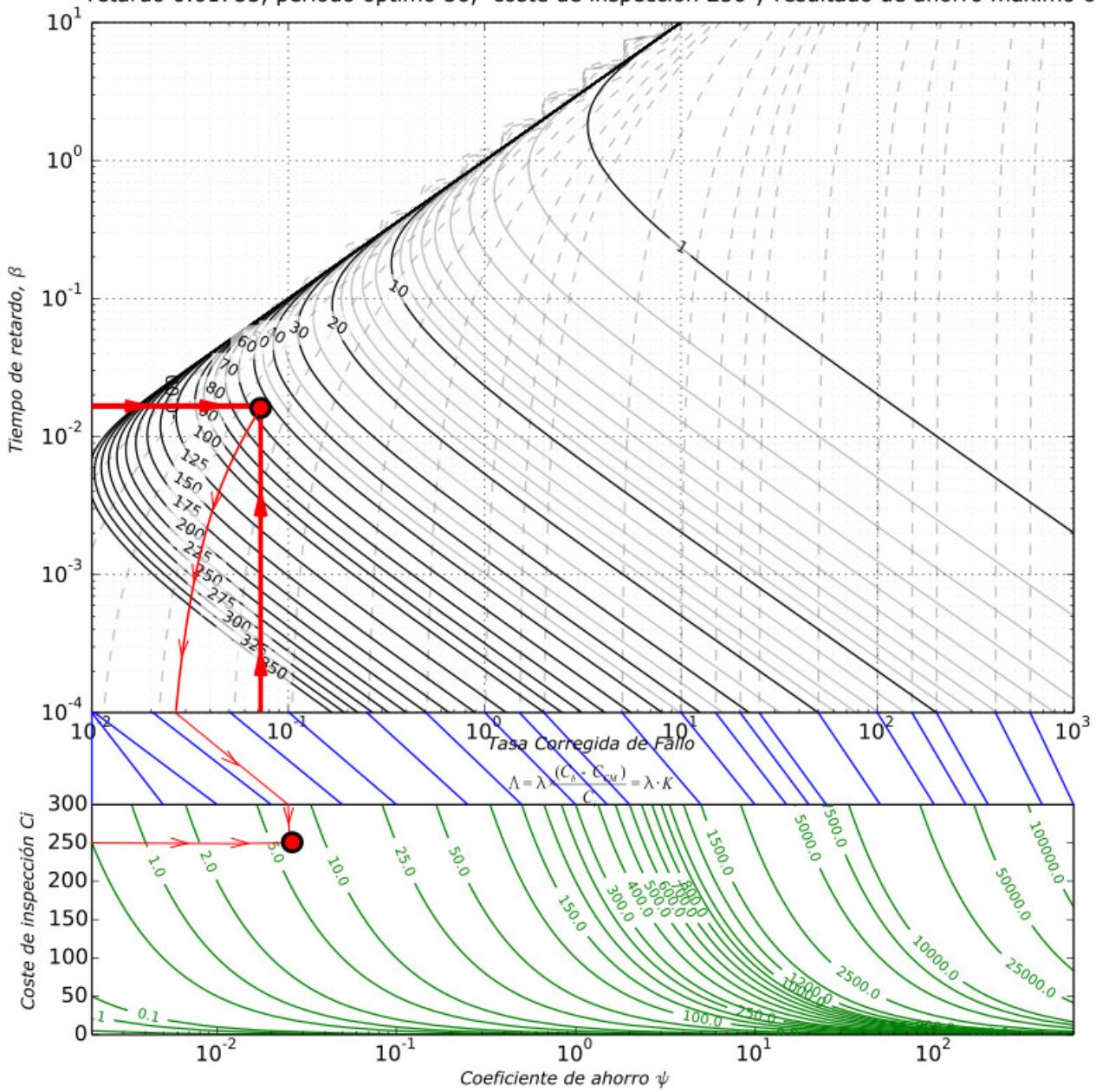


Figura 5.6.: Solución gráfica aplicando el Método Gráfico General, nomograma con coste de inspección. Fuente: Elaboración propia

6. Resolución utilizando el Método Gráfico Simplificado.

Por último, dado que el autor del caso práctico ha considerado una tasa de tiempo de retardo igual al a la tasa de fallos ($\beta = \lambda = 0.01755$), resulta viable el utilizar el Método Gráfico Simplificado. Para utilizar el citado método, es necesario tan solo conocer el *Ratio de Coste K* y la *Tasa de fallo λ* . Los valores a introducir en el gráfico son por tanto:

$$K = \frac{(C_b - C_{CM})}{C_i} = \frac{(2500 - 1500)}{250} = 4 \quad y \quad \lambda = 0.017155 \quad [5.6]$$

Obteniéndose gráficamente un resultado de $T_{óptimo}=56$

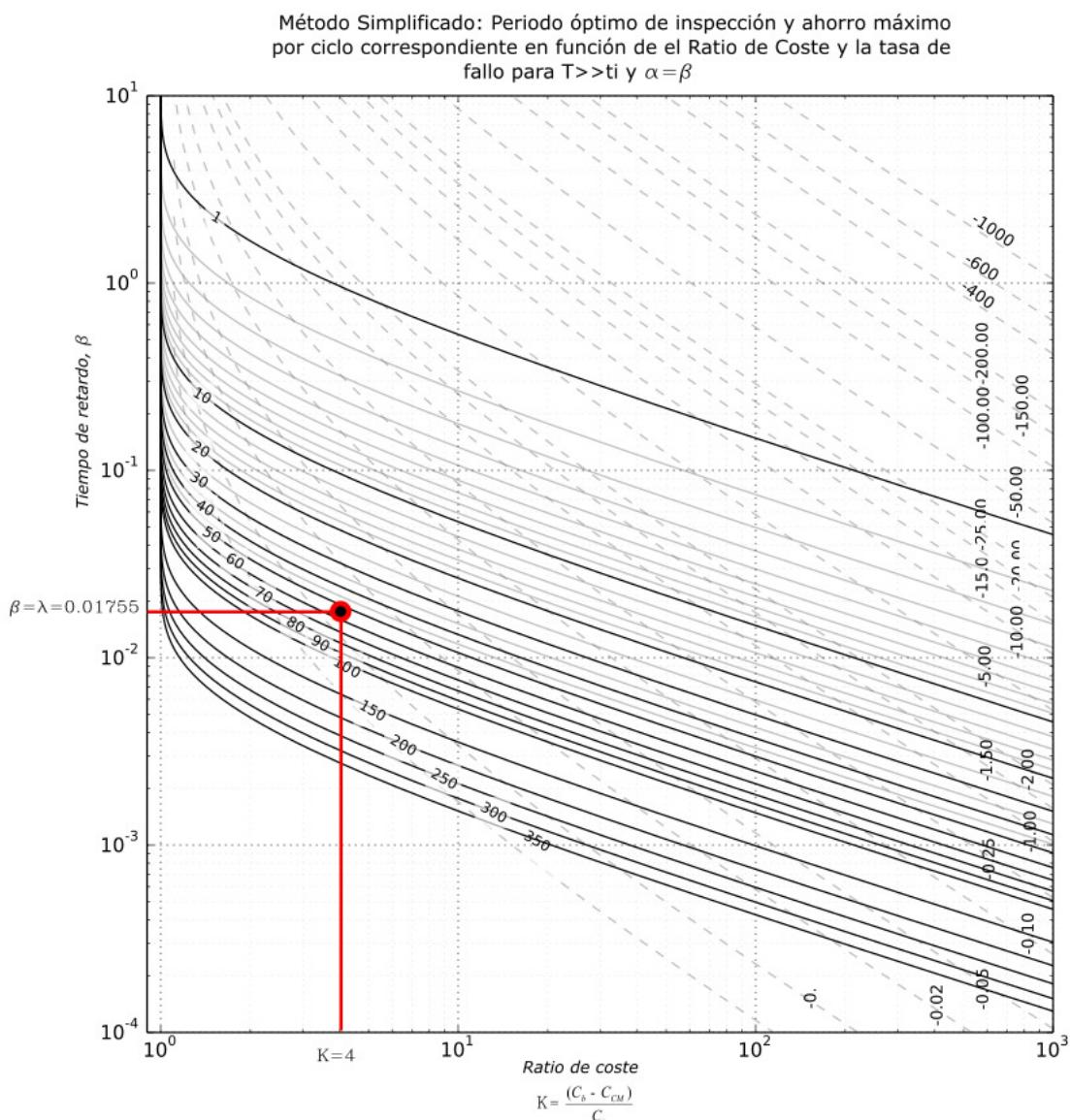


Figura 5.7.: Solución gráfica aplicando el Método Gráfico Simplificado. Fuente: Elaboración propia

7. Conclusiones.

- Se ha demostrado la validez del Método Gráfico General para el caso práctico de aplicación, obteniéndose los mismos resultados de modo analítico y gráfico
- Se ha ensayado la validez de la hipótesis de trabajo $T >> t_i$, acotándose los errores obtenidos al aplicar el método gráfico a este caso. Mediante dicho análisis se ha puesto de manifiesto que con estos valores de entrada el error es despreciable si $T > 100 \times t_i$
- Se ha demostrado la validez del Método Gráfico Simplificado para el caso práctico de aplicación, obteniéndose los mismos resultados con el Método Gráfico Simplificado y con el Método Gráfico General.
- Se ha practicado un análisis de sensibilidad mediante interpolación visual, concluyendo la forma de la curva Coste-Periodo de inspección y la influencia de la variación de los valores de entrada en el resultado.

5.1.3. Caso de mantenimiento de unidades de ventilación

1. Presentación del caso práctico

En este segundo ejemplo se va a resolver el caso práctico presentado en el artículo

BAKER, R. D.; SCARF, P. A. Can models fitted to small data samples lead to maintenance policies with near-optimum cost?. IMA Journal of Mathematics applied in Business and Industry, 1995, vol. 6, no 1, p. 3-12.

La utilización de este artículo para validar el método gráfico resulta gran interés por varios motivos:

- Se trata de un artículo publicado por investigadores del grupo que se desarrolló el Modelo de Tiempo de Retardo - Centre for Operational Research and Applied Statistics, University of Salford, Salford, Greater Manchester. En particular, el autor que suscribe el artículo publicó diversos artículos sobre variaciones del método, constituyendo un referente en el campo.
- Los autores utilizan distribuciones exponenciales tanto para modelar la tasa de detección de fallos como la tasa de tiempo de retardo.
- El ejemplo pone a prueba el método gráfico pues plantea un problema en el que el coste de reparación es cero.
- El ejemplo utiliza un tiempo de inspección nulo, lo que hace de aplicación inmediata el Método Gráfico.

El artículo utiliza el Modelo de Tiempo de Retardo para optimizar el modelo de mantenimiento de dos ventiladores de la unidad de cuidados intensivos de un hospital de Liverpool.

Los autores utilizaron los datos históricos de fallos y reparaciones de dos ventiladores idénticos. En un periodo de 4741 días-máquina hubo un total de 16 fallos y defectos detectados mediante inspección. Las inspecciones se llevaron a cabo cada tres meses aproximadamente. Los datos históricos se ajustaron utilizando el modelo de Tiempo de Retardo con distribuciones exponenciales, inspecciones perfectas y tasa de ocurrencia de fallos asimilable a un Proceso Homogéneo de Poisson (PHP). En particular, concluyen que para el caso práctico los datos son:

- Coste de cada inspección de £45
- Coste de cada operación de reparación en caso de fallo no detectado, £370
- Tasa de fallo $\lambda = 0.00337$ fallos por día (MTBF de aproximadamente 300 días) con una desviación estándar de 0.00084
- Tasa de tiempo de retardo $\beta = 0.0195$ (tiempo de retardo medio de 51 días) con una desviación estándar de 0.0087

En base a estos datos, los autores resuelven el modelo para coste mínimo obteniendo un periodo óptimo de 130 días y un coste mínimo de £416.4. A continuación se reproduce la solución gráfica presentada en el artículo.

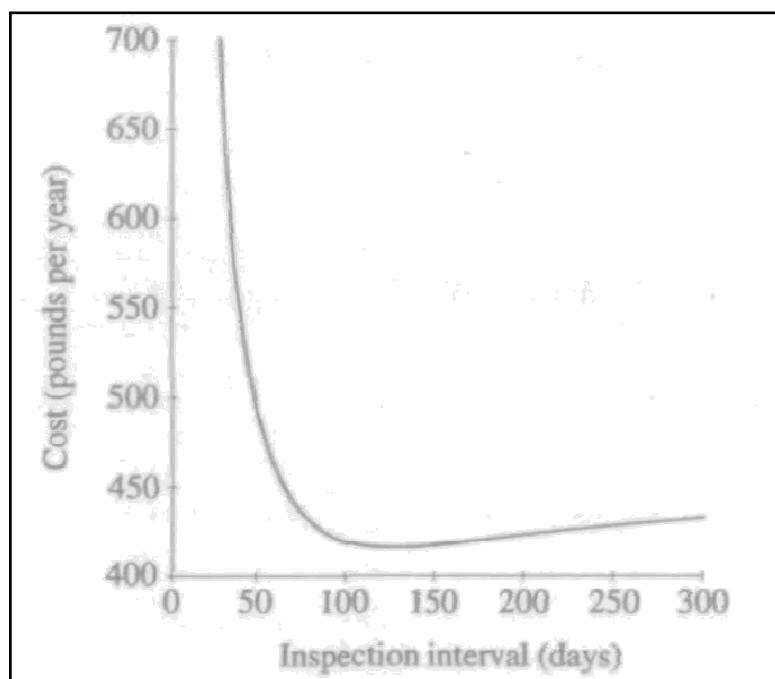


Figura 5.8.: Solución gráfica del caso práctico de ventiladores hospitalarios. Fuente: Baker, 1995

2. Comprobación de la solución analíticamente

A continuación se resuelve, utilizando medios propios, el modelo con los datos de entrada utilizados en el caso práctico. En gráfico reproducido a continuación se representa el coste por ciclo en función del periodo para los datos del caso, obteniéndose una solución prácticamente idéntica a la expuesta en el artículo.

La gráfica representada muestra la curva del coste total de ciclo en función del periodo en días. También se representa la variación de cada uno de los componentes: los costes de inspección (C_i), los costes de reparación de fallos detectados (C_{CM}) y los costes debidos a defectos no detectados (C_b).

Los valores obtenidos son de un periodo óptimo de 126 días y un coste mínimo de £1.14004

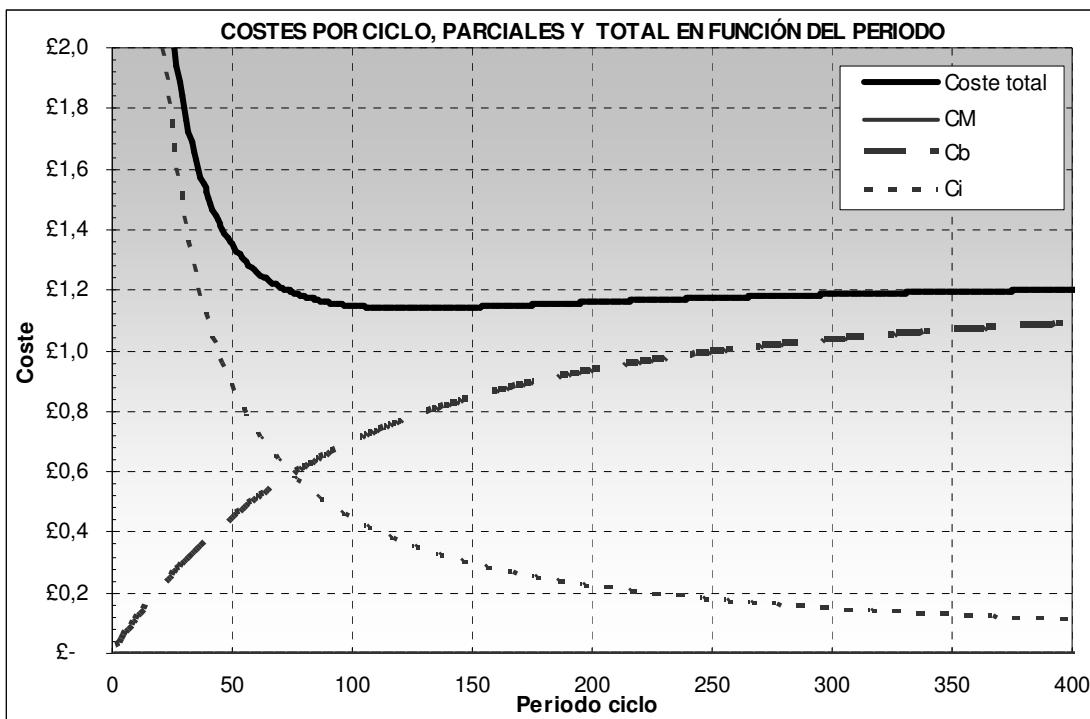


Figura 5.9.: Solución gráfica del caso práctico de ventiladores hospitalarios reproducida por métodos analíticos y grafizada con hoja de cálculo. Fuente: Elaboración propia

Dado que el autor representa la solución utilizando una base anual para representar los costes, resulta oportuno seguir la misma escala para observar la equivalencia de la gráfica obtenida por medios propios y la publicada en el artículo.

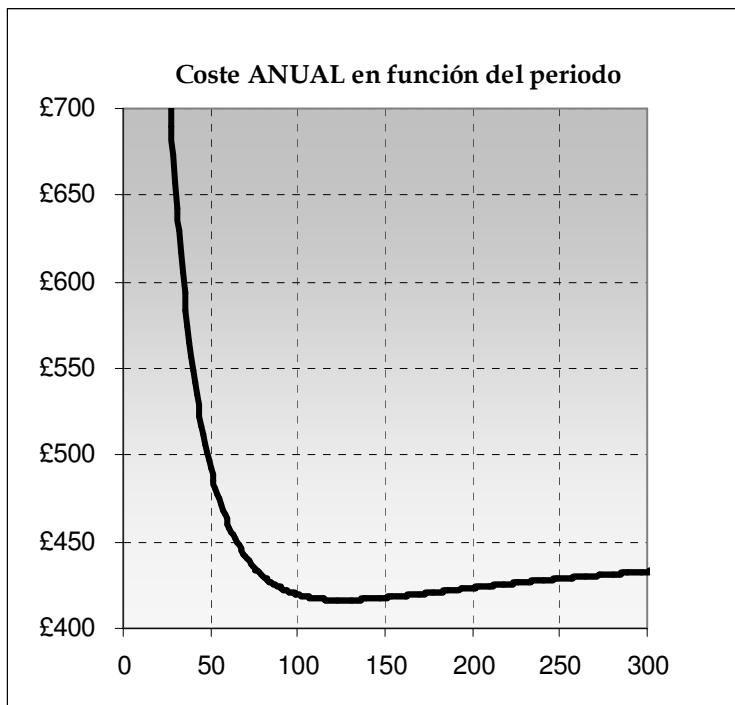


Figura 5.10.: Solución gráfica del caso práctico de ventiladores hospitalarios reproducida por métodos analíticos y grafizada con hoja de cálculo, utilizando idénticas escalas que Baker. Fuente: Elaboración propia

El resultado obtenido en base anual para el período óptimo de inspección de 126 días es de £416.1. Existe una mínima divergencia entre el óptimo obtenido por medios propios y el publicado por Baker, debido probablemente a un mero cambio en un cuarto decimal. De hecho, se observa que para 130 días se obtiene un valor de coste óptimo de £1.14017 en vez de los £1.14004 obtenidos, que implica una variación anual inferior a los cinco peniques (£0.04745).

4. Análisis de sensibilidad para $t_i \neq 0$

En este caso práctico en particular, en el que el tiempo de inspección es cero, el método gráfico es de aplicación inmediata. Sin embargo, se procede a resolver el caso con diferentes valores de tiempo de inspección para entender el impacto de esta variable en el resultado final y así validar la hipótesis utilizada en el método gráfico, a saber $T >> t_i$.

La variación de los resultados obtenidos al modificar el tiempo de inspección es:

	Período óptimo	Coste mínimo
$t_i = 1$ día	122 días	£412.78
$t_i = 0$ días	126 días	£416.1
Diferencia	4 días	£3.32
Variación en %	3 %	0.79 %

Tabla 5.3. :Variación de período óptimo de inspección y coste resultante para $t_i= 0$ y $t_i= 1$.
Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que la variación obtenida tanto en periodo como en coste óptimo es despreciable a la vista de la precisión del resto de parámetros (estimación de costes, cálculo variables estadísticas...). Por tanto, este caso refuerza la validez de la hipótesis $T > t_i$ utilizada en el método gráfico desarrollado en esta tesis.

No se considera necesario repetir el cálculo para valores de tiempo de inspección más elevados, pues pensar en una inspección de más de un día para un ventilador de extracción sería sacar del contexto práctico el estudio.

5. Resolución utilizando el Método Gráfico General.

A continuación se procede a utilizar el método gráfico para resolver el problema del caso con los siguientes datos de entrada:

- Coste de cada inspección de £45
- Coste de cada operación de reparación en caso de fallo no detectado, £370
- Por tanto, el Ratio de Coste será:

$$K = \frac{(C_b - C_{CM})}{C_i} = \frac{(370 - 0)}{45} = 8.22 \quad [5.7]$$

- Tasa de fallo $\lambda = 0.00337$ fallos por día (MTBF de aproximadamente 300 días) con una desviación estándar de 0.00084
- Dado que la Tasa de fallo es de $\lambda = 0.00337$ fallos por día, la tasa corregida de fallo será:

$$\Lambda = \lambda \cdot K = 0.00337 \cdot 8.22 = 0.0277 \quad [5.8]$$

- Tasa de tiempo de retardo $\beta = 0.0195$ (tiempo de retardo medio de 51 días) con una desviación estándar de 0.0087
- El coste máximo es de:

$$C_{máx} = \lambda \cdot C_b = 0.00337 \cdot 370 = £1.247 \quad [5.9]$$

Entrando en el gráfico con la dupla $(\Lambda, \beta) = (0.0277, 0.0195)$ e interpolando visualmente se obtienen unos valores aproximados de $T_{óptimo} = 126$ y el Coeficiente de Ahorro $\psi(T=125) = -0.0023$. Por tanto el ahorro queda:

$$\begin{aligned} A(T) &= -C_i \cdot \psi = -45 \cdot (-0.0023) = £0.1125 \\ C_{máx} &= \lambda \cdot C_b = 0.00337 \cdot 370 = £1.247 \end{aligned} \quad [5.10]$$

Por lo que el coste total obtenido es,

$$C(T) = C_{máx} - A(T) = 1.247 - 0.1125 = £1.14 \quad [5.11]$$

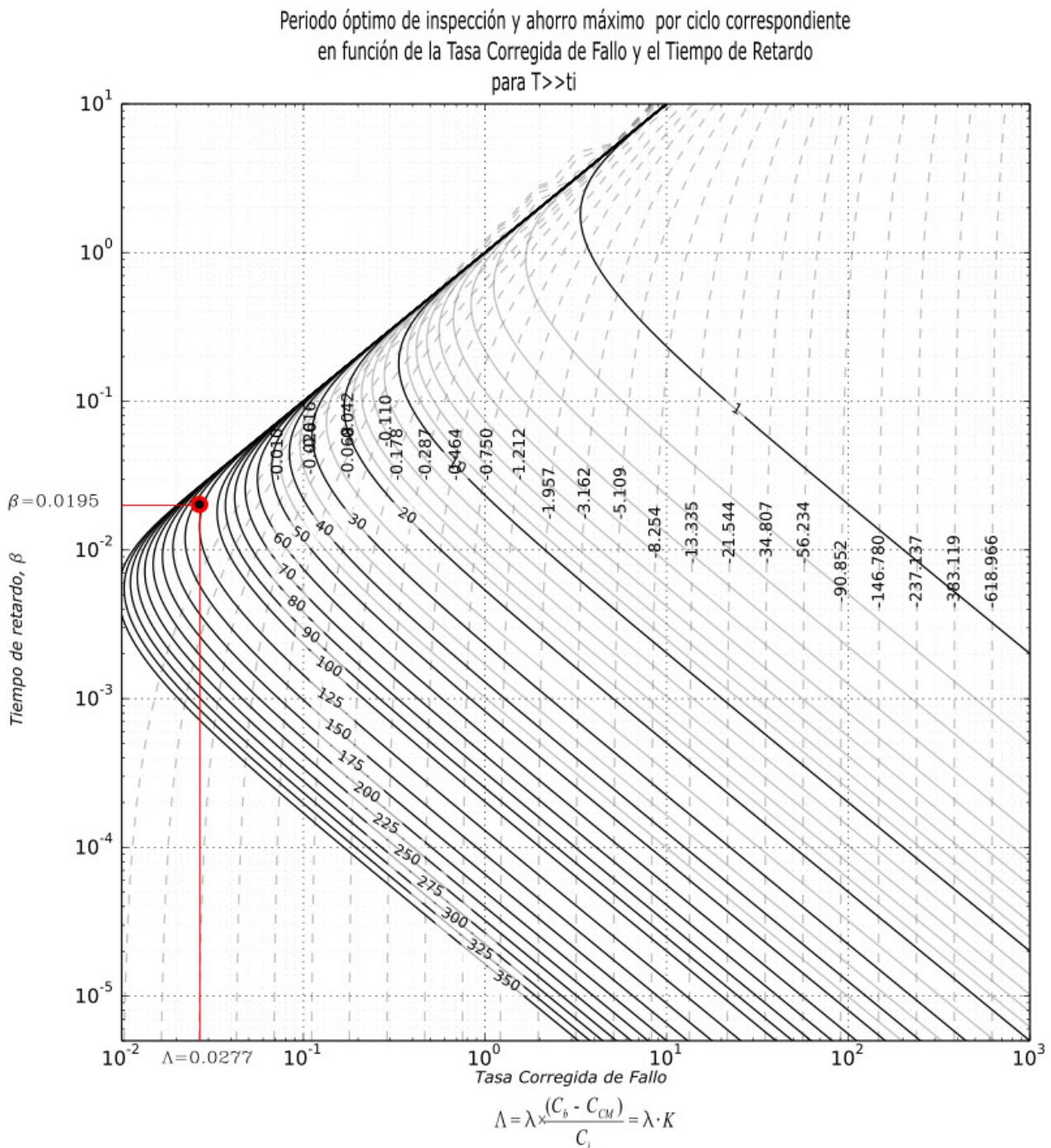


Figura 5.11.: Solución gráfica del caso práctico de ventiladores hospitalarios utilizando el método gráfico general. Fuente: Elaboración propia

5. Análisis de sensibilidad mediante interpolación visual.

A la vista de la ubicación del punto de la gráfica se pueden extraer varias conclusiones de manera inmediata:

- El punto de periodo óptimo se encuentra en una zona cercana a la zona de convergencia, la zona asintótica en la que la tasa corregida de fallo se

iguala con el tiempo de retardo. En esta zona existe gran concentración de líneas de isovalores de periodo, por lo que pequeñas variaciones en cualquiera de los dos ejes implicará variación relevante en el periodo óptimo.

- Respecto a las curvas de ahorro, en la zona de la solución las isolíneas de ahorro son relativamente curvas, por lo que del mismo que en el caso del periodo, pequeñas variaciones en tiempo de retardo o tasa corregida de fallo implicarán variaciones en el ahorro máximo.

6. Resolución utilizando el Método Gráfico Simplificado.

En este segundo caso práctico analizado, los autores han contado con datos de campo suficientes como para poder estimar tanto la tasa de fallos λ como la tasa de tiempo de retardo β . Por tanto, el Método Gráfico Simplificado no resulta de utilidad en la resolución de este problema.

7. Conclusiones.

- Del mismo modo que en el primer caso, al resolver la problemática planteada por Baker para los ventiladores de la unidad de cuidados intensivos del hospital de Liverpool se ha demostrado la validez del Método Gráfico General, obteniéndose los mismos resultados de modo analítico y gráfico
- Se ha ensayado la validez de la hipótesis de trabajo $T \gg t_i$, demostrando de nuevo que para este problema acotándose los errores obtenidos al aplicar el método gráfico a este caso. Mediante dicho análisis se ha puesto de manifiesto que con estos valores de entrada el error es despreciable si $T > 100 \times t_i$
- Se ha demostrado la validez del Método Gráfico Simplificado para el caso práctico de aplicación, obteniéndose los mismos resultados con el Método Gráfico Simplificado y con el Método Gráfico General.
- Se ha practicado un análisis de sensibilidad mediante interpolación visual, concluyendo la forma de la curva Coste-Periodo de inspección y la influencia de la variación de los valores de entrada en el resultado.

5.2. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA A LAS PUERTAS EXTERIORES DE UNA EXPLOTACIÓN FERROVIARIA

5.2.1. Metodología

Una vez demostrada la validez del Método Gráfico en la solución de varios casos prácticos resueltos en artículos publicados por terceros, se procede a demostrar la utilidad del método en el campo del mantenimiento ferroviario aplicando el modelo a un caso real. Los datos de partida han sido obtenidos de una explotaciones reales y contrastados con los responsables de mantenimiento de dichas explotaciones. Dado que se trata de explotaciones reguladas por estrictos contratos de mantenimiento suscritos entre el mantenedor y la Administración u Operador ferroviario, la protección de datos resulta de obligado cumplimiento. La información utilizada en esta tesis respeta dicho requisito, englobando a su vez un conjunto de datos lo suficientemente detallado como para poder llevar a cabo el estudio. Los resultados han sido discutidos con las fuentes y sancionados por el criterio práctico.

La metodología aplicada es la siguiente:

1. Presentación

Inicialmente se presenta el caso práctico, encuadrando la problemática dentro del contexto real. Se enfatiza la utilidad del método propuesto como parte del enfoque LCC.

2. Estimación de costes

Una vez presentado el caso y antes de aplicar el método gráfico, se estiman los costes de inspección, reparación y penalización. Para llevar a cabo la estimación se utilizan los valores iniciales aportados por el fabricante. Adicionalmente, se estiman los costes utilizando los métodos paramétrico y de ingeniería expuestos en el Capítulo 2. Se utiliza la tasa de fallos propuesta por el fabricante de las puertas para esta explotación.

3. Resolución analítica

A continuación se resuelve el analíticamente el problema con los datos de entrada estimados, aplicando la hipótesis de que la tasa del tiempo de retardo es igual a la tasa de ocurrencia de fallos. Se resuelve para varios tiempos de inspección para entender el impacto de dicha variable en el resultado final.

4. Aplicación del Método Gráfico Simplificado

Teniendo tanto los costes como la tasa de fallos, se procede a la resolución utilizando el método gráfico simplificado. Se comparan los resultados obtenidos gráfica y analíticamente y se discuten los resultados.

5. Aplicación del Método Gráfico General

Para entender la validez de la hipótesis "tasa de tiempo de retardo igual a tasa de ocurrencia de fallos", se resuelve el caso aplicando el Método Gráfico General a todo el rango de posibles tasas de tiempo de retardo.

6. Análisis de sensibilidad

Una vez comprobados los resultados para este último caso, se lleva a cabo un análisis de sensibilidad mediante interpolación visual. Esta es sin duda una de las grandes ventajas del método, pues permite al usuario entender el error en la solución final si cualquiera de los datos de entrada careciese de precisión.

7. Cálculo del tiempo de retardo por método objetivo

Aun no resultando relevante en este caso, se procede a estimar la tasa de tiempo de retardo utilizando el método objetivo. El método se basa en el ajuste de la función tiempo de retardo en base a datos estadísticos de la explotación, utilizando la metodología de máximos verosímiles para su ajuste.

8. Conclusiones

Finalmente se resumen las conclusiones obtenidas en cada caso.

5.2.2. Descripción del caso

Para ilustrar la aplicación de la metodología propuesta se procede analizar el mantenimiento de las puertas exteriores de una explotación de metro urbano, aplicando el Método Gráfico desarrollado para entender la posible optimización de dicho plan de mantenimiento. Las puertas exteriores constituyen un sistema apropiado para la demostración de la metodología por diferentes motivos:

- Se trata de un sistema común a todas las explotaciones ferroviarias, independientemente del fabricante o tipología.
- El fallo de una puerta conlleva penalización. Si se trata de un fallo en el proceso de cierre el tren no podrá circular hasta que no se repare el fallo o se modifique la composición para retirar ese coche de servicio. En caso de fallo en la apertura, la puerta quedará condenada hasta su reparación, conllevando la correspondiente penalización de servicio. Para demostrar

la utilidad del modelo se considera que la probabilidad de fallo de apertura será idéntica a la probabilidad de fallo en el cierre.

- El número de puertas en la explotación y su coste de mantenimiento son lo suficientemente elevados como para que su estudio quede justificado.
- Las puertas se someten a inspecciones generales de seguridad, siendo su nivel de deterioro detectable. Existe por tanto un tiempo de retardo desde que el defecto es detectable hasta que se produce el fallo.

La explotación objeto de estudio queda descrita, en el marco de esta investigación, por los siguientes parámetros:

- La explotación consiste en 12 composiciones o trenes de metro urbano
- Cada composición o tren tiene 9 coches, con ocho puertas exteriores por coche
- Aproximadamente cada tren circula ciento veinte mil kilómetros anuales y siete mil trescientas horas, que supone una velocidad media de dieciseis kilómetros por hora. Esta velocidad se utilizará para paso de la tasa de fallos por hora o día a fallos por kilómetro. También se utilizará para convertir el valor de MTBF (Tiempo medio entre fallos) a MDBF (distancia media entre fallos). Estos dos parámetros se denominarán por sus siglas en inglés (Mean Time/Distance Between Failures) por tratarse de acrónimos de uso habitual en el sector.
- Se considera que el contrato de mantenimiento entre la administración u operador ferroviario y el mantenedor se renueva cada cuatro años durante la vida útil del material rodante, que se toma inicialmente de treinta años.
- Para el cálculo de costes de vida útil LCC se considera que los costes anuales sufrirán un incremento del ocho por ciento anual. Este incremento incluye tanto los costes debidos a efectos inflacionarios como de valoración del resto de variables, como por ejemplo la variación de la valoración del inventario de repuestos según la tipo de cambio entre el país de la explotación y el país donde tributa la matriz que suministra los repuestos.
- El Coste Medio Ponderado de Capital (CMPC) de la empresa mantenedora será la tasa de descuento utilizada para descontar los costes anuales en el cálculo de los costes de vida útil. Esta tasa de descuento, denominada más habitualmente en los mercados por sus siglas en inglés "WACC" - Weighted Average Cost of Capital - es un parámetro interno de cada compañía, en este caso del mantenedor. El índice refleja el coste del capital de la empresa como una media ponderada entre la proporción de recursos propios y la proporción de recursos ajenos. El rango habitual de esta tasa de descuento oscila entre el cinco y el quince por ciento,

tomándose, para el análisis demostrativo objeto de este capítulo un valor del cinco por ciento. Se toma a modo ilustrativo un valor conservador de la tasa de descuento de un 5%

- El régimen de penalizaciones impuesto por el contrato de mantenimiento entre operador y mantenedor establece las siguientes tipologías y costes:

- o Penalización por confort: 750 u.m.
- o Penalización por servicio: 750 u.m.
- o Penalización por retraso menor de diez minutos: 1000 u.m.
- o Penalización por retraso superior a diez minutos o cancelación: 3500 u.m.

Resumiendo en formato tabular, los parámetros generales de la operación son:

PARÁMETROS GENERALES EXPLOTACIÓN	
Número de trenes o composiciones	20
Número de coches por composición	9
Número de puertas por coche	8
Número de puertas totales	1440
Kilómetros anuales por puerta	120.000 km
Velocidad media	16 km/h
Tiempo anual en circulación	7300 h
Vida útil del tren	30 años
Plazo de renovación contrato	4 años
Incremento anual de costes	8%
Tasa de descuento	5%
Régimen de penalizaciones	
Penalización por Confort	750 u.m.
Penalización por Servicio	750 u.m.
Penalización retraso <10 min	1500 u.m.
Penalización retraso >10 min	3000 u.m.

Tabla 5.4. :Parámetros generales de la explotación del caso práctico presentado
Fuente: Elaboración Propia.

5.2.3 Resolución analítica del caso.

En la sección anterior se han estimado los costes anuales de inspección, mantenimiento correctivo y penalizaciones según los parámetros indicados por el fabricante. También se conoce la tasa de ocurrencia de fallos aportada por el fabricante, teóricamente ajustada por el mismo para la explotación objeto de estudio y el tiempo de inspección. Esta sección se resuelve el analíticamente el problema con los datos de entrada estimados, aplicando la hipótesis de que la tasa del tiempo de retardo es igual a la tasa de ocurrencia de fallos.

La simplificación de igualar la tasa de ocurrencia de fallos a la tasa de tiempo de retardo se lleva a cabo porque no se cuenta con suficientes datos históricos de la explotación como para obtener la tasa del tiempo de retardo utilizando métodos estadísticos de regresión. Este es el caso más habitual en una explotación ferroviaria, en el que en todo caso, se cuenta con valores de tasas de fallo ajustadas a medida que se va contando con datos estadísticos. Una de las utilidades del Método Gráfico desarrollado es, como se verá posteriormente, el poder entender la influencia de la variación o precisión de la tasa de tiempo de retardo en la solución. En las siguientes secciones de este capítulo queda demostrada tanto la citada utilidad del Método Gráfico en este aspecto, como la metodología de estimación de la tasa de tiempo de retardo por el método de estimación por máxima verosimilitud.

Adicionalmente, el caso se resuelve para varios tiempos de inspección para entender el impacto de dicha variable en el resultado final y con ello la validez de la principal hipótesis del método gráfico.

Se resuelve a continuación el método de tiempo de retardo considerando las puertas como un sistema complejo. Se modela así tanto la tasa de ocurrencia de fallos como la tasa de tiempo de retardo por medio de distribuciones exponenciales y se considera que los fallos ocurren siguiendo un proceso homogéneo de Poisson. La formulación a aplicar según lo expuesto en el capítulo 4 es,

$$C(T) = \frac{B(T) \cdot C_p + C_{CM} [N(T) - B(T)] + C_i}{T + d_i} \quad [5.12]$$

siendo el número total de defectos

$$N(T) = \lambda \cdot T \quad [5.13]$$

y el número de esos defectos que por no detectarse a tiempo se convierten en fallos penalizables

$$B(T) = \int_0^T \lambda \cdot F(T-u) du = \int_0^T \lambda \cdot (1 - e^{-\beta(T-u)}) du = \lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta} + T \right] \quad [5.14]$$

Así, la formulación general queda:

$$C(T) = \frac{\lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta} + T \right] \cdot C_b + C_{CM} \left[\lambda \cdot T - \lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta} + T \right] \right] + C_i}{T + d_i}; \quad [5.15]$$

$$C(T) = \frac{\lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta} + T \right] \cdot C_b - \lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta} \right] \cdot C_{CM} + C_i}{T + d_i}$$

En el caso de las puertas los datos de entrada al modelo son:

- Coste de cada inspección de 10 u.m.
- Coste de cada operación de mantenimiento correctivo de 100 u.m.
- El coste de en caso de fallo no detectado, es igual al coste de la penalización más el coste de la reparación. Se considera que la mitad de las veces la penalización es por puerta abierta e implica la cancelación del tren, es decir, una penalización de 3000 u.m. En el resto de casos, la penalización se da por puerta anulada, implicando una penalización de 1500 u.m. Así, la penalización media será de 2250 u.m., a lo que habrá que sumar el coste medio de reparación de 100 u.m., por lo que el coste final en caso de fallo no detectado es 2350 u.m.
- Tiempo de cada inspección de seguridad 0.5 horas por puerta.
- Tasa de fallo $\lambda = 0.0005$ fallos por día y MTBF de 2000 días equivalentes a una MDBF de 768.000km
- Tasa de tiempo de retardo idéntica a la tasa de fallo $\beta = 0.0005$ por día
- Horas de funcionamiento anuales, 7300 horas, equivalentes a 305 días anuales.
- Velocidad media 16 km/h

En base a estos datos, se resuelve el modelo para coste mínimo obteniéndose la siguiente gráfica que muestra la curva del coste total de ciclo en función del periodo.

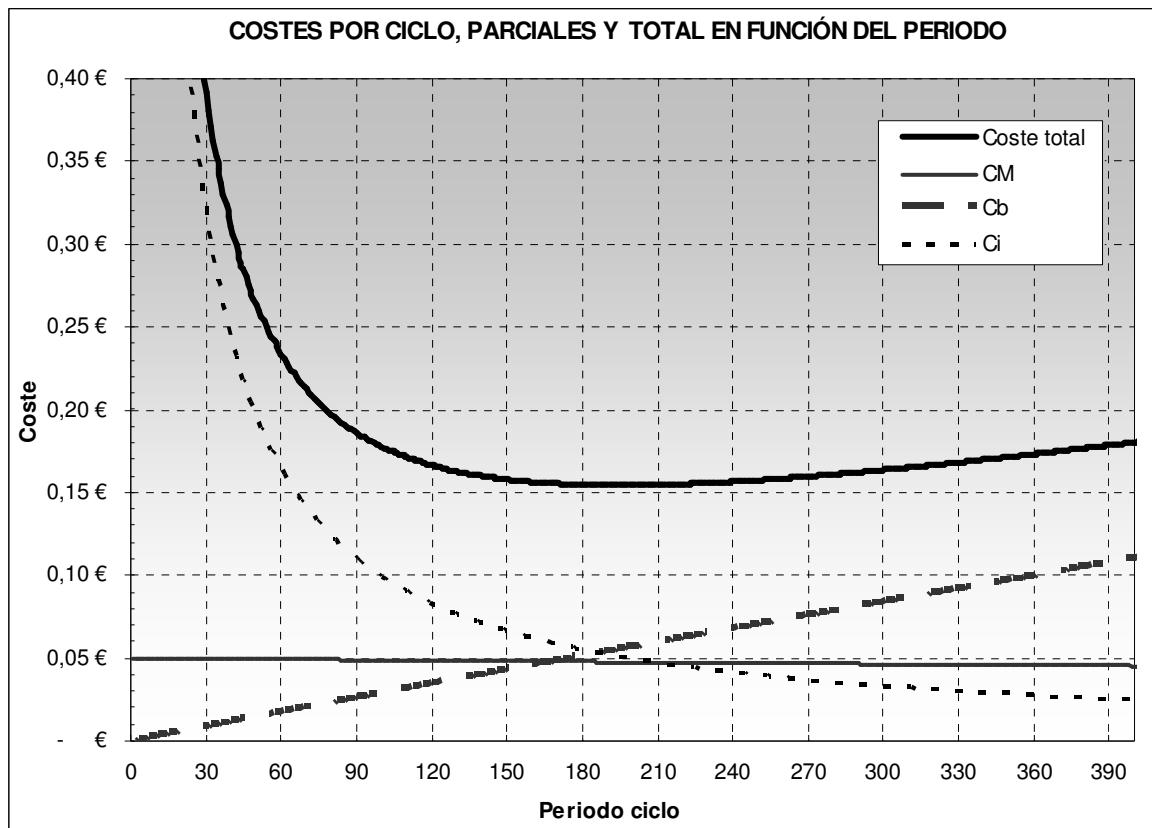


Figura 5.12.: Solución gráfica del caso práctico de puertas ferroviarias utilizando métodos analíticos. Fuente: Elaboración propia

La gráfica aporta información visual sobre la variación de cada uno de los componentes de coste en función de la variación del periodo. Así se ve la variación asintótica de los costes de inspección (C_i) si el periodo es muy bajo, el crecimiento de los costes debidos a defectos no detectados (C_b) si el periodo de inspección crece y el correspondiente decremento de los costes de reparación de fallos detectados (C_{CM}) a medida que sube el periodo de inspección y por tanto se detectan menos fallos.

El coste óptimo obtenido es de 0.154 u.m. por puerta para un periodo óptimo de inspección de 195 días (4680 horas o 74.880 km). Dado que el coste máximo que se ocurriría si todos los fallos implicaran penalización es de

$$C_{máx} = \lambda \cdot C_b = 0.0005 \cdot 2350 = 1.175 \text{ u.m.} \quad [5.16]$$

se deduce que el ahorro máximo obtenido mediante las inspecciones es de

$$C_{máx} - C_{óptimo} = 1.175 - 0.154 = 1.154 \text{ u.m.} \quad [5.17]$$

El plan de mantenimiento en vigor implica una inspección de seguridad cada 60.000 km, equivalentes a 3750 horas a 16 km/h o 156.25 días para el que el modelo arroja un coste de 1.5684 u.m.

	<i>Periodo</i>	<i>Coste diario unitario</i>
<i>Periodo Actual</i>	156 días	0.157 u.m.
<i>Periodo Óptimo</i>	195 días	0.154 u.m.
<i>Diferencia</i>	39 días	0.0025 u.m.
<i>Variación en %</i>	25 %	1.59 %

Tabla 5.5.: Variación de periodo óptimo de inspección y coste diario unitario resultante para $t_i = 156$ y $t_i = 195$ Fuente: Elaboración Propia.

Para mayor claridad se representan los mismos resultados en base anual y para toda la explotación. Esto implica multiplicar el valor obtenido en base diaria para una puerta por el número de días de servicio al año (305 días) y por el número de puertas en la explotación (1440 puertas). La gráfica obtenida ofrece una mejor visión de las magnitudes reales del problema.

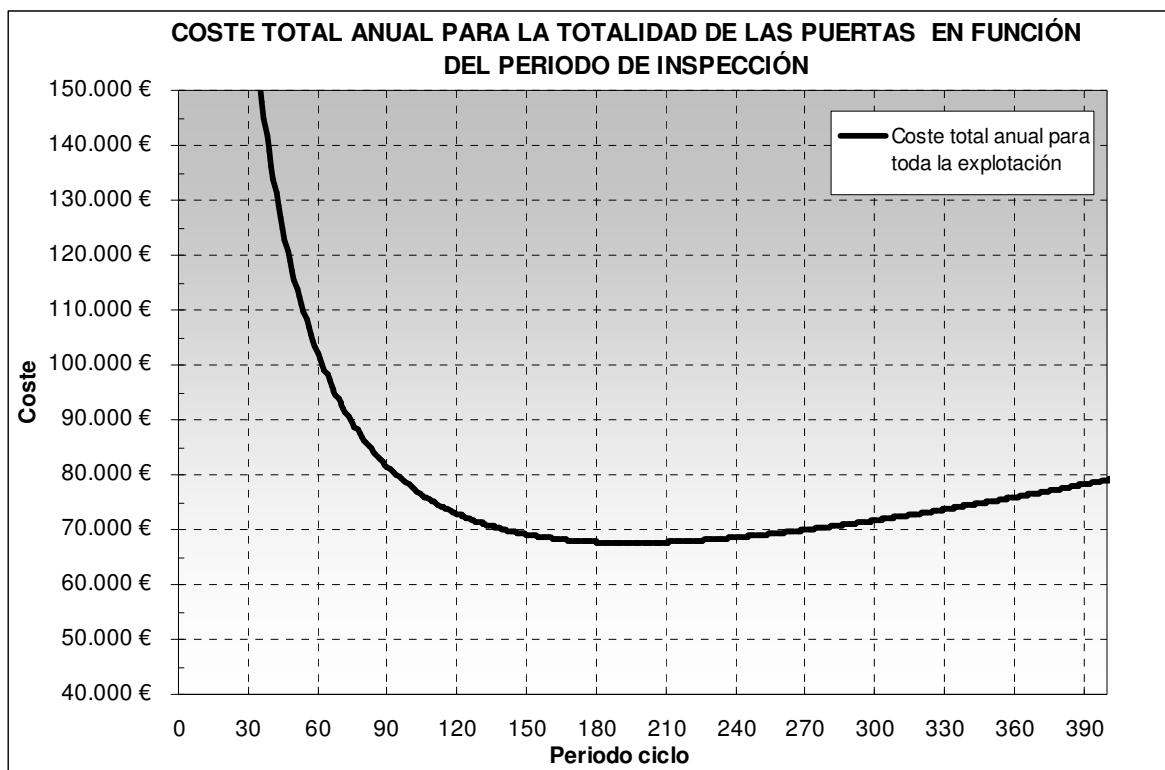


Figura 5.13.: Solución gráfica del caso práctico de puertas ferroviarias utilizando métodos analíticos: coste anual totalidad de puertas. Fuente: Elaboración propia

El resultado anual para toda la explotación para un periodo óptimo de 195 días (4680 horas o 74.880 km) es de 67.636,80 u.m. frente al plan de mantenimiento actual de periodo 156 días para el cual el modelo arroja un valor de coste en base anual y para toda la explotación de 68.884,13 u.m.

	<i>Periodo</i>	<i>Coste anual total</i>
<i>Periodo Actual</i>	156 días	68.884,13 u.m.
<i>Periodo Óptimo</i>	195 días	67.636,80 u.m.
<i>Diferencia</i>	39 días	1.247,33 u.m.
<i>Variación en %</i>	25 %	1.81 %

Tabla 5.6. :Variación de periodo óptimo de inspección y coste anual total resultante para $t_i=156$ y $t_i=195$ Fuente: Elaboración Propia.

Para poder estudiar las variaciones en coste entre la solución óptima y la actual de un modo más visual, se grafica la misma solución con diferente escala en ordenadas. En esta gráfica se puede estimar visualmente la diferencia entre el óptimo y el actual:

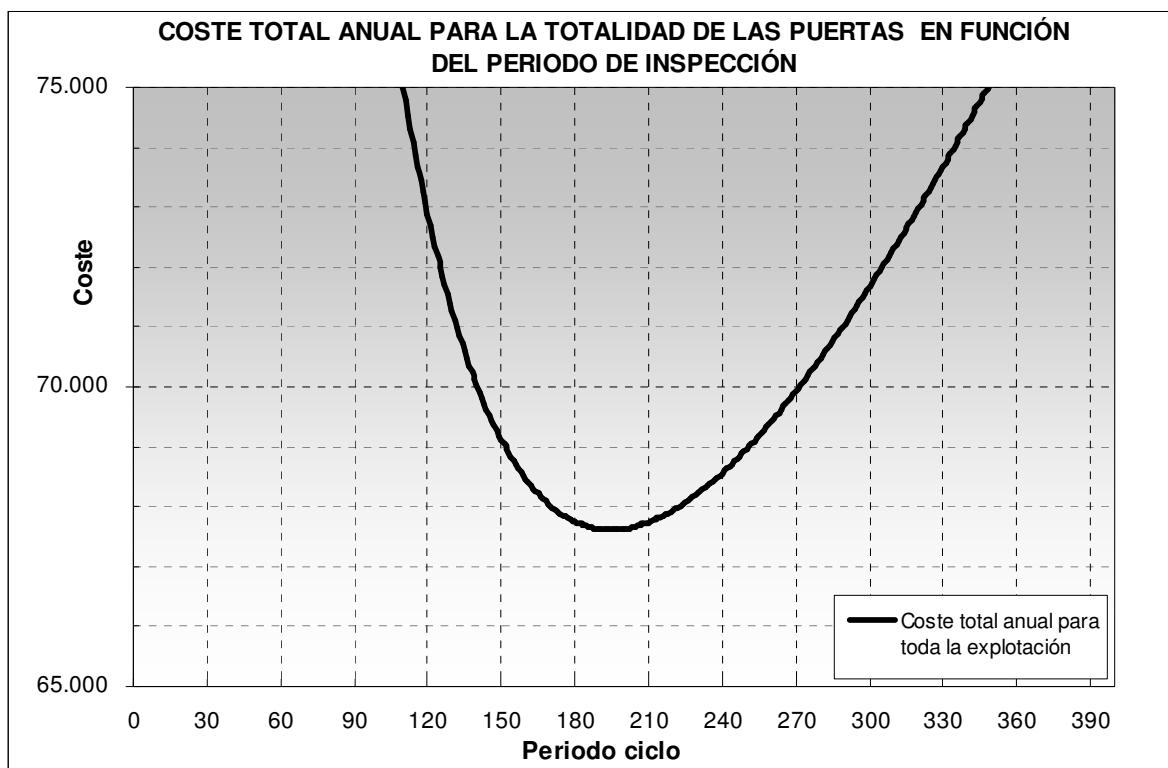


Figura 5.14.: Solución gráfica del caso práctico de puertas ferroviarias utilizando métodos analíticos: coste anual totalidad de puertas escalado apropiadamente . Fuente: Elaboración propia

Tabulando los períodos y costes para la solución óptima frente a la real se observa lo que ya era predecible al estudiar la gráfica de coste unitario para una puerta, y es que la variación en coste al relaja el periodo de inspección es baja. De hecho se observa que aumentando el periodo actual en un 25% el ahorro es menor del 2%.

La curva de coste frente a periodo presenta un apuntamiento de la concavidad bajo, lo que indica que un error en el periodo de las inspecciones de seguridad en este escenario no presenta un gran riesgo económico.

Obviamente tanto la estimación de los costes como la tasa de fallo proporcionada por el fabricante presentan cierta desviación frente a la realidad, que solo se podrá corregir a medida que se recopile un histórico de datos en la explotación. Dado que dicho error es poco probable de acotar, cuando la concavidad está tan poco apuntada el Método Gráfico permite entender cuales son las variables que tienen mayor impacto en el resultado, permitiendo estimar el riesgo económico asociado a la decisión.

Por último se procede a comprobar analíticamente para este caso la validez de la hipótesis $t_i=0$ utilizada en el Método Gráfico. Este caso práctico en particular, el tiempo de inspección es de media hora, equivalente a un 0.01% el periodo óptimo. La variación de los resultados obtenidos al despreciar el tiempo de inspección se reflejan en la siguiente tabla, quedando patente la validez de la hipótesis $t_i=0$ por ser $T \gg t_i$

	<i>Periodo óptimo</i>	<i>Coste mínimo</i>
$t_i = 0.5h$	195 días	0.15437 u.m.
$t_i = 0$	195 días	0.15439 u.m.
<i>Diferencia</i>	0 días	1.39 PNL
<i>Variación en %</i>	0%	0.01 %

Tabla 5.7. :Variación de periodo óptimo de inspección y coste anual total resultante para $t_i=0,5$ y $t_i=0$ Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que la variación en periodo óptimo nula y el error cometido en el coste mínimo es prácticamente despreciable, válido por tanto en el contexto de esta tesis a la vista de la precisión del resto de parámetros (estimación de costes, cálculo variables estadísticas...).

5.2.4. Aplicación del Método Gráfico Simplificado.

Por último, dado que el autor del caso práctico ha considerado una tasa de tiempo de retardo igual al a la tasa de fallos ($\beta = \lambda = 0.01755$), resulta viable el utilizar el Método Gráfico Simplificado. Para utilizar el citado método, es necesario tan solo conocer el *Ratio de Coste K* y la *Tasa de fallo λ* . Los valores a introducir en el gráfico son por tanto:

$$K = \frac{(C_b - C_{CM})}{C_i} = \frac{(2350 - 100)}{10} = 225 \quad y \quad \lambda = 0.0005 \quad [5.18]$$

Periodo óptimo de inspección y factor de ahorro equivalente en función del Factor de Coste y la Tasa de Fallo

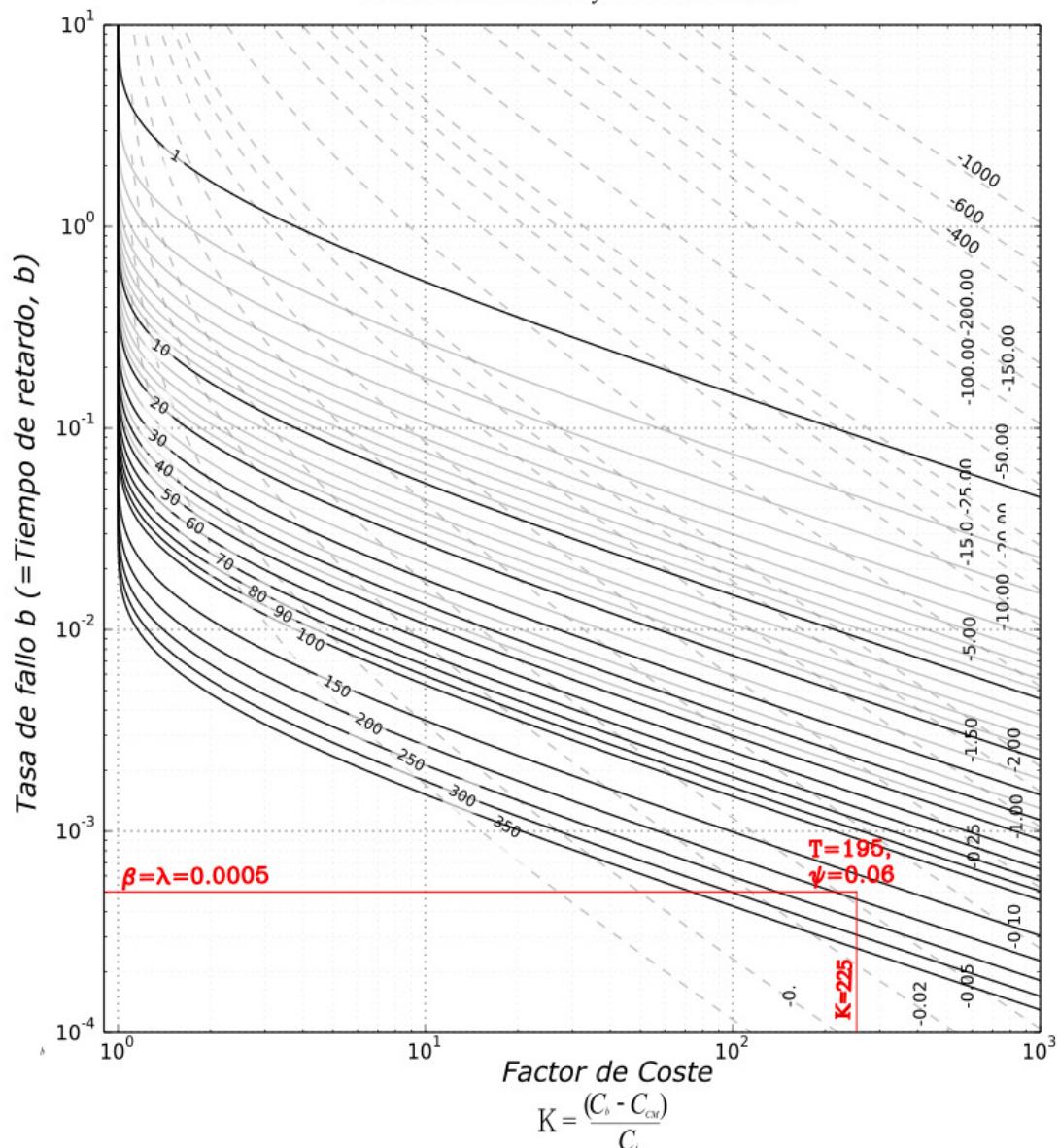


Figura 5.15.: Aplicación del Método Gráfico Simplificado al caso de las puertas ferroviarias . Fuente: Elaboración propia

Entrando en el gráfico con la dupla $(K, \lambda) = (225, 0.0005)$ e interpolando visualmente se obtienen unos valores aproximados de $T_{óptimo} = 195$ y el *Coeficiente de Ahorro* $\psi(T=195) = -0.1$. Por tanto el ahorro queda:

$$\begin{aligned} A(T) &= -C_i \cdot \psi = -10 \cdot (-0.1) = 1 \text{ u.m.} \\ C_{máx} &= \lambda \cdot C_b = 0.0005 \cdot 2350 = 1.175 \text{ u.m.} \end{aligned} \quad [5.18]$$

Por lo que el coste total obtenido es,

$$C(T) = C_{máx} - A(T) = 1.175 - 1 = 0.17 \text{ u.m.} \quad [5.19]$$

resultado que coincide con la solución analítica.

El Método Gráfico Simplificado parte de la hipótesis de que el tiempo de retardo es igual al tiempo medio entre fallos. Esta hipótesis se relajará al resolver el caso para un rango de tiempos de retardo utilizando el Método Gráfico General. Sin embargo, al utilizar solo las variables habituales en una explotación de mantenimiento (costes y tasa de fallo), el resultado es sencillo de obtener e inmediato de interpretar. Además, se puede realizar un análisis de sensibilidad por mera interpolación visual para entender el impacto de las dos variables fundamentales en el resultado final.

5.2.5. Aplicación del Método Gráfico General.

A continuación se procede a utilizar el método gráfico para resolver el problema del caso con los siguientes datos de entrada:

- Coste de cada inspección de 10 u.m.
- Coste de cada operación de mantenimiento correctivo de 100 u.m.
- El coste de en caso de fallo no detectado, es igual al coste de la penalización más el coste de la reparación. Se considera que la mitad de las veces la penalización es por puerta abierta e implica la cancelación del tren, es decir, una penalización de 3000 u.m. En el resto de casos, la penalización se da por puerta anulada, implicando una penalización de 1500 u.m. Así, la penalización media será de 2250 u.m., a lo que habrá que sumar el coste medio de reparación de 100 u.m., por lo que el coste final en caso de fallo no detectado es 2350 u.m.
- Por tanto, el Ratio de Coste será:

$$K = \frac{(C_b - C_{CM})}{C_i} = \frac{(2350 - 100)}{10} = 225 \quad [5.20]$$

- Tasa de fallo $\lambda = 0.0005$ fallos por día y MTBF de 2000 días equivalentes a una MDBF de 768.000km
- Dado que la Tasa de fallo es de $\lambda = 0.0005$ fallos por día, *la tasa corregida de fallo* será:

$$\Lambda = \lambda \cdot K = 0.0005 \cdot 225 = 0.1125 \quad [5.21]$$

- Tasa de tiempo de retardo desconocida. Se resolverá gráficamente para todo el dominio de $\beta = [10^{-4} \div 10^{-1}]$. Esto es equivalente a
- Tiempo de inspección despreciable frente a periodo de inspección.
- El coste máximo es de:

$$C_{máx} = \lambda \cdot C_b = 0.0005 \cdot 2350 = 1.175 \text{ u.m.} \quad [5.22]$$

- Horas de funcionamiento anuales, 7300 horas, equivalentes a 305 días anuales.
- Velocidad media 16 km/h

Entrando en el gráfico con $\Lambda=0.1125$ se obtiene la siguiente solución gráfica para el rango de $\beta = [10^{-4} \div 10^{-1}]$

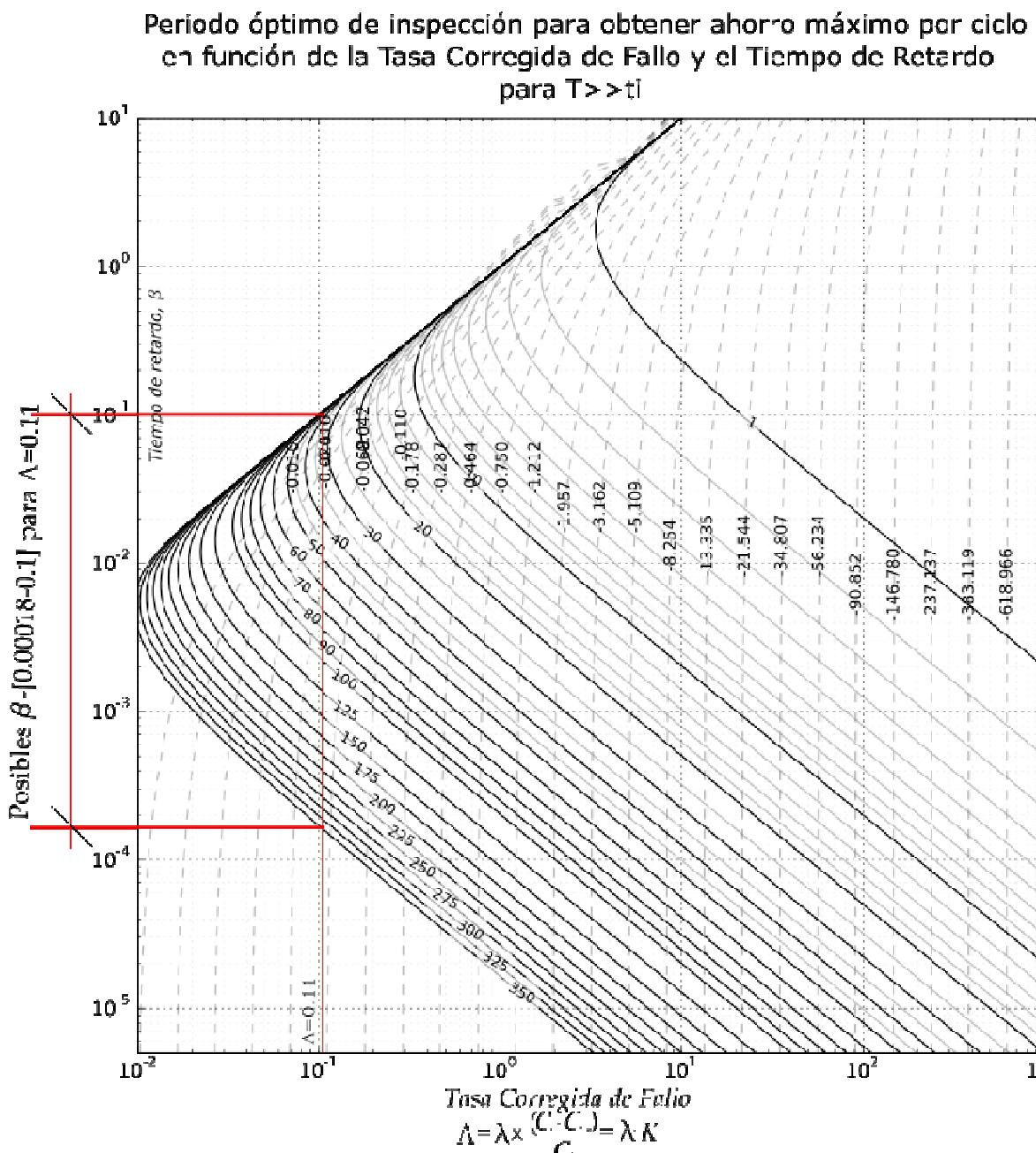


Figura 5.16.: Aplicación del Método Gráfico General al caso de las puertas ferroviarias .

Fuente: Elaboración propia

Como resultado se obtiene que para un valor de la *Tasa Corregida de Fallo* de $\Lambda=0.1125$ se dan resultados desiguales para los extremos del rango de posibles tasas de tiempo de retardo β . Extrayendo del gráfico los valores del *Coeficiente de Ahorro* para los valores extremos y medio del rango de valores de tasas de tiempo de retardo β posibles, se calcula el ahorro para cada β utilizando la expresión:

$$A(T) = -C_i \cdot \psi$$

[5.23]

Dado que el coste máximo no varía,

$$C_{\max} = \lambda \cdot C_b = 0.0005 \cdot 2350 = 1.175 \text{ u.m} \quad [5.24]$$

Se puede tabular el coste y periodo óptimo para el ahorro que corresponde a cada tasas de tiempo de retardo β utilizando la expresión

$$C(T) = C_{\max} - A(T). \quad [5.25]$$

Los resultados se recogen en la siguiente tabla:

Tasa tiempo retardo	tiempo medio de retardo	Periodo óptimo	coeficiente de ahorro	Ahorro máximo	Coste mínimo por día y puerta	coste mínimo para 1440 puertas	coste mínimo anual 1440 puertas
$\beta = 1.8 \cdot 10^{-4}$	5556	320 días	-0.1	1.062	0.113	163 u.m.	49.630 u.m.
$\beta = 0.01$	100	50 días	-0.0685	0.685	0.49 u.m	706 u.m.	215.208 u.m.
$\beta = 0.1$	10	37 días	-0.0025	0.025	1.15 u.m.	1656 u.m.	505.080 u.m.

Tabla 5.8.: Resultados de periodo óptimo, coste mínimo y ahorro máximo para tres tasas de tiempo de retardo. Fuente: Elaboración Propia.

Los valores obtenidos delatan la relevancia del valor de la tasa de tiempo de retardo en este caso:

- Valores de tiempo de retardo bajos indican que pasarán pocos días desde que un defecto es detectable mediante una inspección hasta que dicho defecto se convierte en un fallo penalizable. Estos valores obligan a políticas de inspección de elevada frecuencia que conllevan un coste elevado tanto por las inspecciones como por el riesgo de que acaezca un fallo penalizable.
- Del mismo modo, valores de tiempo de retardo altos implican que pasarán años desde que un defecto es detectable mediante inspección hasta que degenera en un fallo penalizable. De hecho, podría darse el caso de obtener tiempos medios de retardo por encima de la vida útil del equipo. Obviamente los valores elevados llevarán a estrategias de mantenimiento en los que las políticas de inspección exigirán muy baja frecuencia pudiendo incluso llegar a ser de nula utilidad.

La aplicación del Método Gráfico General a este caso permite extraer las siguientes conclusiones:

- La hipótesis de trabajo consistente en tomar la tasa de tiempo de retardo idéntica a la tasa de ocurrencia de fallos cuando solo esta última está disponible no es válida en todos los casos. La mera observación visual del ábaco del Método Gráfico General delata que el *Coeficiente de Ahorro* disminuye a medida que aumenta la tasa de tiempo de retardo para *Factores de Coste bajos*
 - Por otra parte, el ábaco del Método Gráfico General permite discernir los casos en los que la *tasa de tiempo de retardo* resultará una variable transcendente y cuando no. Así, para valores elevados del *factor de coste*, se observa que prácticamente no hay variación del *coeficiente de ahorro* en función de la *tasa de tiempo de retardo*. En el ábaco reproducido a continuación se ha marcado la zona aproximada en la que la *tasa de tiempo de retardo* no influye de manera decisiva en el resultado final. Esta zona indica el rango de aplicación del método simplificado.

Periodo óptimo de inspección para obtener ahorro máximo por ciclo en función de la Tasa Corregida de Fallo y el Tiempo de Retardo

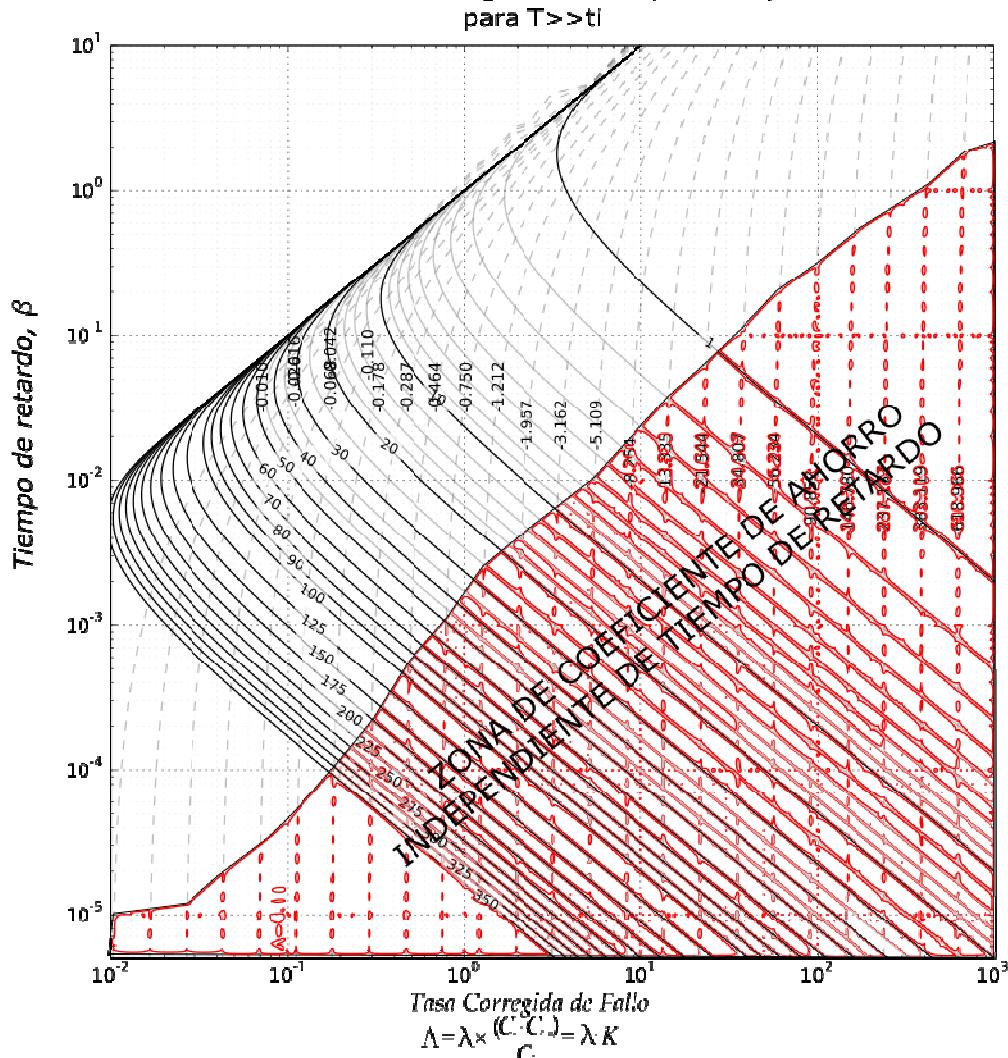


Figura 5.17.: Aplicación del Método Gráfico General al caso de las puertas ferroviarias .
Fuente: Elaboración propia

Para los casos fuera de la zona marcada, resultará conveniente el ajustar el *tiempo de retardo* utilizando o bien los métodos objetivo o subjetivo expuestos en el Capítulo 4 y cuya aplicación se demuestra mediante la aplicación al caso objeto de estudio en la siguiente sección.

5.2.6. Estimación de la tasa de tiempo de retardo.

En el apartado anterior se ha utilizado el método gráfico desarrollado para exponer la influencia de la tasa de tiempo de retardo en el cálculo del periodo óptimo. El gráfico resulta de gran utilidad en un caso, como el particular, en el que se desconoce la tasa de tiempo de retorno. Para poder estimar correctamente el valor de la tasa de tiempo de retardo pueden utilizarse los métodos objetivos o subjetivos descritos en el Capítulo 4, apartado 4.3.3.:

- Métodos Objetivos: En el caso de que en la explotación de referencia hubieran existido datos históricos suficientes sobre la frecuencia de las inspecciones, reparaciones y penalizaciones, se podría utilizar el método de máximos verosímiles para caracterizar los parámetros del modelo, a saber, la tasa de ocurrencia de fallos y la tasa de tiempo de retardo cuando como en este estudio, se utilizan distribuciones exponenciales para ajustar ambos parámetros. En este Capítulo 5, en el que se pretende validar el Método Gráfico desarrollado en el Capítulo 4, no procede aplicar un método objetivo para la obtención del tiempo de retardo dado que:
 - Para poder aplicar el método de máximos verosímiles sería necesario generar datos históricos ficticios sobre la frecuencia de las reparaciones y penalizaciones, lo que anularía la validez del resultado.
 - Una vez generados los datos ficticios, se procedería a aplicar el método de máximos verosímiles según la formulación expuesta en el apartado 4.3.3. Se trataría por tanto de resolver un problema de regresión, estrictamente matemático, del que existen numerosos ejemplos de resolución en la bibliografía del Método del Tiempo de Retardo, como en los casos prácticos descritos por Christer (1995), Kwang-Mook (1997), Baker y Wang (1991), Baker (1997), Tang (2014) y otros.

Por tanto la obtención del tiempo de retardo por métodos objetivos en este caso no conllevaría aportación alguna, tanto por tratarse de la resolución de un problema de regresión resuelto hace décadas como por exigir la elaboración de un conjunto de datos ficticios, anularían la validez del resultado.

- Métodos Subjetivos: En el caso de la explotación de referencia no existen datos históricos porque la operación no cuenta con recursos humanos e

informáticos suficientes para la recogida de datos. En este ejemplo de las puertas exteriores se cuenta con la tasa de ocurrencia de fallos aportada por el fabricante, que se confía haya particularizado a la operación en particular (velocidad, número de paradas, etc....). Sin embargo, para estimar la tasa de tiempo de retardo al no existir datos históricos se ha recurrido a los denominados Métodos Subjetivos, en los que se utiliza el criterio de los ingenieros y técnicos de mantenimiento con experiencia para ajustar el tiempo de retardo.

Para conocer cualitativamente el rango de trabajo en el caso bajo estudio, se discutió la naturaleza del mismo con el responsable de mantenimiento de la explotación. Inicialmente se instruyó al ingeniero sobre los conceptos básicos del Método de Tiempo de Retardo, así como sobre la influencia de las variables - descritas en el apartado 4.3.3. - HCT (hace cuanto tiempo) y CTM (cuanto tiempo más), para que así pudiera aportar una opinión técnicamente informada. Entonces, en base a su experiencia con las puertas exteriores, el ingeniero propuso un tiempo de retardo aproximado de unos 10 días, siendo este el tiempo entre que un defecto puede ser observado y la degeneración de dicho defecto en fallo.

Una vez estimado un tiempo de retardo de 10 días, equivalente a una tasa de tiempo de retardo de $\beta = 0.1$, se utilizaron los nomogramas desarrollados para discutir con el ingeniero de mantenimiento el resultado (periodo óptimo 37 días) y llevar a cabo un sencillo análisis de sensibilidad visual, para entender la concavidad en las inmediaciones de dicho óptimo.

Tasa tiempo retardo	tiempo medio de retardo	Periodo óptimo	coeficiente de ahorro	Ahorro máximo	Coste mínimo por día y puerta	coste mínimo para 1440 puertas	coste mínimo anual 1440 puertas
$\beta = 0.1$	10	37 días	-0.0025	0.025	1.15 u.m.	1656u.m.	505.080 u.m.

Tabla 5.9. :Resultados de periodo óptimo, coste mínimo y ahorro máximo para $\beta = 0.1$. Fuente:
Elaboración Propia.

El ingeniero de mantenimiento de la explotación proponía, antes de la aplicación del método, y en base a su experiencia, bajar el periodo actual de inspección a una frecuencia mensual para acotar las grandes penalizaciones existentes. La aplicación del método gráfico en este caso aportó una solución cuantitativa dependiente de un parámetro - tiempo de retardo - estimado subjetivamente. Sin embargo, la mayor aportación del método en este caso es el poder aportar una gran potencia de análisis de sensibilidad visual, imprescindible en casos como este en el que alguno de los parámetros no puede determinarse con exactitud por falta de datos históricos.

5.2.7. Cálculo de Coste de Ciclo de Vida (LCC).

Una vez estimados los costes de mantenimiento anuales será necesario estimar los costes del ciclo de vida LCC. Este enfoque permite:

- Entender el impacto de las decisiones con la perspectiva del ciclo de vida.
- Homogeneizar la base de los cálculos de optimización con los criterios de diseño exigidos en pliego, frecuentemente en base de ciclo de vida

Se procede a proyectar la variación de los costes de mantenimiento calculados a lo largo de los años de duración del contrato t , para luego descontarlos con una tasa k y hallar así el valor actual neto:

$$LLC = \sum_{t=1}^n \frac{(Coste\ anual)_t}{(1+k)^t} \quad [5.26]$$

En el Capítulo 4 se expusieron, como parte de la presentación de la metodología, los criterios de selección de la tasa de descuento y de la variación de costes anuales. En el ejemplo utilizado para ilustrar esta metodología se han tomado los siguientes valores:

- Tasa de descuento: 8% TAE
- Incremento anual costes: 5% anual.

Dado que el coste anual depende del periodo de inspección, se procede a representar el Coste de Ciclo de Vida (LCC) en función del periodo de inspección. Se observa, que el periodo óptimo para el cual el Coste de Ciclo de Vida (LCC) es mínimo coincide con el periodo óptimo hallado para el resto de casos (coste anual unitario, coste anual de la flota).

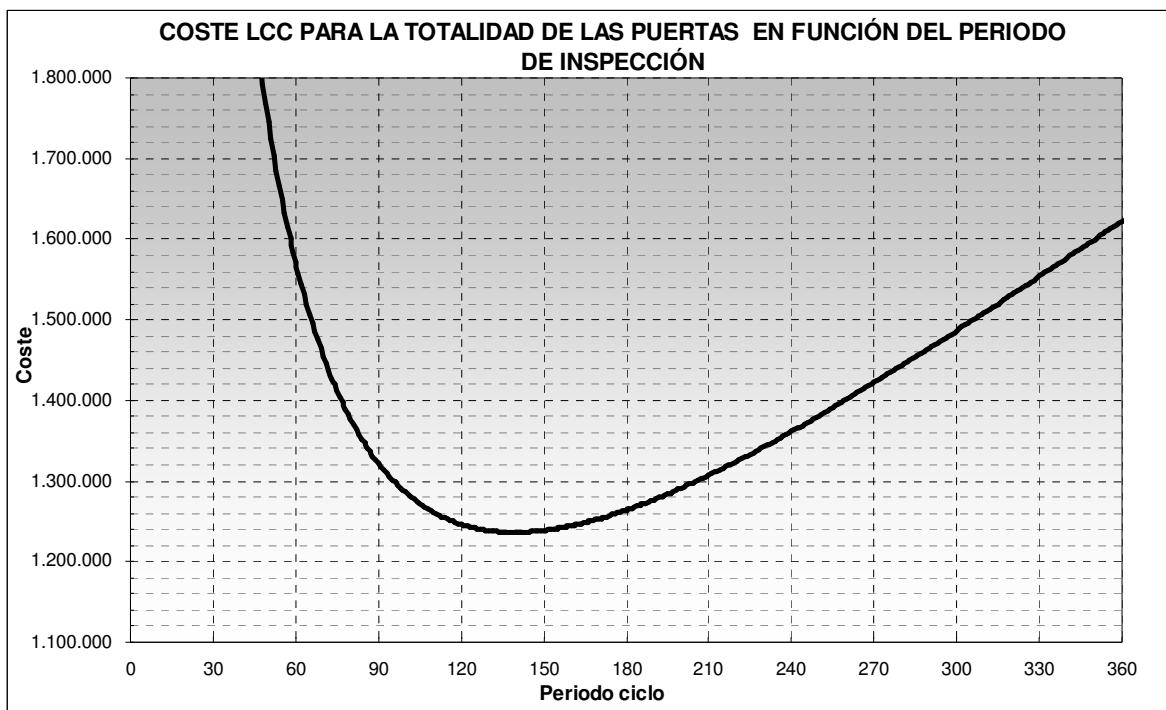


Figura 5.18.: Coste LCC para la totalidad de las puertas en función del periodo de inspección . Fuente: Elaboración propia

Al pasar al coste global en la vida útil se observa una importante variación en la magnitud de los valores en el eje de ordenadas. Los valores de coste óptimo, que en cálculos anteriores estaban en el orden de magnitud de las decenas, se convierten en valores en el rango de cientos de miles de euros. Variando la escala en ordenadas se aprecia con mayor claridad el impacto global en la vida útil del tren de seleccionar una política de inspecciones óptima.

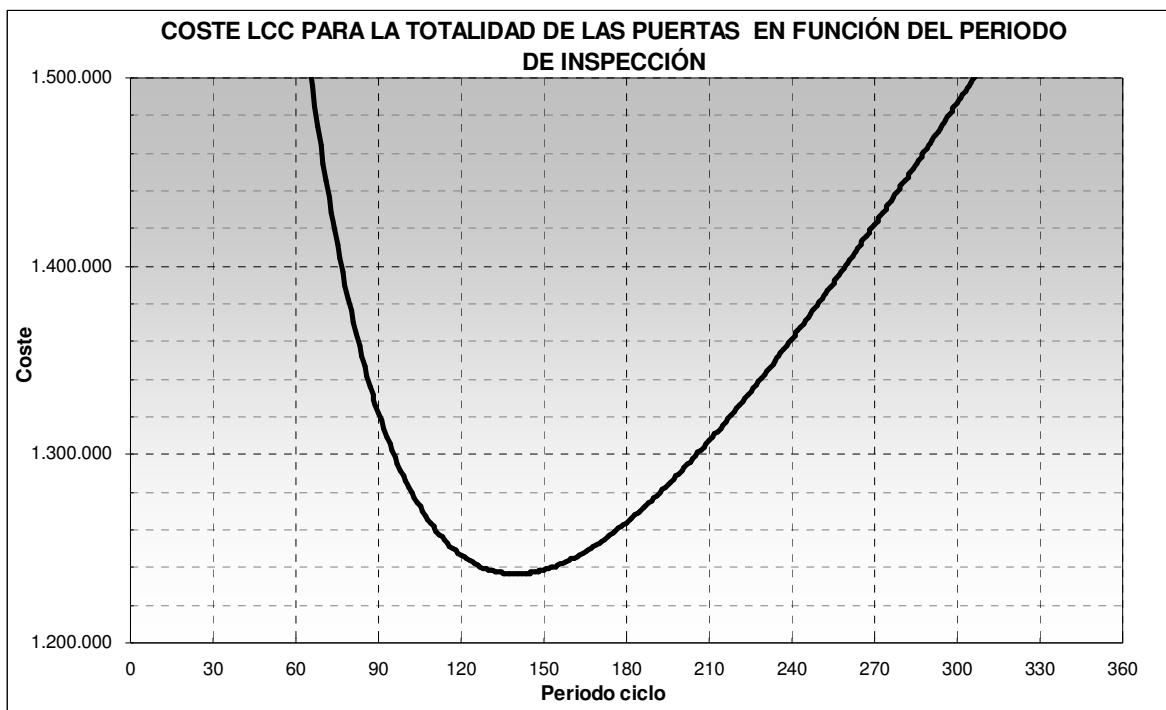


Figura 5.19.: Coste LCC para la totalidad de las puertas en función del periodo de inspección; escalado apropiado para resaltar la solución . Fuente: Elaboración propia

5.3. ADAPTACIÓN DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE COSTES DE MANTENIMIENTO DE FLOTAS DESARROLLADO.

5.3.1. Motivación y utilidad

La transferencia de tecnología entre campos de la ingeniería es tradicionalmente motor de mejora continua. En el caso que nos ocupa se propone cierta transferencia del conocimiento y herramientas desarrolladas en las últimas décadas en el campo de la ingeniería de la construcción al campo de la ingeniería del mantenimiento. Las herramientas y conceptos presentados en este capítulo se utilizan de manera universal en la gestión de costes de proyectos de construcción (de plantas industriales, centrales térmicas, carreteras, edificios....), tanto en la fase de diseño como de ejecución de la obra. El tamaño y complejidad de estos proyectos así como la profusión de los mismos ha impulsado el desarrollo de diferentes soluciones informáticas de gestión de costes de gran potencia y versatilidad. Estos paquetes informáticos se han popularizado y convertido en instrumentos de uso universal, del mismo los programas de diseño asistido por ordenador lo hicieron hace décadas.

En el campo del mantenimiento ferroviario por contra, no existen herramientas universalmente aceptadas para el diseño del plan de mantenimiento ferroviario y por tanto para su optimización. Como ya se introdujo en los capítulos correspondientes al marco teórico, existen varias tipologías de software, cada una centrada en un aspecto del problema:

- Herramientas de gestión del mantenimiento

Por una parte, cualquier explotación de mantenimiento (de una mina, de una fábrica, de una flota ferroviaria....) suele contar con un software de gestión del mantenimiento, denominados GMAO (Gestión del Mantenimiento Asistida por Ordenador). Estas herramientas informáticas se encargan de generar los partes de trabajo diarios, de recoger las incidencias o correctivo, de llevar la contabilidad de la operación, gestionar el almacén, etc...Estos paquetes pueden ser independientes o ser uno de los módulos del software de gestión global de la empresa, el ERP (Enterprise Resource Planning) y son la herramienta de uso diario de la empresa.

Aunque su uso está muy generalizado, no suelen ser herramientas que se utilicen para el diseño y optimización del plan de mantenimiento (y la aplicación de principios de ingeniería de fiabilidad), sino más bien para la

gestión de la operación diaria de la explotación. En todo caso, a la vista de la estructura del mercado, parece evidente que esta tipología de herramientas terminen incorporando este tipo de características.

- Herramientas de ingeniería de la fiabilidad

Por otra parte existen herramientas centradas en la ingeniería de la fiabilidad, como por ejemplo los ofrecidos por Reliasoft (λ Predict, Weibull++, XFMEA, RCM++) que pretenden asistir al ingeniero a diseñar el plan de mantenimiento. Estas soluciones ajustan distribuciones estadísticas según los resultados de tests de vida acelerados, permiten estimar las tasas de fallo diseñando los diagramas de bloques de fallo, etc....

Estas herramientas son por tanto de gran utilidad durante la fase de diseño o revisión del plan desde el punto de vista de la fiabilidad, pero no contemplan con la intensidad suficiente la parte de gestión de costes, centrándose en la obtención de los parámetros de fiabilidad.

- Herramientas de optimización de costes de mantenimiento

En los últimos años han aparecido herramientas de optimización de costes de mantenimiento basadas en modelos matemáticos avanzados. Estas herramientas suelen ser desarrolladas en universidades en las que la investigación en modelos de optimización del mantenimiento ha sido tradicionalmente un campo de trabajo. Estos paquetes recogen el conocimiento adquirido durante la investigación y aplicado a casos de transferencia tecnológica, por lo que aportan gran rigor científico.

De los cientos de modelos matemáticos desarrollados por la comunidad científica para intentar adaptarse a la infinita casuística práctica, estas herramientas recogen los modelos básicos de optimización, por lo que en cada caso práctico requieren la intervención de un experto que seleccione el enfoque, parametrice el problema y acote el error. La brecha entre este tipo de herramientas y su aplicación práctica ralentizan su difusión, quedando patente la brecha entre ciencia y tecnología existente en el campo de la optimización de costes de mantenimiento.

Un ejemplo de este tipo de herramientas son el paquete MORE (Maintenance, Optimization and Reliability Engineering) desarrollados por Dr. Andrew K.S. Jardine y su equipo de la Universidad de Toronto.

- Herramientas de cálculo de costes de mantenimiento de flotas ferroviarias

La iniciativa más relevante para la unificación de criterios de cálculo de costes de mantenimiento de flotas fue el programa impulsado por UNIFE, la asociación europea de fabricantes de material rodante y que se materializó en del desarrollo de una metodología plasmada en unas hojas de cálculo denominadas UNIDATA y UNILIFE para el cálculo de costes de mantenimiento de la flota.

Como ya se expuso en capítulos anteriores, esta iniciativa no prosperó más allá del desarrollo de las citadas hojas de cálculo, que gracias a la relevancia de UNIFE tuvieron gran difusión. Obviamente, las hojas de cálculo no resultan una herramienta con la suficiente potencia de cálculo para abordar un estudio de la magnitud del mantenimiento de una flota.

A la vista del escenario brevemente expuesto en los párrafos anteriores, la **motivación** en esta investigación adaptar una herramienta informática proveniente del mundo de la planificación y control de costes en los proyectos de construcción para que incluya el modelo de cálculo desarrollado. La **utilidad** de la adaptación es clara, pues permitirá disfrutar de la potencia de una herramienta de gestión de costes de uso universal y a su vez utilizar fácilmente el modelo desarrollado.

5.3.2. Presentación de la herramienta

5.3.2.1. Los programas de gestión de costes y el estándar FIEBDC

Los programas de gestión de costes para la edificación y la obra civil son utilizados por los diferentes agentes del sector de la construcción (proyectistas, gestores de proyecto, constructores, promotores, "epecistas",.....) para estimar los costes de construcción de un determinado proyecto.

Tradicionalmente las estimaciones de los costes de una obra se calculaban utilizando planillas en papel, que debían de ser rellenadas manualmente. Para hacer una estimación con una planilla había que seguir varios pasos:

- Inicialmente había que listar todos los conceptos de la obra, por ejemplo para instalar una arqueta: vallar el perímetro, desbrozar el terreno, excavar el hueco, hormigonar el fondo, posicionar la arqueta, llenar con tierras, compactar y limpiar.
- A continuación el estimador tenía que indicar el precio unitario del concepto. El estimador experimentado se desarrollaba con los años un precio de cada concepto que comprendía los descompuestos en unitarios. Así, el precio del metro cúbico de hormigón en zapatas de cimentación tenía que contar con el

coste por metro cúbico de hormigón así como la mano de obra necesaria para verterlo y todos los materiales auxiliares (encofrado, etc....). Con el tiempo llegaron a existir voluminosos vademecums con los precios unitarios de cada concepto, de manera que el estimador podía guiarse por dichos precios estándar, ajustando el valor de referencia del vademecum según el rendimiento que .

- A continuación había que llevar a cabo la medición, es decir, cuantificar el concepto seleccionado indicando cuantos metros cúbicos, kilos o unidades se iban a ejecutar en dicha obra.
- Finalmente, teniendo el concepto, su precio unitario y las unidades a ejecutar en la obra, se obtenía el precio de la partida como producto de los anteriores.

Repetiendo este proceso miles de veces se obtenía una planilla con los costes totales de obra.

INITIAL SITE WORK																
JOB NO. AND TITLE		92-143 New Manufacturing Plant														
QUANTITY		UNIT COST		MHHS			EQUIPMENT		MATERIAL		LABOR		SUB-CONT.		TOTAL	
ITEM AND DESCRIPTION	UNIT	UNIT	UNIT	M	H	S	UNIT	TOTAL	UNIT	TOTAL	UNIT	TOTAL	UNIT	TOTAL	UNIT	TOTAL
Clear & Grub	AC	35	.008	3570	18	35	42000	175200	65	150	65	150	12	10745	12	10745
Strip Topsui	cy	46	000	368	18	35	14800	14800	6700	6700	27400	27400	12	21500	12	21500
Foundation Excavation	cy	12000	125	150	18	35	29000	29000						56400		56400

Figura 5.20.: Estadillo de costes manuscrito. Fuente: Gshills - scanned from personal paper files. Licensed under CC BY-SA 3.0 via Wikipedia - [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Old_handwritten_estimate.png](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Old_handwritten_estimate.png#/media/File:Old_handwritten_estimate.png)

El proceso resultaba verdaderamente laborioso y muy susceptible a errores de cálculo. Con la popularización de las hojas de cálculo se continuó utilizando la misma metodología: descripción de los conceptos de obra, medición de las partidas de la obra y tarificación de precios mediante manual de referencia o experiencia. Obviamente las hojas de cálculo facilitan la estimación, especialmente en proyectos pequeños, pero se trata simplemente de las mismas planillas originales mecanizadas, por lo que el avance afecta principalmente a la potencia de cálculo. En el mundo del cálculo de costes de mantenimiento ferroviario las hojas de cálculo siguen siendo utilizadas con profusión, siendo un buen ejemplo la herramienta UNILIFE/UNIDATA desarrollada por UNIFE, que todavía constituye la principal referencia del sector ferroviario.

Sin embargo, en el campo de la construcción hace ya décadas se comenzaron a popularizar programas de gestión y control de costes, que mediante el uso de bases de datos intercambiables han conseguido desarrollar sistemas que presentan grandes ventajas, aplicables al caso del mantenimiento de flotas:

- Elevada productividad: El uso de bases de datos con los conceptos y precios predefinidos aporta una gran productividad al estimador, pudiendo ahora preparar el presupuesto de ejecución de un proyecto en una fracción mínima del tiempo del que necesitaba hace un par de décadas. Esta característica es atractiva para el cálculo del coste del plan de mantenimiento de una flota pues presenta una estructura y envergadura similar a un proyecto de construcción en lo que a estimación de costes se refiere.
- Homogeneización de los criterios y formatos de cálculo: dado que las bases de precios y los conceptos están estandarizados, las bases de datos con estimaciones de costes presentan una estructura homogénea. Esto evita el uso de hojas de cálculo personalizadas, que son fuente de incompatibilidad entre las partes, de errores de cálculo y de baja productividad.
- Exportación e intercambio de datos: precisamente la homogeneización hace que las bases de datos sean fácilmente exportables a otros formatos (programas de gestión de proyectos, editores de texto, hojas de cálculo....) e intercambiables entre diferentes usuarios que incluso pueden trabajar sobre el mismo proyecto simultáneamente.
- Adaptación al proyecto: la orientación de estos programas es la propia de la construcción o proyecto, diferente en forma a la de la contabilidad analítica o a la generada por los programas de facturación o de gestión integral (ERP).
- Potencia de Análisis: quizás la ventaja más destacable es la potencia de análisis que ofrece una vez preparado el presupuesto:
 - Seguimiento de costes de ejecución: permite estudiar los costes reales del proyecto global a medida que se ejecuta, entendiendo desviaciones y sobrecostes.
 - Informes: La capacidad de emisión de informes es prácticamente ilimitada, lo que sería de gran utilidad en el campo ferroviario para poder emitir informes de mano de obra, materiales, inventario, fallos, etc... Al añadir información a los conceptos, los informes pueden ser no solo numéricos sino incluir información sobre la gestión de residuos, el procedimiento de ejecución de la tarea de mantenimiento, etc....
- Personalización: todos estos programas de gestión permiten la personalización de los conceptos, pudiendo incluso hacerse paramétricos. Durante esta investigación se ha utilizado parcialmente esta capacidad, dejando como futura línea de trabajo el desarrollo de una API (Application Programming Interface o interfaz de programación de aplicaciones) para personalizar completamente los conceptos al mantenimiento ferroviario.

Como resultado de los esfuerzos de homogeneización iniciados en 1992, en 1996 se crea FIE-BDC, una asociación constituida para definir y supervisar el Formato de Intercambio Estándar de Bases de Datos para la Construcción (FIEBDC). Esta asociación comprende a la mayoría de empresas desarrolladoras de programas de gestión de costes, asegurando así la intercambiabilidad de información entre todos ellos. Esta asociación ha conseguido que los productos susceptibles de ser intercambiados (bases de datos, presupuestos elaborados, etc.), estén estructurados según el formato de intercambio establecido.

5.3.2.2. El software de gestión de costes "Arquímedes"

A la hora de adaptar un programa de gestión de costes de la construcción al campo del mantenimiento de flotas procede comenzar seleccionando una solución comercial sobre la que trabajar. Gracias al estándar FIEBCD presentado en la sección anterior, la elección pierde relevancia, pues la metodología que se va a desarrollar para la adaptación podría reproducirse para cualquier programa. La elección del programa "Arquímedes" de la empresa Cype Ingenieros obedece a dos razones:

- Arquímedes es una herramienta de máxima potencia que goza de gran popularidad en todos los países de habla hispana.
- La existencia de una versión para estudiantes gratuita, que facilita la continuación de la investigación a terceros

Como el resto de programas de su categoría, Arquímedes es un gestor de una base de datos denominada habitualmente "presupuesto", que se alimenta de una segunda base de datos denominada "base de precios", que es donde reside la información sobre los conceptos. Es decir, por una parte existe una base de datos con la estructura general o escandallo que es el presupuesto en sí, y ésta se completa utilizando la base de datos de precios que recoge precios e información sobre los conceptos a utilizar. Una vez llevados los conceptos al presupuesto se añaden sobre este las mediciones, que son las cantidades de cada concepto para la obra en particular. La siguiente figura son representativas del funcionamiento general de Arquímedes.

The screenshot shows the Arquímedes software interface. At the top, there are three red arrows pointing from the text labels to specific parts of the software:

- A red arrow points from "Capítulo 'Estructuras'" to the chapter icon in the tree view.
- A red arrow points from "Subcapítulo 'Hormigón Armado'" to the subchapter icon in the tree view.
- A red arrow points from "Partida 'Losa de Escalera'" to the item icon in the tree view.

SADF: Árbol de descomposición

Estructura de hormigón armado HA-25/B/20/IIa fabricado en central y vertido con c

Código	Doc.	Pli	GR	Ud	Resumen	Cant	Coste	Importe
SADF					EJEMPLO DE PRESUPUESTO: PEM CONSTRUCCIÓN DE UN EDIFICIO	1,000	184.818,13	184.818,13
A					Acondicionamiento del terreno	1,000	3.692,84	3.692,84
C					Cimentaciones	1,000	6.695,02	6.695,02
E					Estructuras	1,000	22.636,06	22.636,06
L					Hormigón armado	1,000	22.636,06	22.636,06
EH	EHE010	EHE			m ² Losa de escalera, HA-25/B/20/IIa fabricado en central y vertido con c	11,660	128,97	1.503,79
	mrt08eve010				m ² Montaje y desmontaje de encofrado para losas inclinadas de esc	1,250	24,49	30,61
	mrt08eve020				m ² Montaje y desmontaje de encofrado para formación de peldañead	0,900	13,40	12,06
	mrt07aco02..				Ud Separador de plástico rígido, homologado para losas de escalera	3,000	0,07	0,21
	mrt07aco01..				kg Acero en barras corrugadas, UNE-EN 10080 B 500 S, elaborado e	30,000	0,91	27,30
	mt10haf01..				m ³ Hormigón HA-25/B/20/IIa, fabricado en central vertido con cubilote	0,325	70,20	22,82
	mo011				h Oficial 1 ^a construcción.	0,617	21,02	12,97
	mo046				h Ayudante construcción.	0,617	18,86	11,64
	mo060				h Peón ordinario construcción.	0,308	16,69	5,14
	% %				% Costes directos complementarios	2,000	122,75	2,46
	EHU005	EHU			m ² Forjado sanitario, canto 30 = 25+5 cm; HA-25/B/20/IIa fabricado en c	75,000	124,04	9.303,00
	EHU020	EHU			m ² Estructura de hormigón armado HA-25/B/20/IIa fabricado en central	142,230	83,17	11.829,27
F					Fachadas	1,000	17.415,22	17.415,22
P					Particiones	1,000	12.497,36	12.497,36
I					Instalaciones	1,000	23.005,49	23.005,49
N					Aislamientos e impermeabilizaciones	1,000	3.141,00	3.141,00
Q					Cubiertas	1,000	8.339,90	8.339,90
R					Revestimientos	1,000	22.681,99	22.681,99
S					Re señalización y enquinamiento	1,000	5.708,17	5.708,17

Detalle de medición

	Certificado	Medido	Diferencia							
	0,000	142,230	-142,230							
Loc	Comentario	Fórmula	A	B	C	D	E	F	Parcial	Subtotal
			Uds.	Largo	Ancho	Alto				
1	Planta 1		1	75,00						75,000
2	Cubierta		1	75,00						75,000
3	Adescontar: huecos de escalera		1	-7,77						-7,770
[1]									142,230	142,230
									142,230	142,230

Figura 5.21.: Vista general del software de presupuestos indicando capítulo, subcapítulos, partidas, precios unitarios, mediciones y precios totales. Fuente: Elaboración propia con software Arquímedes de Cype Ingenieros

En la figura anterior se observa cómo el presupuesto general del proyecto de construcción de un edificio se construye a partir de un escandallo de capítulos cuya suma corresponde al total del proyecto. Los capítulos engloban trabajos de naturaleza similar y suelen estar clasificados y ordenados según la lógica de ejecución de la obra. Así, en la ilustración se observan los capítulos de: Acondicionamiento del terreno, cimentaciones, estructuras, fachadas, particiones, etc...

El siguiente nivel en el escandallo del presupuesto es el subcapítulo, que es un anidamiento bajo los capítulos. en el capítulo tomado de ejemplo "Estructuras" solo existe una subcapítulo denominado "Hormigón armado". En el caso de otra tipología de proyecto podrían aparecer subcapítulos correspondientes a otras tipologías de estructura, como "Estructura metálica" o "estructura de madera". Los capítulos y subcapítulos no contienen información de precios ni cantidades. Bajo los subcapítulos se agrupan las "partidas", que es la unidad de obra que describe cada trabajo a ejecutar. En el ejemplo de la ilustración el subcapítulo "Hormigón armado" contiene tres partidas: "Losa de escalera [...]", "Forjado sanitario [...]" y "Estructura de hormigón armado [...]. Conociendo la cantidad y precio de cada partida se calcula el coste del subcapítulo.

Una partida o unidad de obra es cada uno de los componentes unitarios en los cuales se puede descomponer una obra o proyecto, a efectos de medición y valoración y se expresa con la unidad de una magnitud física: kg de estructura metálica, m³ de hormigón, metros de zanja....es la parte principal del presupuesto de ejecución y la suma de las unidades de obra constituye el coste global del presupuesto, independientemente de cómo se ordenen dentro de los capítulos y subcapítulos. La partida está compuesta por una descripción de la misma, su precio y la cantidad de la misma que se utilizará en el proyecto.

Para calcular el precio unitario de la partida se utilizan descompuestos o auxiliares. Así, la partida "Losa de hormigón [...]" del ejemplo está compuesta por cuatro precios descompuestos de los diversos materiales necesarios para construir un m³ de losa de hormigón (encofrado, hormigón, barras corrugadas...) así como de tres precios descompuestos con la mano de obra que se utiliza en la construcción de dicho m³ de losa de hormigón.

Respecto a la medición, en el caso de ejemplo el proyectista ha determinado directamente que hay 128,97 m³ de hormigón en la losa de la obra. El programa permite también, para el caso de mediciones complejas, descomponer el total de la cantidad de la partida utilizando la ventana inferior denominada "detalle de medición".

Por tanto, el conocimiento dentro del presupuesto se recoge en la partida o unidad de obra, y son precisamente estas partidas, con sus descripciones y precios descompuestos las que se recogen en las denominadas "Bases de precios". La siguiente ilustración refleja la partida "Losa de hormigón [...]" de la base de precios utilizada. Como se puede observar, en este caso se trata de una partida paramétrica, en la que el proyectista selecciona las variables principales de la losa (espesor, cuantía de armado, tipo de hormigón....) y la base de precios calcula directamente el precio unitario de la losa de hormigón confeccionada.

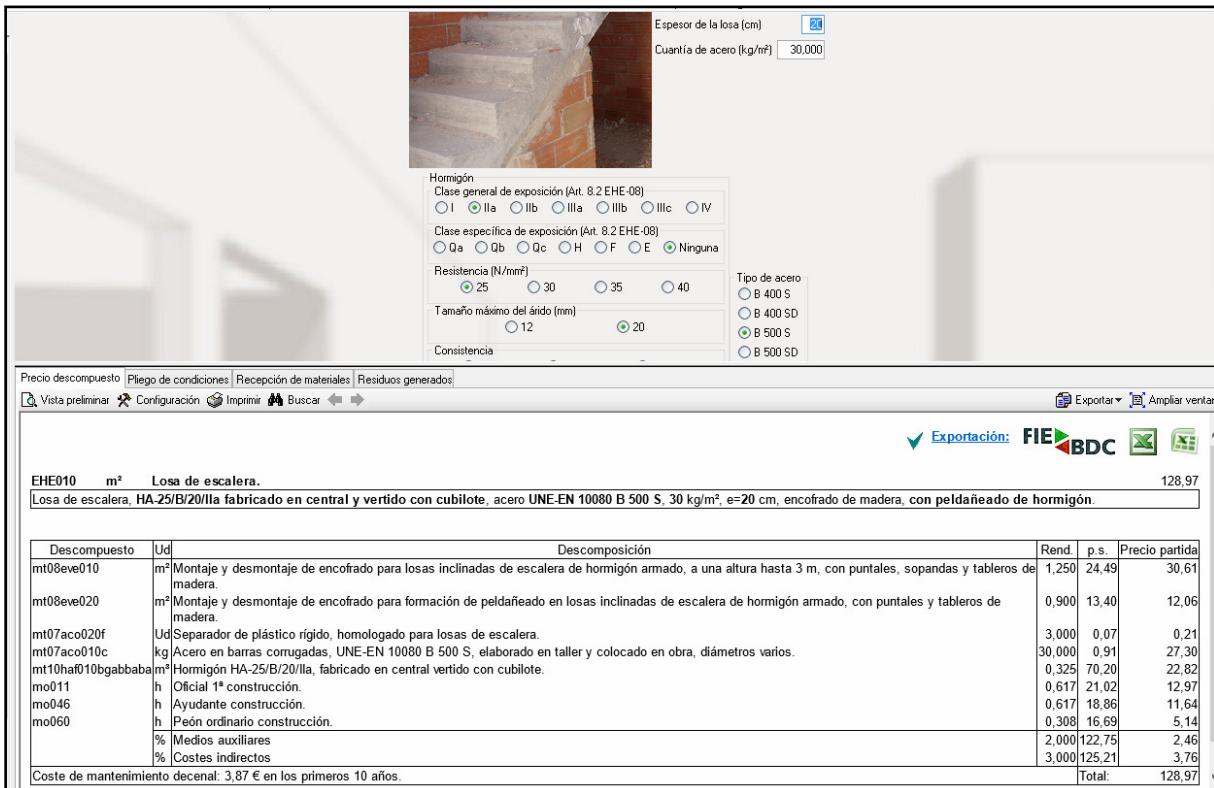


Figura 5.22.: Vista general de una partida paramétrica de una base de precios Fuente:
Elaboración propia con software Arquímedes de Cype Ingenieros

Una vez completadas las partidas y mediciones que componen cada subcapítulo y capítulo se pueden calcular en un capítulo independiente los costes indirectos de la obra (honorarios ingeniero, jefe de obra, luz de obra....) y añadirle los gastos generales y el beneficio industrial.

Una vez confeccionado el presupuesto general de la obra, el programa aporta gran potencia tratamiento de la información de gran utilidad tanto en la fase de estudio del proyecto como en la fase de ejecución, equiparables a las fases de diseño del plan de mantenimiento y de explotación.

- En la fase de estudio, el programa genera todo tipo de informes detallados como los listados de precios unitarios, las cantidades de mano de obra divididas por categoría y gremio, los listados de materiales, el estudio de los indirectos, etc....
- Además, el programa prepara automáticamente el listado de actividades del cronograma de la ejecución del proyecto, que el proyectista puede asignar tiempos a cada capítulo y subcapítulo para luego poder gestionar el avance utilizando este diagrama de Gantt como base.

- En la fase de ejecución el director de la obra utilizará el programa para certificar las partidas que se van ejecutando, controlando así los costes de ejecución del proyecto a medida que se van incurriendo.

5.3.3. Proceso de adaptación de la herramienta al mantenimiento ferroviario

A la vista de la potencia de cálculo de esta tipología de aplicaciones, resulta de gran interés el estudiar su posible adaptación para el cálculo de los costes de mantenimiento de una flota ferroviaria. Se toma como base de cálculo un periodo temporal de un año, coincidente con el criterio de seguimiento presupuestario de cualquier empresa. Este coste anual de la flota no incluye, como ya se ha expuesto en capítulos anteriores, los costes plurianuales de carácter especial, como las modificaciones, levantes o renovaciones.

Los pasos que se van a seguir para la adaptación son:

1. *Crear la*

El proceso comienza creando una Estructura de Descomposición del Trabajo (EDT) adaptada al caso de una operación de mantenimiento ferroviario. Se trata de generar una descomposición jerárquica de capítulos y subcapítulos que a diferencia de los capítulos típicos de una obra de construcción, tendrá que reflejar la estructura de operaciones anuales en el mantenimiento de una flota.

La estructura de capítulos y subcapítulos variará según las necesidades de cada operación, existiendo en rasgos generales dos posibilidades:

- a. Organización estructural: En este caso se seguirá una jerarquía según la estructura del tren: tren-coche-sistema-subsistema.
- b. Organización funcional: en ciertas explotaciones el mantenimiento se lleva a cabo por equipos claramente diferenciados, por ejemplo, equipos de mantenimiento mecánico, mantenimiento eléctrico y limpieza. En los casos en los que esta distinción sea clara, puede resultar apropiado anidar la estructura de sistema-subsistema bajo un nivel más, quedando clasificado cada sistema bajo unos capítulos más generales denominados sistemas mecánicos, eléctricos y limpieza.

En las capturas de pantalla reproducidas a continuación se observa una propuesta para un ejemplo de una explotación en el que el mantenimiento de una flota se lleva a cabo diferenciando las tres tipologías de sistemas indicadas: mecánicos, eléctricos y limpieza. Además, en este ejemplo se ha incluido un capítulo adicional para contar con el coste del mantenimiento de las propias instalaciones de la explotación (torno de foso, tren de limpieza etc....). Este coste,

se puede también tratar como un coste indirecto, siendo luego repercutido sobre cada partida proporcionalmente.



Figura 5.23.: Vista anidada de los cuatro capítulos principales. Fuente: Elaboración propia con software Arquímedes de Cype Ingenieros

Bajo este árbol general se han creado los subcapítulos correspondientes a cada grupo. Así, se observa cómo bajo el capítulo "Sistemas mecánicos" se han creado siete subcapítulos: suspensiones, frenos, acoplamientos, motor, elementos neumáticos, estructura y rodadura.



Figura 5.24.: Vista del árbol mostrando los subcapítulos del capítulo "Sistemas Mecánicos". Fuente: Elaboración propia con software Arquímedes de Cype Ingenieros

Bajo este nivel se ha creado un segundo anidamiento de subcapítulos, pues cada sistema suele estar formado por un conjunto de elementos más sencillos. Continuando con la ilustración, se observa como el sistema de frenos queda dividido en siete elementos: freno de emergencia, discos de freno, mangueras de freno, brazo de frenado, convertidor hidráulico-neumático e indicador de frenado.

Bajo este nivel ya se encontrarán las partidas que definirán cada una de las actividades a llevar a cabo sobre el elemento particular y que se definen a continuación.

La clasificación de actividades y costes utilizando la Estructura de Descomposición del Trabajo (EDT) aquí presentada permite el posterior estudio

y gestión del plan de mantenimiento. Utilizando la potencia del programa de presupuestos se podrán generar informes (de costes en mano de obra, en materiales, etc....) según la estructura introducida. También facilitará el trabajo de seguimiento de los costes anuales de mantenimiento.

Código	Doc	Pli.	Ud	Resumen
GENERAL ..				Presupuesto plan de mantenimiento ferroviario
- MEC				Sistemas mecánicos
- SUSP				Elementos de suspensiones
- FRE				Elementos de frenos
- F1				Freno de emergencia
- F2				Disco de freno
- F3				Presión sistema de freno
- F4				Mangueras de freno
- F5				Brazo de frenado
- F6				Convertidor hidráulico-neumático
- F7				Indicador de frenado
- ACO				Elementos de acoplamientos
- MOT				Elementos de motor
- NEU				Elementos neumáticos
- EST				Elementos de estructura
- ROD				Elementos de rodadura
- ELE				Sistemas eléctricos
- LIM				Sistemas limpieza
- MANT.INST				Mantenimiento de las instalaciones

Figura 5.25.: Vista del árbol mostrando la descomposición del subcapítulo "Elementos de frenos". Fuente: Elaboración propia con software Arquímedes de Cype Ingenieros

2. Determinar cuales son las partidas o unidades de obra en una operación de mantenimiento de flotas

En el paso anterior tan solo se ha creado un árbol de clasificación de costes. A continuación hay que definir las partidas o unidades de obra en las que queda dividido el mismo. Del mismo modo que una obra contiene partidas de cada uno de los trabajos a ejecutar en el proyecto (zapatas cimentación, instalación eléctrica,etc...), en una operación de mantenimiento todos los trabajos a ejecutar podrán englobarse en trabajos de mantenimiento preventivo programado y trabajos de mantenimiento correctivo no programados. La suma de ambos dará como resultado el coste

Código	Doc	Pli.	Ud	Resumen	Cant	Coste	Importe
PROBAN..				Sistema Tipo			0,00
STATIPO				Sistema Tipo	1,000		
- PREV				Preventivo programado	1,000		
- CORR				Correctivo no programado	1,000		

Figura 5.26.: Descomposición de un sistema tipo en preventivo y correctivo . Fuente: Elaboración propia con software Arquímedes de Cype Ingenieros

A la hora de definir cada una de las subpartidas se deberán describir de acuerdo al modelo matemático de mantenimiento que se vayan a implementar. Así, para

el caso objeto de esta investigación, las partidas a calcular serán las utilizadas en el Modelo de Tiempo de Retardo:

- Coste de inspección periódica programada,
- Coste de mantenimiento correctivo llevado a cabo si se detecta un defecto durante una inspección programada
- Coste de mantenimiento correctivo a incurrir cuando ocurre un fallo revelado, que habitualmente conllevará una penalización.

En el caso de existir políticas de mantenimiento preventivo adicionales a las inspecciones programadas bastará con crear cada una de sus partidas, desacoplando las tareas de mantenimiento preventivo de acuerdo a la naturaleza de las políticas seguidas. Así, junto con las inspecciones programadas podría convivir políticas de reemplazo programado de algunos componentes del sistema, o alguna tarea de mantenimiento basado en la condición (predictivo). El desacople de cada una de las tareas vendrá dado desde la fase de diseño. En el caso objeto de estudio se va trabajar sobre el Modelo de Tiempo de Retardo exclusivamente, por lo que las partidas quedarían ordenadas según la siguiente ilustración.

Código	Doc	Pli	Ud	Resumen	Cant	Coste	Importe
PROBAN..				Sistema Tipo	1,000		
STATIPO				Sistema Tipo	1,000		
PREV				Preventivo programado	1,000		
CI				ud Inspecciones programadas			
CORR				Correctivo no programado	1,000		
Ccm				ud Reparaciones por detección en inspección			
Cp				ud Reparaciones no detectadas, con penalización			

Figura 5.27.: Implementación de los diferentes sumandos del Método de Tiempo de Retardo . Fuente: Elaboración propia con software Arquímedes de Cype Ingenieros

Para calcular el coste anual en inspecciones programadas, reparaciones detectadas en inspecciones y reparaciones de fallos no detectados con posible penalización es necesario calcular tanto el precio unitario de cada partida como su cantidad anual, es decir, su medición.

3. Crear una Base de Datos de Precios descompuestos.

Para poder calcular el coste de cada partida se necesita contar con una base de datos de precios unitarios descompuestos, tanto de materiales como de mano de obra. Esta base de datos variará de operación a operación y en ella residen los costes unitarios que definen la explotación:

- los costes de mano de obra clasificados por profesión y categoría (oficial de primera mecánico, peón eléctrico, etc...)
- Los costes de todos los repuestos y materiales necesarios para todas las operaciones de mantenimiento.
- Las tipologías de penalizaciones según contrato: confort, servicio, retrasos, cancelaciones....

A continuación se reproduce parcialmente una base de datos de precios elaborada a modo de ejemplo.

Código	Doc.	Pli.	Ud	Resumen	Cant.	Coste	Importe
SUB				subacarpetas	1,000		
L Sub				Subcarpetas	1,000		
L OMP				Operarios, Materiales, Penalizaciones	1,000		
L Operarios				Operarios tipos			
L OMEC				Horas Oficial Mecánico		20,00	
L PMEC				Horas Peón Mecánico		15,00	
L OELE				Horas Oficial eléctrico		20,00	
L PELE				Horas Peón eléctrico		15,00	
MAT				Materiales			
S1M				ud Balona de la suspensión		500,00	
S2M				ud Viga de la suspensión		200,00	
F2M				ud Disco de freno		100,00	
F5M				ud Brazo de frenado		500,00	
F6M				ud Convertidor Hidráulico-Neumático		500,00	
F7M				ud Indicador de frenado		50,00	
A1M				ud Acoplador automático		300,00	
A2M				ud Goma de acoplamiento		200,00	
A3M				ud Absorbedor de choques		150,00	
M1M				litros Aceite motor		6,00	
C1M				ud Climatizador		9.000,00	
%Mat				% Materiales Auxiliares			
PEN				Penalizaciones			
CONF				ud Fallo de confort		200,00	
SERV				ud Fallo de servicio		200,00	
15min				ud Retraso > 15 min		1.000,00	
2horas				ud Retraso > 2h ó cancelación		1.900,00	

Figura 5.28.: Ejemplo de base de datos de precios desarrollada para el caso . Fuente:
Elaboración propia con software Arquímedes de Cype Ingenieros

Contar con una base de datos independiente permite que la variación de precios unitarios se gestione con suma facilidad. Por ejemplo, la actualización del coste anual del mantenimiento debidos a un incremento de los precios de mano de obra por revisión de convenio de un año para otro resulta inmediata con tan solo variar dichos costes en la base de datos de precios. El coste del plan de mantenimiento se actualizará automáticamente por estar referenciado a la base de datos de precios.

4. Calcular los precios de cada partida.

Una vez estipuladas las partidas de cada elemento y contando con la base de precios, se procede a calcular el precio de cada una de las partidas en

base a los precios unitarios descompuestos que conforman cada una. Esto es tarea del estimador responsable de la confección del presupuesto, que se basará en la documentación aportada por el fabricante del elemento y utilizará su criterio para estimar las cantidades de cada uno de los precios descompuestos que conforman una partida. .

1. El coste unitario de las inspecciones programadas constará tan solo de mano de obra, pudiendo completarse según la tipología del elemento con un porcentual de pequeño material (lubricación, etc...).

Código	Doc	Pli	Ud	Resumen	Cant	Coste	Importe
PROBAND..				Sistema Tipo	1,000		
STATIPO				Sistema Tipo	1,000		
PREV				Preventivo programado	1,000		
Ci				ud Inspecciones programadas		10,00	
MECH				h Oficial 1º Mecánico	0,500	20,000	10,00
CORR				Correctivo no programado	1,000		
Ccm				ud Reparaciones por detección en inspección			
Cp				ud Reparaciones no detectadas, con penalización			

Figura 5.29: Ejemplo Coste unitario de cada inspección . Fuente: Elaboración propia con software Arquímedes de Cype Ingenieros

2. El coste unitario de las reparaciones que se efectúan al detectar un defecto durante una inspección programada se calcula agregando las horas de mano de obra invertidas en la reparación y el coste de los materiales.

Código	Doc	Pli	Ud	Resumen	Cant	Coste	Importe
PROBAND..				Sistema Tipo	1,000		
STATIPO				Sistema Tipo	1,000		
PREV				Preventivo programado	1,000		
Ci				ud Inspecciones programadas		10,00	
CORR				Correctivo no programado	1,000		
Ccm				ud Reparaciones por detección en inspección		100,00	
MECH				h Oficial 1º Mecánico	2,000	20,000	40,00
PART				ud Materiales Reparación o sustitución	1,000	60,000	60,00
Cp				ud Reparaciones no detectadas, con penalización			

Figura 5.30: Ejemplo Coste unitario medio de cada reparación . Fuente: Elaboración propia con software Arquímedes de Cype Ingenieros

El estimador, habitualmente un ingeniero de mantenimiento familiarizado con la operación o el propio diseñador del equipo, podrá deducir si la reparación implica la sustitución o reparación de un equipo etc... Se puede llegar a reflejar todo un Análisis Modal de Fallos y Efectos en el árbol. Sin embargo, dado que continuar añadiendo complejidad al árbol no aporta valor a la investigación, se utiliza a modo ilustrativo un valor medio en base a la experiencia.

3. El coste unitario de que se incurre cuando ocurre un fallo revelado, se calcula como el coste de la reparación más el coste de la penalización, ponderado según la probabilidad de que dicho fallo revelado implique una penalización de un tipo u otro. En el Sistema Tipo que se presenta a modo de ejemplo ilustrativo se ha utilizado el mismo coste de reparación por detección por inspección de la partida anterior y añadido el coste de una penalización de tipo único.

Código	Doc	Pli	Ud	Resumen	Cant	Coste	Importe
PROBAND..				Sistema Tipo	1,000		
STATIPO				Sistema Tipo	1,000		
PREV				Preventivo programado	1,000		
Ci				ud Inspecciones programadas		10,00	
CORR				Correctivo no programado	1,000		
Ccm				ud Reparaciones por detección en inspección		100,00	
Cp				ud Reparaciones no detectadas, con penalización		2.350,00	
Ccm				ud Reparaciones por detección en inspección	1,000	100,000	100,00
MECH				h Oficial 1º Mecánico	2,000	20,000	40,00
PART				ud Materiales Reparación o sustitución	1,000	60,000	60,00
PENL				€ Penalización	1,000	2.250,000	2.250,00

Figura 5.31: Ejemplo Coste unitario medio de fallo revelado penalizable . Fuente:
Elaboración propia con software Arquímedes de Cype Ingenieros

Ambos conceptos podría elaborarse con más detalle si el sistema a estudiar así lo requiriese:

- El coste podría desglosarse en sustitución y reparación, asignando una cantidad unitaria equivalente a la probabilidad de que se pueda reparar o sea necesario sustituir el elemento
- Las penalizaciones pueden desglosarse para reflejar las exigibles por contrato, asignando probabilidades de cada tipo de penalización según el elemento. Así, el fallo de una máquina de café podría conllevar una penalización por servicio pero nunca de penalización, mientras que el fallo de una puerta implicará un

retraso si se queda cerrada y hay que bloquearla o una cancelación si se queda abierta.

Código	Doc	Pli	Ud	Resumen	Cant	Coste	Importe
Cp			ud	Reparaciones no detectadas, con penalización		2.457,00	
Ccm			ud	Reparaciones	0,500	100,000	50,00
MECH			h	Oficial 1º Mecánico	2,000	20,000	40,00
PART			ud	Materiales Reparación o sustitución	1,000	60,000	60,00
SUST			ud	Sustitución	0,500	314,000	157,00
Rep			ud	Repuesto nuevo	1,000	250,000	250,00
MECH			h	Oficial 1º Mecánico	2,000	20,000	40,00
MECHp			h	Peón Mecánico	2,000	12,000	24,00
PEN			1	Penalización	1,000	2.250,000	2.250,00
Con			ud	Penalización de Confort		750,000	
Ser			ud	Penalización de servicio		750,000	
R15			ud	Retraso < 15 min	0,500	1.500,000	750,00
CAN			ud	Penalización por cancelación (T<15min)	0,500	3.000,000	1.500,00

Figura 5.32: Ejemplo desglose de tipologías de penalizaciones con la probabilidad de ocurrencia para el equipo bajo estudio. Fuente: Elaboración propia con software Arquímedes de Cype Ingenieros

El programa de gestión de costes aporta en este punto gran potencia, pues el coste unitario medio de cada partida puede calcularse con una flexibilidad casi ilimitada, incluyendo costes de maquinaria, imputando costes indirectos, de pequeño material, modificando estructuras de costes, anidando actividades, etc....No se abundará más en el cálculo particular de costes de cada elemento pues queda fuera del objeto, que es demostrar la adaptación de la herramienta informática para acoger el modelo de optimización y no calcular en detalle los costes de cada uno de los elementos del tren, lo que no aportaría mayor valor a esta investigación.

5. Calcular las mediciones: adaptación al Modelo de Tiempo de Retardo.

La ilustración reproducida a continuación muestra cómo quedaría cada una de las partidas y el total del capítulo una vez descritos los precios descompuestos que forman cada una. Se observa que tan solo falta estimar las cantidades anuales de cada una de las partidas para poder así obtener el coste total del subcapítulo.

Código	Doc	Pli	Ud	Resumen	Cant	Coste	Importe
PROBAND..				Sistema Tipo	1,000		
STATIPO				Sistema Tipo	1,000		
PREV				Preventivo programado	1,000		
Ci			ud	Inspecciones programadas		10,00	
CORR				Correctivo no programado	1,000		
Ccm			ud	Reparaciones		100,00	
Cp			ud	Reparaciones no detectadas, con penalización		2.457,00	

Figura 5.33: Vista con descomposición y precios unitarios, a falta de mediciones.

Fuente: Elaboración propia con software Arquímedes de Cype Ingenieros

A continuación se utilizará el Modelo de Tiempo de Retardo para calcular las mediciones de las tres partidas en función de la tasa de fallos λ y la tasa de tiempo de retardo β .

Se parte de la formulación básica del modelo de tiempo de retardo considerando el sistema como un sistema complejo. Se utilizan distribuciones exponenciales para ajustar tanto la tasa de ocurrencia de fallos como la tasa de tiempo de retardo y se considera que los fallos ocurren siguiendo un proceso homogéneo de Poisson. Siendo C_i , C_{CM} y C_p los costes unitarios de inspección, reparación en caso de detección de defecto y reparación con posible penalización en caso de fallo revelado, el coste total por unidad de tiempo es:

$$C(T) = \frac{B(T) \cdot C_p + C_{CM} [N(T) - B(T)] + C_i}{T + d_i} \quad [5.27]$$

siendo el número total de defectos

$$N(T) = \lambda \cdot T \quad [5.28]$$

y el número de esos defectos que por no detectarse a tiempo se convierten en fallos penalizables

$$B(T) = \int_0^T \lambda \cdot F(T-u) du = \int_0^T \lambda \cdot (1 - e^{-\beta(T-u)}) du = \lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta} + T \right] \quad [5.29]$$

Sustituyendo $B(T)$ y $N(T)$ en la expresión del coste por unidad de tiempo $C(T)$, queda:

$$C(T) = \frac{\lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta} + T \right] \cdot C_b + C_{CM} \left[\lambda \cdot T - \lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta} + T \right] \right] + C_i}{T + d_i}; \quad [5.30]$$

$$C(T) = \frac{\lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta} + T \right] \cdot C_b - \lambda \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta} \right] \cdot C_{CM} + C_i}{T + d_i}$$

Para casos en los que $T \gg d_i$, el coste total se puede descomponer en tres sumandos, correspondientes al coste unitario de cada tipología por el número de veces que se repite ese coste en el ciclo:

$$C(T) = \frac{\lambda}{T} \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta} + T \right] \cdot C_b + \left(\frac{-\lambda}{T} \right) \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta} \right] \cdot C_{CM} + \frac{1}{T} \cdot C_i \quad [5.31]$$

Por tanto, para cada ciclo de inspección, el número de inspecciones n_i , de reparaciones por detección de defectos detectados n_{CM} y de fallos revelados con posible penalización n_b son:

$$n_p = \frac{\lambda}{T} \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta} + T \right]$$

$$n_{CM} = \left(\frac{-\lambda}{T} \right) \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta} \right] = \left(\frac{\lambda}{T} \right) \cdot \left[\frac{1 - e^{-\beta T}}{\beta} \right] \quad [5.32]$$

$$n_i = \frac{1}{T}$$

Conociendo o calculando el periodo de inspección se pueden convertir estas cantidades por ciclo a base anual, para lo que habrá que conocer el tiempo de operación anual del tren. En la siguiente sección se ilustra el cálculo utilizando el ejemplo de las puertas exteriores utilizado para ejemplarizar la utilidad del Método Gráfico General y el Método Gráfico Simplificado.

6. *Imputación de costes indirectos.*

Hasta el momento se han calculado los costes directos imputables a los trabajos de mantenimiento preventivo y correctivo.

- La suma de todas las horas de mano de obra de la totalidad de las partidas dará como resultado las horas-hombres de mano de obra directa de la explotación. Es decir, dimensionará la operación en cuanto a mano de obra directa se refiere
- La suma de todos los costes en materiales será el coste anual en repuestos y consumibles. A partir de aquí se podrá dimensionar tanto el inventario anual según la política de gestión de inventario seleccionada (Cantidades Óptimas de Pedido, etc...) como el inventario inicial, que necesitará cierto ajuste en función de las características de la explotación (ubicación lejana a proveedor de ciertos componentes, etc...)

Sin embargo, la operación de mantenimiento presenta una serie de costes adicionales, que son los costes indirectos. Entre estos costes se encuentran:

- Los costes de personal indirecto: jefe de mantenimiento, contabilidad, calidad, ingeniería, etc....
- Los costes de alquileres, energía, servicios de profesionales externos (abogados, inspecciones reglamentarias....)
- Los costes financieros
- Los costes de gestión del inventario
- Otros costes

Para contar con estos costes, el programa de gestión de costes permite estimar en una tabla independiente la suma de todos estos costes anuales. A continuación, automáticamente el programa calcula el porcentaje que estos costes indirectos representan respecto al total de costes anuales, y lo suma al precio unitario de cada partida. Es decir, calcula el precio unitario de la partida como la suma de sus precios descompuestos, y a este precio le añade el porcentaje de indirectos resultante de dividir el total de indirectos por el total.

Cálculo del porcentaje de Costes Indirectos

Ud	Descripción	Cantidad	Precio	Importe
ud	Director Mantenimiento	1,000	70.000,00	70.000,00€
ud	Ingenieros Mantenimiento	2,000	45.000,00	90.000,00€
ud	Responsable Calidad, Medioambiente, Seguri...	1,000	30.000,00	30.000,00€
ud	Resp. Compras y Almacén	1,000	30.000,00	30.000,00€
ud	Resp. Financiero	1,000	40.000,00	40.000,00€
ud	Administrativos	3,000	25.000,00	75.000,00€
ud	Gastos Giales: electricidad, alquileres...	1,000	100.000,00	100.000,00€

Total Costes Indirectos: 435.000,00
 Total Costes Directos: 4.809.034,00
 Porcentaje de Costes Indirectos: 9,05

Grabar como opciones de usuario

Aceptar **Valores de usuario** **Cancelar**

Figura 5.34: Cálculo del porcentaje de costes indirectos. Fuente: Elaboración propia con software Arquímedes de Cype Ingenieros

Una vez llevada a cabo la estimación inicial, el mismo programa crea un capítulo de costes indirectos dentro del árbol. Este capítulo es editable y puede incluir tanto detalle como el resto de las partidas, permitiendo independizar el estudio de los indirectos del estudio de los costes directos de mantenimiento, objeto de esta investigación.

Código	Doc	Pli	Ud	Resumen	Cant	Coste	Importe
GENERAL ..				Presupuesto plan de mantenimiento ferroviario	1,000	5.244.256,60	5.244.256,60
- MEC				Sistemas mecánicos	1,000	3.107.166,60	3.107.166,60
- ELE				Sistemas eléctricos	1,000	1.918.990,00	1.918.990,00
- LIM				Sistemas limpieza	1,000	218.100,00	218.100,00
- CI				Costes indirectos		474.387,50	
- CI01	ud			Director Mantenimiento	1,000	76.335,00	76.335,00
- CI02	ud			Ingenieros Mantenimiento	2,000	49.072,50	98.145,00
- CI03	ud			Responsable Calidad, Medioambiente, Segu...	1,000	32.715,00	32.715,00
- CI04	ud			Resp. Compras y Almacén	1,000	32.715,00	32.715,00
- CI05	ud			Resp. Financiero	1,000	43.620,00	43.620,00
- CI06	ud			Administrativos	3,000	27.282,50	81.787,50
- CI07	ud			Gastos Giales: electricidad, alquileres...	1,000	109.050,00	109.050,00

Figura 5.35: Costes indirectos convertidos en capítulo del árbol. Fuente: Elaboración propia con software Arquímedes de Cype Ingenieros

7. Estudio del plan de mantenimiento y control de ejecución

Una vez completado el presupuesto del plan de mantenimiento, el programa de gestión de costes adaptado aporta diversos beneficios:

- Estudio y optimización del plan durante su diseño: la estructura anidada permite estudiar el impacto en el total de cada variación que se pretenda considerar, como cambio en las frecuencias de inspección, en los precios de mano de obra, en los indirectos, etc...
- Seguimiento y control de costes de ejecución: el programa presenta un módulo de certificación ideado para el control de ejecución de obras, que una vez adaptado el programa según el procedimiento indicado, permite llevar a cabo un seguimiento periódico de los costes.

The screenshot displays a software application window for maintenance management. At the top left is a tree view labeled 'Capítulos' containing items like F5 (Brazo de frenado), F6 (Convertidor hidráulico-neumático), F7 (Indicador de frenado), and ACO (Elementos de acoplamientos). To the right of the tree is a table titled 'Partidas' with columns: Código, Resumen, Cant, Ud, CantCertParc, CantCertOrig, PrecioVenta, ImpCertParc, and ImpCertOrig. The table shows entries for MPf6 (Mantenimiento Preventivo) and MCf6 (Mantenimiento Correctivo). Below this is a section titled 'Mantenimiento Preventivo' with a detailed table for certification. A red arrow points from the top 'Partidas' table down to a second 'Partidas' table at the bottom of the screen, which has identical columns and data. This visualizes how the initial budgetary breakdown is linked to the actual execution and certification details.

Figura 5.36: Vista del módulo de control de ejecución del plan de mantenimiento.

Fuente: Elaboración propia con software Arquímedes de Cype Ingenieros

El módulo de mediciones y certificaciones permite un nivel de detalle muy por encima de lo necesario para la aplicación ferroviaria. Por ejemplo, es habitual en una obra que haya diferencias entre las cantidades de una partida proyectadas, las verdaderamente ejecutadas o medidas y las que finalmente se pagan al contratista que ha ejecutado esa partida. Esta funcionalidad solo sería de interés en el caso ferroviario si el mantenimiento preventivo o correctivo estuviese subcontratado a un tercero que fuera retribuido según las unidades certificadas por el promotor, que podrían variar respecto a las ejecutadas.

- Informes: tanto durante la fase de diseño del plan como en su ejecución, el programa aporta una capacidad de generación de informes prácticamente ilimitada. Además de las varias decenas de tipologías de informes preestablecidos (presupuesto, listado de materiales, de mano de obra, listado de precios unitarios, listados de certificaciones, etc....) el usuario puede programar sus propios informes.

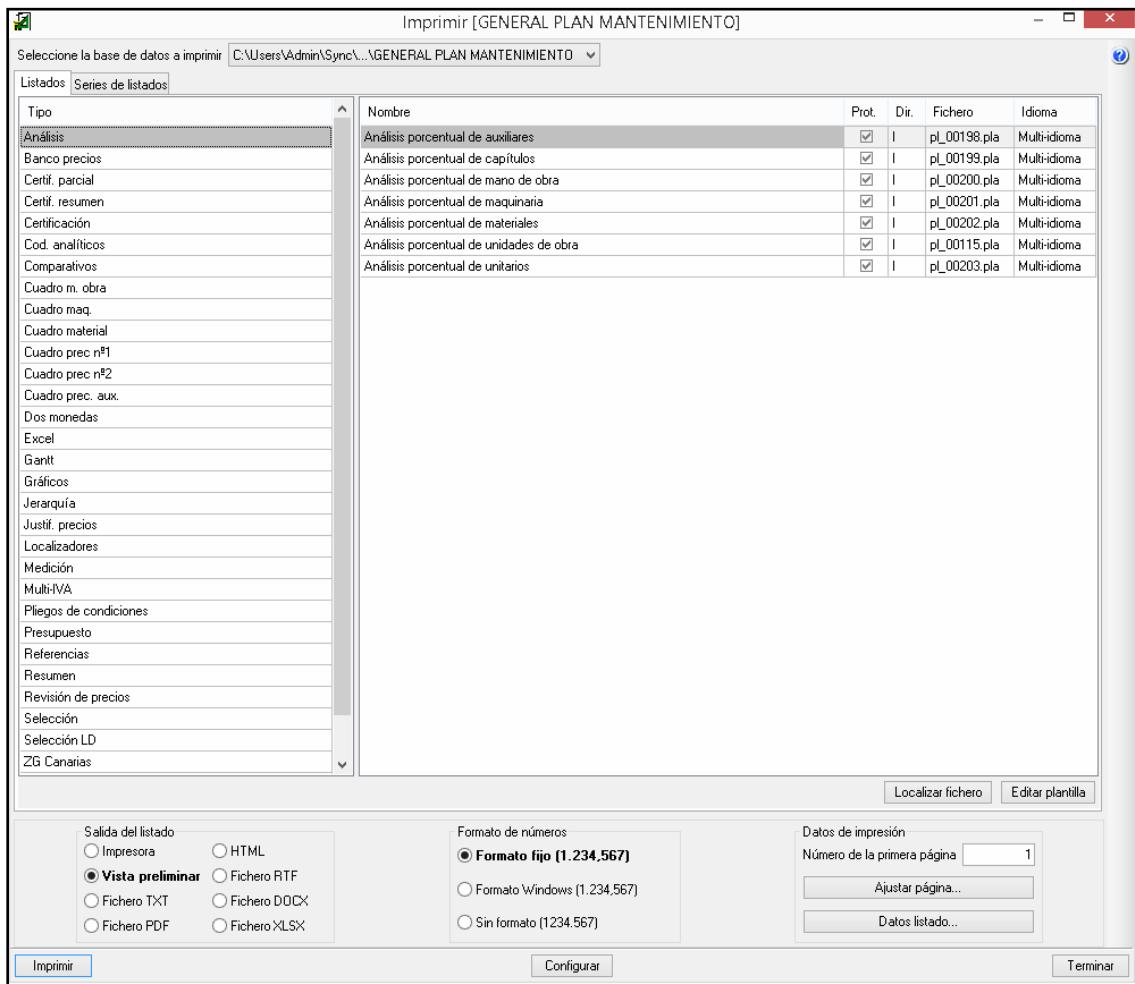


Figura 5.37: Vista del módulo de generación de informes del plan de mantenimiento.

Fuente: Elaboración propia con software Arquímedes de Cype Ingenieros

Esta capacidad de generación de informes es una de las ventajas de la adaptación, pues en el caso tradicional de cálculo del plan de mantenimiento utilizando hojas excel la capacidad de ordenar la información en documentos útiles y fáciles de gestionar es muy reducida.

5.3.3. Caso de las puertas exteriores

A continuación se procede a resolver, utilizando la adaptación de la herramienta informática presentada, el ejemplo de las puertas exteriores que ha venido utilizándose a lo largo de esta tesis para ilustrar los aportes desarrollados. Los valores de entrada definidos en el punto 5.2. son:

PARÁMETROS GENERALES EXPLOTACIÓN	
Número de trenes o composiciones	20
Número de coches por composición	9
Número de puertas por coche	8
Número de puertas totales	1440
Kilómetros anuales por puerta	120.000 km
Velocidad media	16 km/h
Tiempo anual en circulación	7300 h (304 días)
Tasa de fallos, λ [1/días]	0.0005 fallos/día
MTBF ($1/\lambda$) [días]	2000 días
MTBF ($1/\lambda$) [km]	768.000km
Tasa de tiempo de retardo, β [1/días]	0.1
Tiempo de retardo, $1/\beta$ [días]	10
Periodo óptimo de inspección	37 días
Régimen de penalizaciones:	
Penalización por Confort	750 u.m.
Penalización por Servicio	750 u.m.
Penalización retraso <10 min	1500 u.m.
Penalización retraso >10 min	3000 u.m.

Tabla 5.10. :Parámetros generales de la explotación el caso práctico presentado. Fuente:
Elaboración Propia.

Todos los valores seleccionados han sido justificados en este mismo capítulo, por lo que no se abunda en su descripción. Con estos valores quedaría el siguiente árbol de costes, en el que solo faltan las cantidades anuales de cada partida:

Código	Doc	Pli	Ud	Resumen	Cant	Coste	Importe
ZU PROBAND..				Sistema Tipo	1,000		
- STATIPO				Sistema Tipo	1,000		
- PREV				Preventivo programado	1,000		
Ci				ud Inspecciones programadas	1,000	10,00	
- CORR				Correctivo no programado	1,000		
Ccm				ud Reparaciones		100,00	
Cp				ud Reparaciones no detectadas, con penalización		2.350,00	

Figura 5.38: Vista árbol de costes para el caso bajo estudio. Fuente: Elaboración propia con software Arquímedes de Cype Ingenieros

Utilizando los valores numéricos de la tabla se procede a continuación a calcular las mediciones utilizando el Modelo de Tiempo de Retardo y las fórmulas expuestas en la sección anterior:

- Cálculo del número de inspecciones anuales

El número de inspecciones anuales depende solo del periodo de inspección, que para este ejemplo es el óptimo calculado por el Método Gráfico General. El modelo calcula el coste del ciclo por unidad de tiempo, días en este caso. Por tanto, habrá que multiplicar por el número de días de operación del tren al año para obtener el número de inspecciones al año por puerta:

$$n_i = \frac{1}{T} \times \text{días operación anuales} = \frac{1}{37} \cdot 305 = 8,243 \text{ inspecciones por puerta al año} \quad [5.33]$$

Para obtener el número total de inspecciones de toda la flota habrá que multiplicar por el número de puertas de toda la flota

$$\begin{aligned} N_i &= \text{inspecciones por puerta al año} \times \text{nº total de puertas} = \\ &= 8,243 \times 1440 = 11870 \text{ inspecciones al año} \end{aligned} \quad [5.34]$$

- Cálculo del número reparaciones de defectos detectados durante inspecciones

$$\begin{aligned} n_{CM} &= \left(\frac{-\lambda}{T} \right) \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta} \right] \times \text{días operación anuales} = \\ &= \left(\frac{\lambda}{T} \right) \cdot \left[\frac{1 - e^{-\beta T}}{\beta} \right] \times \text{días operación anuales} = \\ &= \left(\frac{0.0005}{37} \right) \cdot \left[\frac{1 - e^{-0.1 \cdot 37}}{0.1} \right] \cdot 305 = 1.318 \cdot 10^{-4} \times 304 = \\ &= 0.04 \text{ reparaciones por puerta al año} \end{aligned} \quad [5.35]$$

Para obtener el número total de reparaciones de toda la flota habrá que multiplicar por el número de puertas de toda la flota

$$N_{CM} = \text{reparaciones por puerta al año} \times n^{\circ} \text{ total de puertas}$$

$$N_{CM} = 0.04 \times 1440 = 57.88 \text{ reparaciones al año de defectos detectados en inspecciones} \quad [5.36]$$

- Cálculo del número reparaciones de fallos no detectados durante inspecciones (fallos revelados, con penalización)

$$\begin{aligned} n_p &= \frac{\lambda}{T} \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta} + T \right] \times \text{días operación anuales} = \\ &= \left(\frac{0.0005}{37} \right) \cdot \left[\frac{e^{-0.137} - 1}{0.1} + 37 \right] \times \text{días operación anuales} \quad [5.37] \\ n_p &= 3.682 \cdot 10^{-4} \times 305 = 0.112 \text{ fallos penalizables por puerta al año} \end{aligned}$$

Para obtener el número total de reparaciones de toda la flota habrá que multiplicar por el número de puertas de toda la flota

$$\begin{aligned} N_p &= \text{fallos penalizables por puerta al año} \times n^{\circ} \text{ total de puertas} \\ N_{CM} &= 0.112 \times 1440 = 161.28 \text{ fallos penalizables al año} \quad [5.38] \end{aligned}$$

Introduciendo las cantidades de operaciones anuales para una sola puerta se obtiene el siguiente resultado, correspondiente al coste anual de mantenimiento de una puerta desglosado :

Código	Doc	Pli	Ud	Resumen	Cant	Coste	Importe
PROBAND..				Puertas exteriores	1,000	349,60	349,60
STATIPO				Puertas exteriores	1,000	349,60	349,60
PREV				Preventivo programado	1,000	82,40	82,40
Ci				ud Inspecciones programadas	8,240	10,00	82,40
CORR				Correctivo no programado	1,000	267,20	267,20
Ccm				ud Reparaciones	0,040	100,00	4,00
Cp				ud Reparaciones no detectadas, con penalización	0,112	2.350,00	263,20

Figura 5.39: Vista árbol de costes incluyendo costes unitarios para una sola puerta. Fuente: Elaboración propia con software Arquímedes de Cype Ingenieros

Introduciendo las cantidades de operaciones anuales para todas las puertas existentes en la flota se obtiene el siguiente resultado, correspondiente al coste anual de mantenimiento desglosado de todas las puertas de la flota:

Código	Doc	Pli	Ud	Resumen	Cant	Coste	Importe
PROBAND..				Puertas exteriores	1,000	503.496,00	503.496,00
STATIPO				Puertas exteriores	1,000	503.496,00	503.496,00
PREV				Preventivo programado	1,000	118.700,00	118.700,00
Ci				ud Inspecciones programadas	11.870,000	10,00	118.700,00
CORR				Correctivo no programado	1,000	384.796,00	384.796,00
Ccm				ud Reparaciones	57.880	100,00	5.788,00
Cp				ud Reparaciones no detectadas, con penalización	161.280	2.350,00	379.008,00

Figura 5.40: Vista árbol de costes incluyendo costes unitarios para todas las puertas. Fuente: Elaboración propia con software Arquímedes de Cype Ingenieros

Este resultado coincide con el calculado gráfica y analíticamente en la sección 5.2 para un tiempo de retardo de diez días, existiendo una variación del cuatro por mil en el resultado de toda la flota debido al redondeo decimal:

Tasa tiempo retardo	tiempo medio de retardo	Periodo óptimo	coeficiente de ahorro	Ahorro máximo	Coste mínimo por día y puerta	coste mínimo para 1440 puertas	coste mínimo anual 1440 puertas
$\beta = 1.8 \cdot 10^{-4}$	5556	320 días	-0.1	1.062	0.113 u.m.	163 u.m.	49.630 u.m.
$\beta = 0.01$	100	50 días	-0.0685	0.685	0.49 u.m	706 u.m.	215.208u.m.
$\beta = 0.1$	10	37 días	-0.0025	0.025	1.15 u.m.	1656u.m.	505.080 u.m.

Hasta este punto, la adaptación de la herramienta informática permite calcular los costes de cada partida unitaria: coste de cada inspección, de cada reparación de un defecto detectado y/o de un fallo penalizable. Sin embargo, las cantidades anuales de cada partida, sus mediciones, se han calculado de manera externa a la aplicación. El uso de una herramienta externa resta agilidad y practicidad a la herramienta, por lo que se procede a implementar las expresiones matemáticas de las cantidades de cada partida utilizando la herramienta denominada "medición detallada" que ofrece el programa de gestión de costes.

Para calcular la medición del número de inspecciones, se introduce, en el detalle de medición la siguiente fórmula:

$$N_i = \frac{1}{T} \times \text{días operación anuales} \times n^{\circ} \text{elementos en la flota} \quad [5.39]$$

Código	Doc	Pli	Ud	Resumen	Cant	Coste	Importe
PROBAND..				Puertas exteriores	1,000	503.498,70	503.498,70
STATIPO				Puertas exteriores	1,000	503.498,70	503.498,70
PREV				Preventivo programado	1,000	118.702,70	118.702,70
Ci				ud Inspecciones programadas	11.870,270	10,00	118.702,70
CORR				Correctivo no programado	1,000	384.796,00	384.796,00
Ccm				ud Reparaciones	57,880	100,00	5.788,00
Cp				ud Reparaciones no detectadas, con penalización	161,280	2.350,00	379.008,00

Detalle de medición				Certificado	Medido	Exceso	
Loc	Comentario	Fórmula	A	B	C	Parcial	Subtotal
		Periodo de inspección					
1		(B*C)/A	37	305,000	1.440,000	11.870,270	
					11.870,270	11.870,270	
					11.870,270	11.870,270	

Figura 5.41: Cálculo de medición de número de inspecciones. Fuente: Elaboración propia con software Arquímedes de Cype Ingenieros

Para calcular la medición del número de reparaciones de defectos detectados durante inspecciones, se introduce, en el detalle de medición la siguiente fórmula:

$$N_{CM} = \left(\frac{\lambda}{T} \right) \cdot \left[\frac{1 - e^{-\beta T}}{\beta} \right] x \text{ días operación anuales} x \text{nº elementos en la flota} \quad [5.40]$$

Código	Doc	Pli	Ud	Resumen	Cant	Coste	Importe
PROBAND..				Puertas exteriores	1,000	503.499,00	503.499,00
STATIPO				Puertas exteriores	1,000	503.499,00	503.499,00
PREV				Preventivo programado	1,000	118.702,70	118.702,70
Ci				ud Inspecciones programadas	11.870,270	10,00	118.702,70
CORR				Correctivo no programado	1,000	384.796,30	384.796,30
Ccm				ud Reparaciones	57,883	100,00	5.788,30
Cp				ud Reparaciones no detectadas, con penalización	161,280	2.350,00	379.008,00

Detalle de medición				Certificado	Medido	Diferencia	
Fórmula	A	B	C	D	E	Parcial	Subtotal
	Tasa fallos	Periodo inspección	Tasa tiempo retardado	Días operación anuales	nº elemtos. en flota		
	(A/B)*((1-2.718^(-C*B))/0.1)*D*E	0,0005	37,000	0,100	305,000	1.440,000	57,883
						57,883	57,883
						57,883	57,883

Figura 5.42: Cálculo de medición de número de reparaciones de defectos detectados. Fuente: Elaboración propia con software Arquímedes de Cype Ingenieros

Finalmente, para calcular la medición del número de reparaciones de fallos revelados penalizables, se introduce, en el detalle de medición la siguiente fórmula:

$$N_p = \left(\frac{\lambda}{T} \right) \cdot \left[\frac{e^{-\beta T} - 1}{\beta} + T \right] x \text{ días operación anuales} x \text{nº elementos en la flota} \quad [5.41]$$

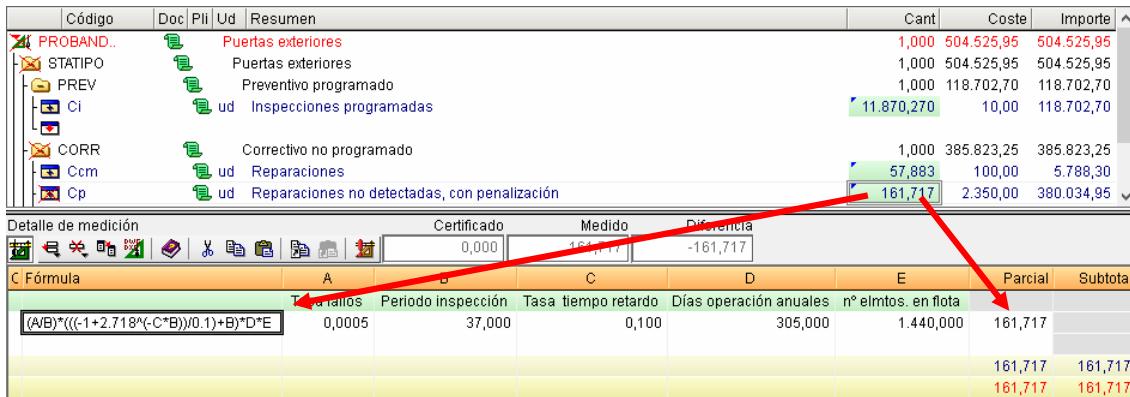


Figura 5.43: Cálculo de medición de número de reparaciones de fallos revelados. Fuente: Elaboración propia con software Arquímedes de Cype Ingenieros

Con esto se completa la adaptación, habiendo alcanzado los **objetivos y motivación** planteados al inicio de este capítulo, a saber, la adaptación de una herramienta informática proveniente del mundo de la planificación y control de costes en los proyectos de construcción para incluir el modelo de cálculo desarrollado. Ha quedado demostrada que la **utilidad** de la adaptación es clara, y permite disfrutar de la potencia de una herramienta de gestión de costes de uso universal y a su vez utilizar fácilmente el modelo desarrollado.

Capítulo 6

APORTACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

RESUMEN: Este último capítulo de la tesis recoge las conclusiones obtenidas en el desarrollo de la investigación llevada a cabo enumerándose las aportaciones originales descritas a lo largo de la tesis. Finalmente se proponen las futuras líneas de investigación que se abren a partir del trabajo llevado a cabo.

6.1. Aportaciones originales

6.1.1. Revisión del estado del arte sobre el cálculo de costes de ciclo de vida en el mantenimiento de flotas ferroviarias

Se ha llevado a cabo una recopilación del estado del arte relativo al mantenimiento de flotas ferroviarias y en particular al cálculo y análisis de los costes e inversiones requeridos bajo un enfoque de Costes de Ciclo de Vida (LCC) en función de la fiabilidad. Se ha concluido que aunque existe un interés creciente en este campo científico-tecnológico, predomina la escasez de homogeneización en los criterios y procedimientos de cálculo de costes de mantenimiento de flotas, así como de su transformación en Costes de Ciclo de Vida (LCC). También se ha observado la escasez de herramientas informáticas de cálculo de costes de mantenimiento que utilicen criterios de fiabilidad para la optimización de planes de mantenimiento de flotas.

6.1.2. Revisión del estado del arte sobre modelos matemáticos de optimización de costes de mantenimiento aplicados al mantenimiento de flotas.

La segunda parte del marco teórico se ha centrado en la ingeniería de la fiabilidad y en particular en la investigación de los modelos matemáticos de optimización de costes de mantenimiento y su posible aplicación al caso del mantenimiento ferroviario. Se ha observado que pese a la gran profusión de modelos matemáticos existentes, su aplicación al campo del mantenimiento de flotas es prácticamente inexistente. Esto se debe a la brecha existente entre la elevada complejidad de los modelos científicos y la eminentemente practicidad del campo tecnológico para el que teóricamente son desarrollados. Existe por tanto una motivación clara para la investigación tanto en la aplicación de modelos matemáticos de optimización de costes de mantenimiento al campo ferroviario como en el desarrollo de herramientas y metodologías que simplifiquen su aplicación y propicien su uso en la práctica.

6.1.3. Aplicación del Método de Tiempo de Retardo al mantenimiento de flotas ferroviarias

En la bibliografía consultada se describe la aplicación del Método de Tiempo de Retardo a diferentes casos prácticos. El método se ha aplicado con éxito a instalaciones de extracción de unidades de cuidados intensivos, a maquinaria de extracción en minería, a diferentes sistemas mecánicos de embarcaciones de pesca profesional, etc... Cada sistema presenta sus particularidades, y la aplicación del método a cada caso requiere cierto estudio previo así como la determinación de hipótesis de cálculo y justificación de los resultados.

Una de las aportaciones de esta tesis es la aplicación del Método de Tiempo de Retardo al mantenimiento de flotas ferroviarias, y en concreto al mantenimiento de las puertas exteriores.

En el mantenimiento de flotas se aplica gran variedad de políticas de mantenimiento: políticas de reemplazo por calendario o por uso, por inspección con fallos no revelados o revelados, de mantenimiento basado en la condición, etc... Se ha observado que el mantenimiento de cada sistema que compone un tren suele implicar políticas acopladas para los diferentes elementos que lo componen. En esta investigación se han desacoplado las diferentes políticas de mantenimiento, optando por la adaptación del Método de Tiempo de Retardo para modelar las inspecciones periódicas de los sistemas de material rodante, en particular para elementos sujetos a inspecciones con fallos revelados.

El método general se ha particularizado para el caso del mantenimiento de flotas, incorporando el coste de las penalizaciones por contrato dentro de los conceptos de mantenimiento correctivo. La particularización del método al caso ferroviario ha implicado el asumir ciertas hipótesis que posteriormente se han demostrado válidas para el caso.

6.1.4. Desarrollo del Método Gráfico General para la resolución del modelo

Una de las principales aportaciones de esta investigación ha sido el desarrollo de un método gráfico que facilita la resolución del modelo de tiempo de retardo, ayudando a salvar así la brecha ya referida entre los complejos modelos matemáticos de optimización del mantenimiento y su aplicación práctica.

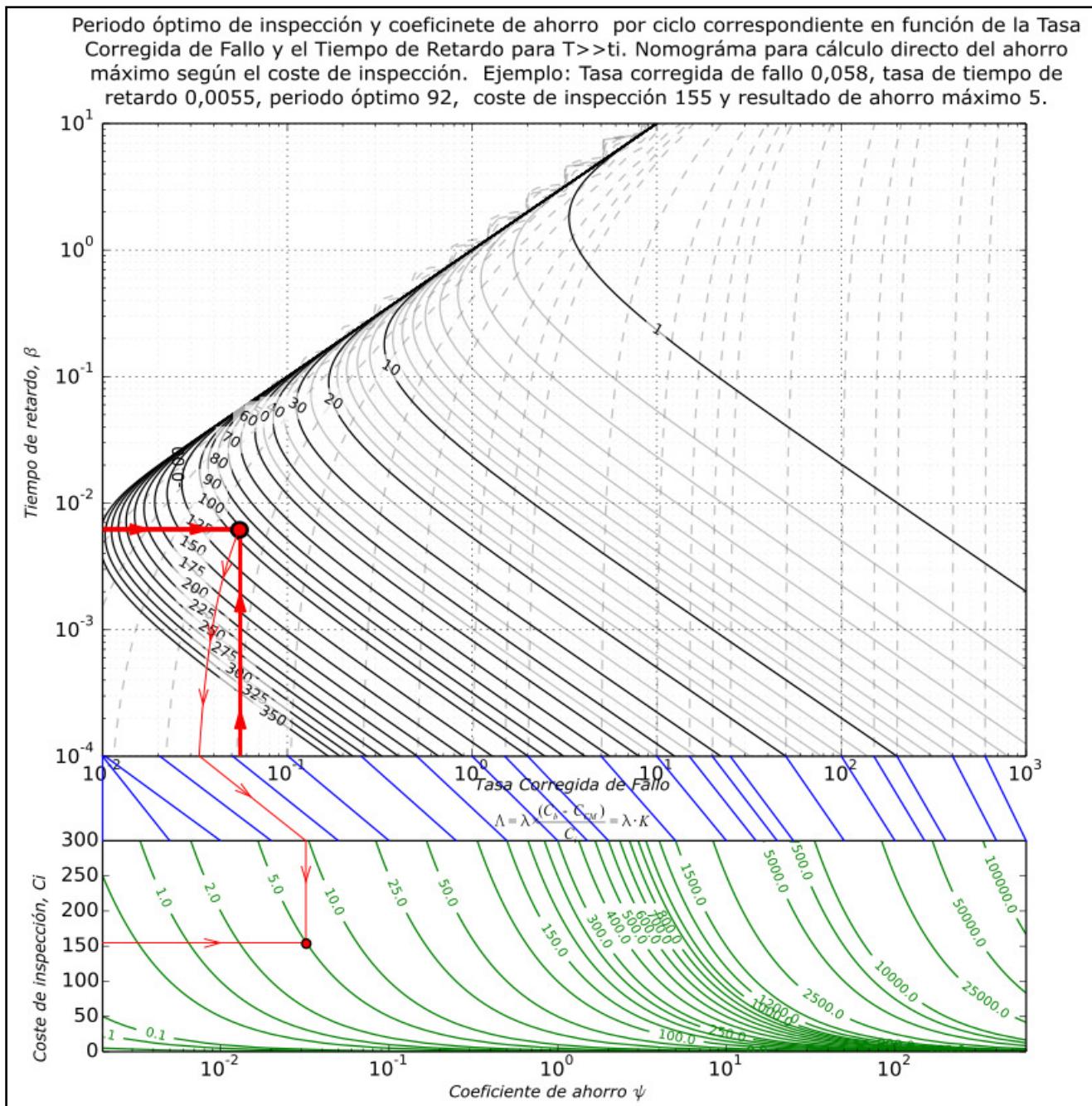


Figura 6.1.: Solución gráfica aplicando el Método Gráfico General, nomograma con coste de inspección. Fuente: Elaboración propia

El método se ha desarrollado a partir de las hipótesis utilizadas en la particularización al campo del mantenimiento de flotas. A partir del estudio y segregación de las variables directoras del problema se han generado ciertos parámetros que permiten la reducción de variables necesaria para llevar a cabo representaciones gráficas de sencilla interpretación. Con el método desarrollado se calculan los períodos óptimos de inspección en base a un nuevo parámetro denominado tasa corregida de fallo y el tradicional tiempo de retardo. La tasa corregida de fallo recoge tanto la información de los costes implicados (de inspección, de reparación de defectos, de reparación de fallos penalizables) como la tasa de fallos del equipo.

Se han desarrollado ábacos para la solución gráfica de:

- Período óptimo de inspección en función de la tasa corregida de fallo y el tiempo de retardo.
- Coeficiente de ahorro en función de la tasa corregida de fallo y el tiempo de retardo.
- Período óptimo y coeficiente de ahorro en un ábaco unificado.
- Período óptimo, coeficiente de ahorro y ahorro máximo en nomograma completo.

Los ábacos desarrollados resultan de aplicación a cualquier otro campo en el que el tiempo de llevar a cabo una inspección sea despreciable frente al período de inspección. Tras investigar el comportamiento de la función a optimizar en su dominio, se han desarrollado gráficas para los valores adecuados al mantenimiento de flotas. Sin embargo, se ha optado por representar las posibles soluciones para un dominio de las soluciones de entrada lo suficientemente amplio como para que los nomogramas constituyan una solución válida para gran cantidad de aplicaciones industriales no ferroviarias.

Además de la simplicidad de uso, el Método Gráfico General aporta la ventaja, común a otros ábacos de cálculo, de permitir al usuario el llevar a cabo un análisis de sensibilidad de manera inmediata mediante una interpolación visual simple. Esta aportación aporta gran utilidad y flexibilidad al método, pues resulta habitual en la práctica la falta de datos históricos, recursos humanos o materiales, para poder calcular con precisión la tasa de fallo y el tiempo retardo.

6.1.5. Estudio cualitativo de la variación de forma de la función coste.

El método gráfico permite hallar el periodo de inspección óptimo correspondiente al coste mínimo. Sin embargo, para cada periodo óptimo la función coste presentará una forma u otra dependiendo de los datos de entrada. El estudio de la forma de la función coste en el entorno del periodo óptimo aporta información práctica sobre el riesgo asociado al punto de trabajo. Para estudiar el riesgo de un óptimo determinado se han estudiado dos factores de forma:

Apuntamiento o riesgo

Los óptimos que presenten una concavidad muy pronunciada serán situaciones de riesgo significativo, pues una política de mantenimiento que no se ajuste al periodo óptimo conllevará elevados costes. En estos casos será conveniente estudiar con mayor profundidad el caso de aplicación para acotar los errores permisibles en la estimación de cada parámetro. Por el contrario, funciones coste prácticamente planas alrededor del punto óptimo podrán ser interpretadas por el ingeniero de mantenimiento como situaciones de bajo riesgo, pues una desviación respecto al óptimo no implica grandes variaciones en el coste total. El apuntamiento es el factor de forma que cualitativamente indica el valor del riesgo intrínseco del periodo de coste óptimo

Asimetría

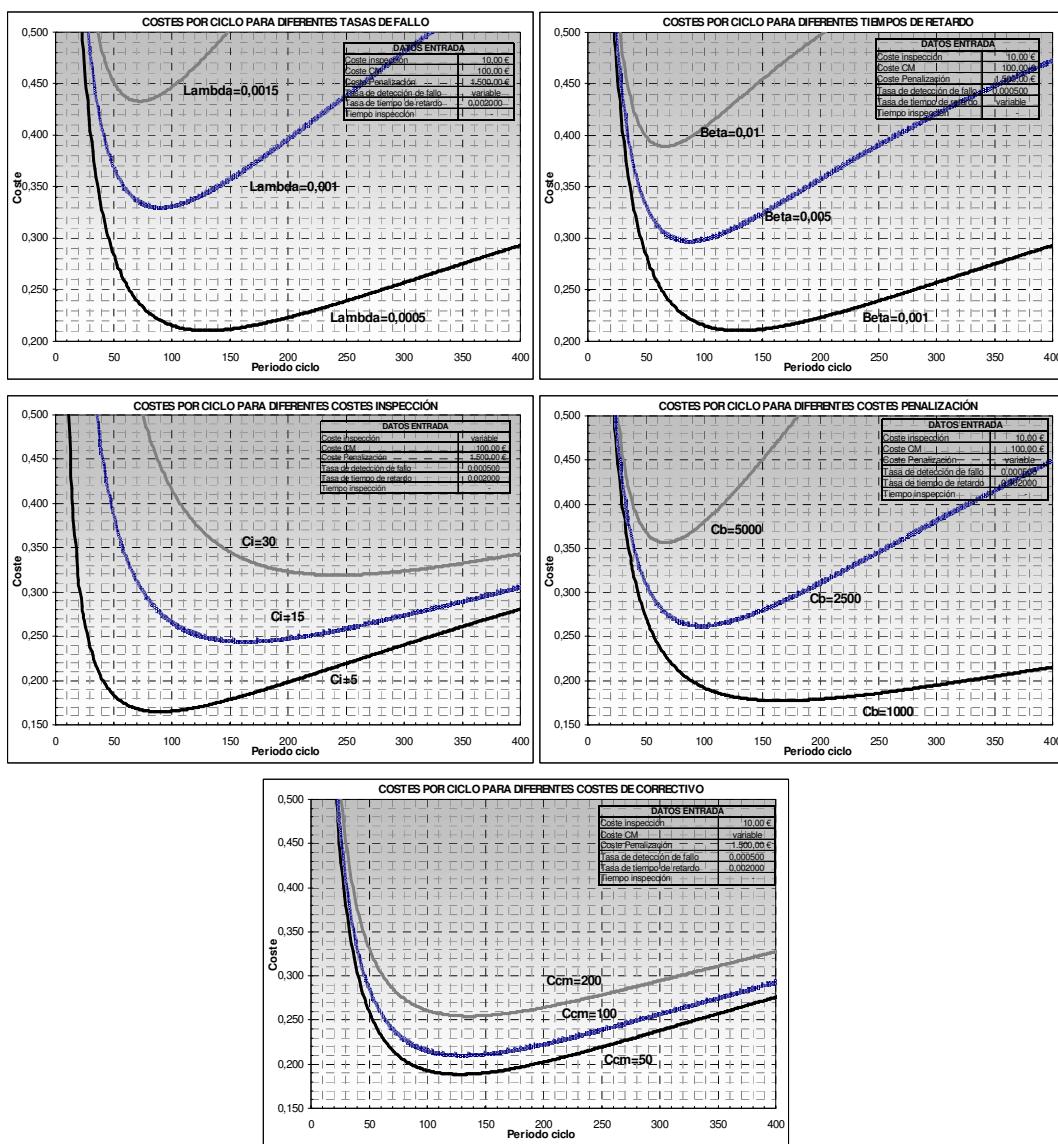
La asimetría es un factor de forma que aporta información sobre la asimetría de la función coste en el entorno del periodo óptimo. Conocer esta asimetría ayuda al ingeniero de mantenimiento a entender el riesgo que implica el separarse del periodo óptimo de inspección por aplicar una política de inspecciones bien de mayor o menor frecuencia.

Como parte de la investigación se ha estudiado la variación cualitativa del apuntamiento y la asimetría en función de las cinco variables del problema: tiempo de retardo, tasa de fallo, coste de inspección, coste de correctivo y coste de penalización. Para entender la relación entre variables se utiliza un ejemplo numérico, sobre el que se modifica una variable cada vez, dejando el resto de variables con su valor inicial.

A continuación se resume la influencia cualitativa de cada variable en el apuntamiento y asimetría de la función coste descrita con mayor detalle en el Capítulo 4.

- a) Variación de la forma con la tasa de fallo.

Al variar la tasa de fallo cambia tanto la forma de la función (en apuntamiento y sesgo) como la ubicación del punto óptimo (periodo para coste mínimo). Obviamente tasas de fallo más elevadas conducen a costes por ciclo más elevados y períodos de inspección más cortos. Respecto a la forma de la función, se observa que un aumento en la tasa de fallos implica mayor apuntamiento de la función (mayor riesgo), así como menor simetría.



b) Variación de la forma con el tiempo de retardo.

Tiempos de retardo cortos conducen a costes por ciclo más elevados y períodos de inspección más cortos. Respecto a la forma de la función, se observa que un

aumento en las tasas de los tiempos de implica mayor apuntamiento de la función, así como menor asimetría.

c) Variación de la forma con el coste de inspección.

Costes de inspección más elevados conducen a costes por ciclo más elevados y periodos de inspección más largos. Respecto a la forma de la función, se observa que un aumento en el coste de inspección implica menor apuntamiento de la función (menor riesgo), así como mayor asimetría.

d) Variación de la forma con el coste de penalización.

Costes de penalización más elevados conducen a costes por ciclo más elevados y periodos de inspección más cortos. Respecto a la forma de la función, se observa que un aumento en el coste de penalización implica mayor apuntamiento de la función (mayor riesgo), así como menor asimetría.

e) Variación de la forma con el coste de correctivo.

Costes de correctivo más elevados conducen a costes por ciclo más elevados y periodos de inspección más largos, aunque la tendencia es menor que cuando se varían el resto de variables.. Respecto a la forma de la función, se observa que prácticamente no hay variación ni en apuntamiento ni en asimetría.

La siguiente tabla reúne, a modo de resumen, la variación cualitativa de la forma de la función en apuntamiento y asimetría así como la tendencia en coste y periodo en función de las variaciones de las cinco variables de entrada del problema.

	Apuntamiento	Asimetría	Coste	Periodo
$\Delta\lambda$	↑↑	↓	↑↑	←
$\Delta\beta$	↑↑	↓	↑↑	←
ΔC_i	↓↓	↑	↑↑	→
ΔC_p	↑↑	↓	↑↑	←
ΔC_{CM}	~	~	↑	→

6.1.6. Análisis de la influencia del uso de exponenciales en el Modelo de Tiempo de Retardo.

El Modelo de Tiempo de Retardo exige la caracterización de dos variables estadísticas, (la tasa de fallo y el tiempo de retardo). Estas dos variables pueden ser descritas por medio de diferentes distribuciones estadísticas, siendo las más habituales las distribuciones exponencial y la de Weibull. En un mismo caso puede resultar óptimo el aplicar exponenciales para describir tanto la tasa de fallo como el tiempo de retardo, o bien utilizar distribuciones de tipo Weibull para ambas variables, o bien utilizar la distribución exponencial para describir una variable y la de Weibull para describir la otra. La selección de la distribución a aplicar en cada caso así como la determinación de los parámetros de ajuste de cada distribución constituyen una tipología de problema dentro de la disciplina del Modelo de Tiempo de Retardo.

En el campo de la ingeniería de la fiabilidad aplicada al sector ferroviario es habitual modelar la tasa de fallo utilizando la distribución exponencial. Esto se debe a que se consideran los sistemas bajo estudio con una tasa de fallo constante, que ha superado la fase de tasa de fallo decreciente correspondiente a los fallos infantiles y todavía no ha llegado a la fase final de tasa de fallo creciente.

Respecto al tiempo de retardo, se ha optado en esta investigación por utilizar también una distribución exponencial, quedando justificado su uso en el apartado 4.4.7.2.

Durante la investigación y en particular en resolución de los numerosos ejemplos de aplicación práctica ensayados, se observó que el Modelo de Tiempo de Retardo (Christer 1985) presentaba soluciones de apuntamiento y simetría variable en función del periodo óptimo de inspección. Al profundizar en el estudio de este fenómeno se han extraído dos conclusiones sobre la influencia del uso de distribuciones exponenciales en la forma de la función coste:

- Se da cierta asimetría en la función coste, existiendo mayor riesgo de incrementar el coste cuando se opta por mayor frecuencia de inspección que la óptima que cuando se relaja el periodo de inspección. Esta asimetría disminuye a medida que los tiempos de retardo disminuyen.
- Los valores de apuntamiento máximo crecen a medida que el periodo de inspección disminuye. Este comportamiento se debe al uso de distribuciones exponenciales para modelar tanto el tiempo de retardo como la tasa de fallo.

Por tanto, el Modelo de Tiempo de Retardo (Christer 1985) con distribuciones exponenciales arroja soluciones de riesgo decreciente a medida que el periodo óptimo crece. Este fenómeno conlleva que los casos cuyas soluciones implican períodos de inspección elevados tendrán un riesgo intrínseco bajo. Así, un ingeniero de mantenimiento observará que en caso de periodo de inspección óptimo elevado, la variación del mismo en la práctica no arrojará incrementos de coste elevados.

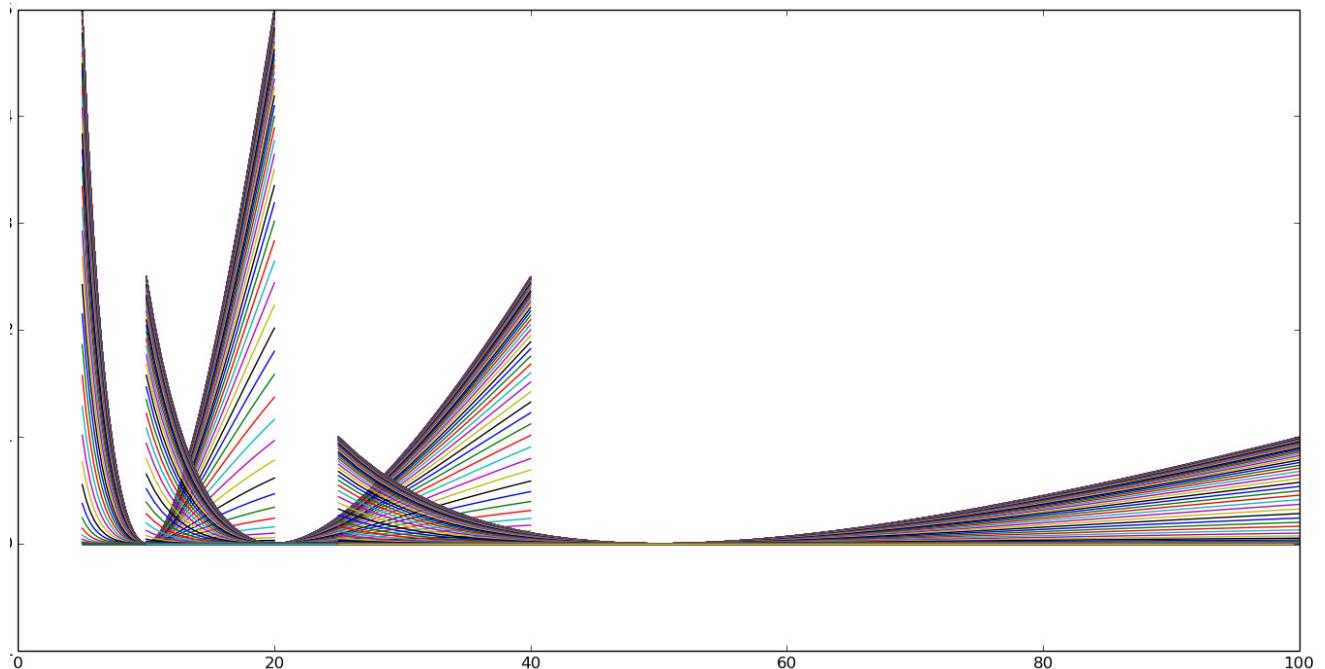


Figura 6.2.: Familias de curvas de coste para períodos $T=10$, $T=20$ y $T=50$; Escala de costes (abscisas) homogeneizada y tiempo de retardo variable. Fuente: Elaboración propia

6.1.7. Categorización en función del riesgo y el coste LCC

Se aporta una categorización de los diferentes elementos a mantener en una operación de mantenimiento de flotas en función de su coste y riesgo.

El coste viene expresado por su valor óptimo por ciclo de inspección, por su valor anual o por el Coste de Ciclo de Vida (LCC). El riesgo se asimila al apuntamiento de la función de coste óptimo: cuanto más apuntada sea la función más riesgo existe de que un error en el periodo óptimo de inspección conlleve una gran desviación del coste óptimo.

Asignando a cada elemento un valor de coste y riesgo y representando el resultado en un mapa perceptual bidimensional, esta categorización permite al mantenedor asignar recursos en base a un criterio de coste de mantenimiento en función de la fiabilidad.

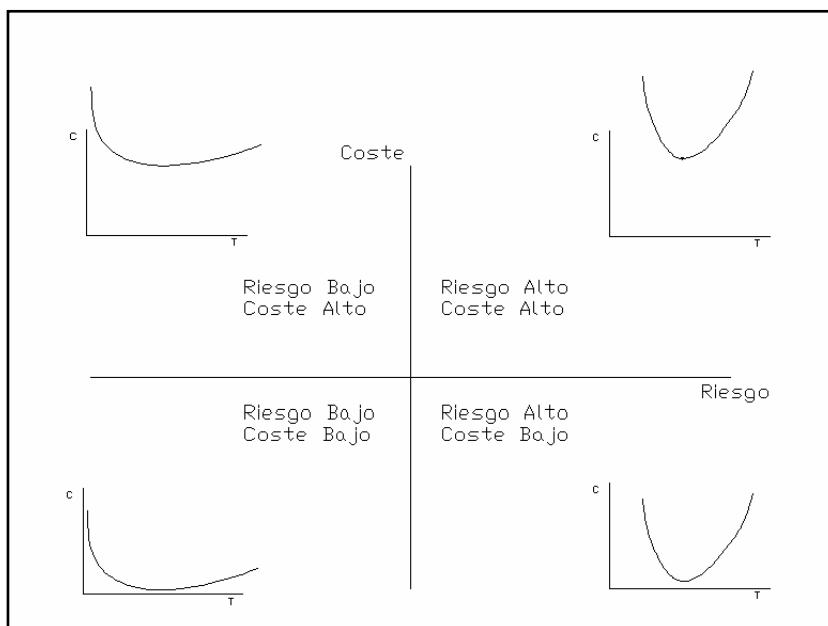


Figura 6.3: Clasificación gráfica cualitativa en función de riesgo y coste. Fuente: Elaboración propia

Con esta categorización el mantenedor puede determinar visualmente cuales son los equipos o sistemas que requieren mayor atención a la hora de asignar los recursos disponibles a cada uno. La categorización aporta un criterio claro para por ejemplo, investigar la tasa de fallo mediante nuevos ensayos acelerados de vida o refinar la estimación de la tasa de tiempo de retardo mediante campañas de muestreo más intensas

El método presentado presenta una categorización en base a una clasificación cualitativa, dejando para futuras investigaciones el desarrollo de un método cuantitativo de categorización.

6.1.8. Desarrollo del Método Gráfico Simplificado

Se observa que diversos autores simplifican la resolución de casos prácticos mediante la selección de una tasa de tiempo de retardo idéntica a la tasa de fallo.

Método Simplificado: Periodo óptimo de inspección y ahorro máximo por ciclo correspondiente en función de el Ratio de Coste y la tasa de fallo para $T > > t_i$ y $\alpha = \beta$

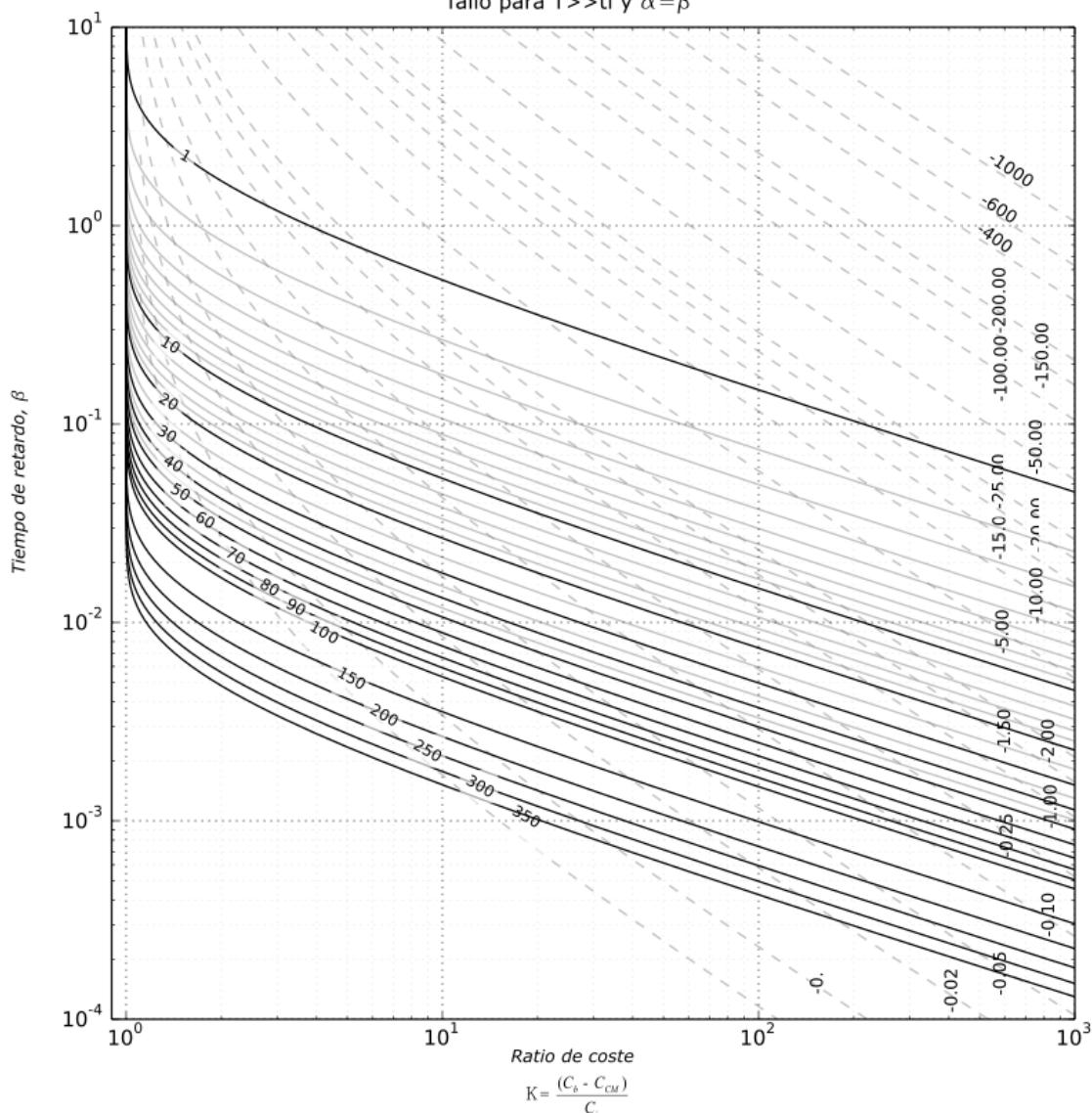


Figura 6.4.: Nomograma del Método Simplificado. Fuente: Elaboración propia

Esto es debido a que la tasa de fallo es un dato frecuentemente disponible en la práctica, mientras que no se suelen recoger en campo los datos necesarios para estimar el tiempo de retardo. Para poder analizar esta tipología de casos se decide desarrollar un método gráfico más sencillo, quedando reducidas de cinco (C_b , C_i , C_{CM} , λ , β) a cuatro las variables del problema, haciendo $\lambda = \beta$. Las gráficas obtenidas son de gran utilidad en este particular; sin embargo, se concluye mediante la resolución de un caso numérico la falta de precisión en el cálculo cuando el tiempo de retardo se toma idéntico a la tasa de fallo sin contar con datos estadísticos que así lo recomiendan.

La belleza del Método Simplificado radica en la utilización de variables comunes y sencillas de estimar en cualquier explotación, como son los costes unitarios y la tasa de fallo, para determinar el periodo óptimo.

Sin embargo, como ha quedado demostrado en el Capítulo 5, el tomar una tasa del tiempo de retardo igual a la tasa de fallo es una simplificación que, aunque utilizada en diversas publicaciones con objeto de profundizar en otros aspectos del modelo, resulta poco útil en la resolución de casos prácticos reales. Esto se debe a que la tasa de tiempo de retardo es una variable cuya correlación con la tasa de fallo es inexistente en la mayoría de los casos, y cuya variación compromete el resultado final (periodo de inspección óptimo) en gran medida.

6.1.9. Determinación del rango de aplicación del Método Gráfico Simplificado.

El ábaco del Método Gráfico General permite discernir los casos en los que la *tasa de tiempo de retardo* resulta una variable trascendente. Así, para valores elevados del *factor de coste*, se observa que prácticamente no hay variación del *coeficiente de ahorro* en función de la *tasa de tiempo de retardo*. En el ábaco reproducido a continuación se ha marcado la zona aproximada en la que la *tasa de tiempo de retardo* no influye de manera decisiva en el resultado final. Esta zona indica el rango de aplicación del método simplificado en el que se puede tomar $\lambda = \beta$.

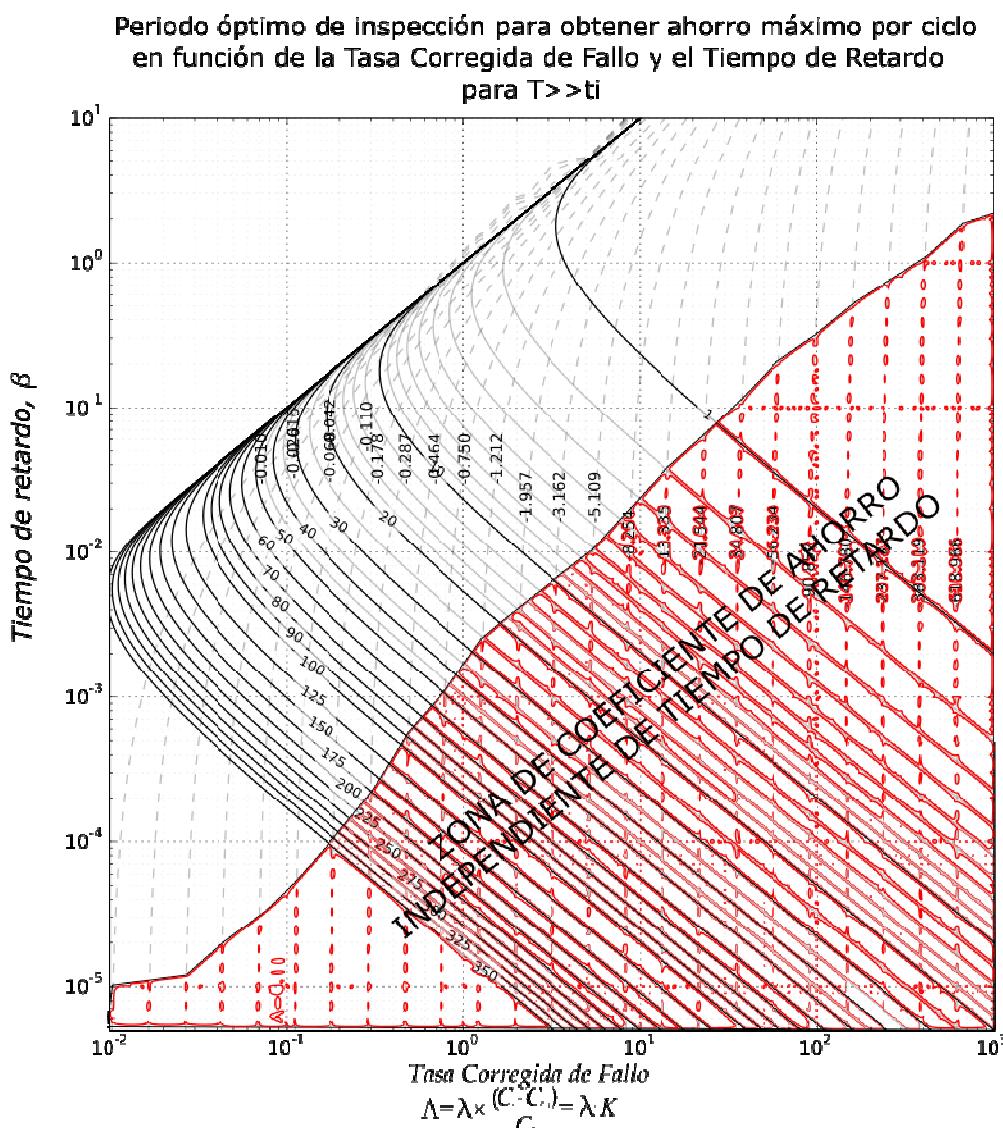


Figura 6.5.: Aplicación del Método Gráfico General al caso de las puertas ferroviarias .
Fuente: Elaboración propia

6.2. Futuras líneas de investigación

A lo largo de la investigación llevada a cabo se han puesto de manifiesto futuras líneas de investigación en cada uno de los campos de trabajo:

Desarrollo de un método gráfico con distribuciones Weibull

El Método Gráfico General desarrollado, se basa en el uso de regresiones exponenciales para ajustar tanto la tasa de fallo como el tiempo de retardo. El uso de exponenciales en la ingeniería de fiabilidad aplicada a las flotas ferroviarias es aceptada generalmente. Sin embargo, habiéndose investigado como parte de esta tesis el impacto del uso de estas distribuciones en el resultado final, se propone el desarrollar un método gráfico basado en el uso de distribuciones Weibull. En general, las publicaciones existentes sobre el Método de Tiempo de Retardo utilizan siempre una de estas dos distribuciones - exponencial o Weibull -, con lo que el desarrollo de un método gráfico con distribuciones Weibull permitiría soluciones más precisas, especialmente en lo referente al análisis del riesgo.

Desarrollo de un método gráfico para optimización de disponibilidad en vez de coste

En esta investigación el objetivo ha sido la optimización de los costes en función del periodo óptimo. Sin embargo, el Método de Tiempo de Retardo ofrece una formulación paralela para la determinación de períodos óptimos de inspección para maximizar la disponibilidad. Resultaría de gran utilidad el desarrollar un método gráfico para resolver esta formulación paralela. Dado que según la formulación general resulta más simple el caso de maximización de disponibilidad que la minimización de coste, la metodología presentada en esta tesis resultará probablemente válida para desarrollar los ábacos de maximización de disponibilidad.

Adaptación de los ábacos a variantes avanzadas del Método de Tiempo de Retardo

El Método de Tiempo de Retardo utilizado para desarrollar los ábacos se corresponde con el método general originalmente desarrollado por Christer. Existen múltiples variaciones del método general, que en algunos casos pueden resultar de interés para el campo ferroviario. Por ejemplo, los casos de inspección imperfecta, personal de mantenimiento limitado, reparación demorada respecto a la detección del fallo, etc.... son refinamientos del modelo para los que sería conveniente intentar desarrollar modelos de resolución gráfica.

Estudio de acople de diferentes políticas de mantenimiento en un sistema ferroviario

Esta investigación se ha centrado en el estudio de las políticas de inspección con fallos revelados. Sin embargo, es habitual que un elemento esté sujeto a políticas adicionales, como reemplazo o mantenimiento basado en la condición. En esta tesis se han considerado políticas independientes. Sin embargo, la investigación podría continuar estudiando las casuísticas de desacople de políticas de mantenimiento más habituales en este campo.

Determinación del dominio de aplicación del Método Gráfico Simplificado.

El tiempo de retardo es una variable que en ciertos casos puede igualarse a la tasa de fallo. Utilizando los nomogramas desarrollados se puede discernir cualitativamente los valores para los que se puede tomar como válida la citada hipótesis. Sin embargo, resultaría de interés el investigar cómo determinar analíticamente las condiciones en las que se puede tomar el tiempo de retardo igual a la tasa de fallo.

En estos casos el problema de optimización del periodo óptimo de inspección se simplificaría, pues tan solo sería necesario determinar la tasa de fallo y los costes unitarios (de inspección, de reparación de defecto, de reparación de fallo penalizable). Estas variables son determinación en cualquier operación.

Clasificación cuantitativa de los sistemas a mantener en función de riesgo y coste

Una de las aportaciones de la investigación ha sido la clasificación cualitativa de los sistemas a mantener en función del apuntamiento (riesgo) y coste óptimo. La clasificación se ha plasmado en un mapa perceptual, en el que los sistemas a mantener quedan posicionados en función del coste mínimo de mantenimiento y el apuntamiento o riesgo de su función coste.

La futura investigación cuantitativa del apuntamiento o riesgo de la función coste en función del periodo de inspección permitiría mejorar la clasificación propuesta. Dado que la función coste en función del periodo es asimétrica, sería conveniente definir valores para cuantificar tanto el apuntamiento como la asimetría de cada función.

Determinar el marco econométrico para el cálculo de Coste de Ciclo de Vida (LCC) ferroviario.

El campo que se ha pretendido abarcar es complejo y multidisciplinar, y convendría completar este trabajo desde el punto de vista de la econometría y la gestión del riesgo. Los costes calculados en base temporal de un ciclo de

inspección se han extrapolado a costes de ciclo de vida utilizando varias simplificaciones de cálculo respecto a la tasa de retorno, la variación esperada de los costes con los años, los tipos de cambio entre divisas, etc...

Resultará de gran interés el profundizar en el estudio econométrico de una operación de mantenimiento ferroviario tipo, identificando las principales variables e indicadores que pueden impactar en el Coste de Ciclo de Vida (LCC) y desarrollando metodologías de predicción de dichas variables. Profundizar en la optimización de los costes por unidad de tiempo es primordial. Sin embargo, el proyectar la variación de estos costes a lo largo de la vida útil del activo (flota) es igualmente necesario para obtener unos costes de ciclo de vida precisos.

Perfeccionamiento en la adaptación de la herramienta informática

En la adaptación del programa de gestión de costes se pueden llevar a cabo varias mejoras, que aunque no aportarían novedad a la investigación en sí, mejorarían la practicidad de la herramienta, facilitando así el progreso de las futuras investigaciones

- *Parametrización de partidas:* En lo referente a la base de datos de precios, resultaría de interés programar APIs (Application Programming Interface) para las principales partidas, comunes a diferentes planes de mantenimiento ferroviarios independientemente de la tecnología del tren mantenido. Climatización, puertas exteriores, puertas interiores, etc...son elementos comunes que permitirían la creación de las citadas partidas paramétricas.
- *Gestión del inventario de repuestos:* Una vez introducidos los datos (precios y mediciones) en la herramienta informática resulta inmediato extraer informes resumiendo las horas anuales de mano de obra por especialidad, así como los repuestos necesarios anualmente. A partir de los listados de repuestos se propone llevar a cabo un estudio y optimización del inventario necesario para gestionar la explotación
- *Cálculo automático del Coste de Ciclo de Vida (LCC):* La adaptación propuesta permite llevar a cabo el cálculo del coste anual del plan de mantenimiento de la explotación. Se propone adaptar la herramienta, utilizando las columnas parametrizables, para calcular el Coste de Ciclo de Vida (LCC) de cada uno de los subsistemas del árbol.

Referencias

- Redondo Expósito, J. C. (2007). Un modelo matemático óptimo de mantenimiento y fiabilidad aplicado a la aviación comercial.
- González Fernández, J. (2012). Teoría y Práctica del mantenimiento industrial. FC editorial, Madrid.
- White, G. E., & Ostwald, P. F. (1976). Life cycle costing. Management accounting, 57(7), 39-42.
- Parra, C., Crespo, A., Moreu, P., Gómez, J., & Díaz, V. G. (2009). Non-homogeneous Poisson Process (NHPP), stochastic model applied to evaluate the economic impact of the failure in the Life Cycle Cost Analysis (LCCA). Proceedings of safety, reliability and risk analysis: theory, methods and applications, 929-939.
- Kirk, S. J., & Dell'Isola, A. J. (1995). Life cycle costing for design professionals.
- Riddell, H., & Jennings, A. (2001). Asset Investment & Life Cycle Costing. The Woodhouse Partnership, Technical paper, London.
- Korpi, E., & Ala-Risku, T. (2008). Life cycle costing: a review of published case studies. Managerial Auditing Journal, 23(3), 240-261.
- Ellram, L. M. (1995). Total cost of ownership: an analysis approach for purchasing. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 25(8), 4-23.
- Bhutta, K. S., & Huq, F. (2002). Supplier selection problem: a comparison of the total cost of ownership and analytic hierarchy process approaches. Supply Chain Management: An International Journal, 7(3), 126-135.
- Emblemsvag, J. (2001). Activity-based life-cycle costing. Managerial Auditing Journal, 16(1), 17-27.
- Parra, C., Márquez, A. C., Moreno, P. C., & Fygueroa, S. (2006). Ingeniería de fiabilidad aplicada al proceso de análisis de coste de ciclo de vida (accv). Revisión de modelos básicos. Ingeniería y gestión de mantenimiento: una nueva visión del mantenimiento, (47), 31-43.
- Eugene L. Grant and W. Grant Ireson, Principles of Engineering Economics, 5th. Ed., New York: The Ronald Press Co., 1970.
- US Department Of Defense (1970) Life cycle costing procurement guide. LCC-I. Interim, Washington, DC, USA.
- Ellram, L. M. (1995). Total cost of ownership: an analysis approach for purchasing. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 25(8), 4-23.
- Asiedu, Y., & Gu, P. (1998). Product life cycle cost analysis: state of the art review. International journal of production research, 36(4), 883-908.
- Fabrycky, W. J., & Blanchard, B. S. (1991). Life-cycle cost and economic analysis. Prentice Hall.

- Woodward, D. G. (1997). Life cycle costing – theory, information acquisition and application. *International Journal of Project Management*, 15(6), 335-344.
- Dunk, A. S. (2004). Product life cycle cost analysis: the impact of customer profiling, competitive advantage, and quality of IS information. *Management Accounting Research*, 15(4), 401-414.
- Fabrycky, W. J. (1997). Análisis del Coste del Ciclo de Vida de los Sistemas. Isdefe.
- Simon, D. S. (1990). Capital investment & financing decisions: H. Levy & M. Sarnat Prentice-Hall International (Hemel Hempstead, 1990), 4th edn. 711 pp.£ 34.95 (hbk).
- Elsayed, E. A. (2012). Reliability engineering (Vol. 88). John Wiley & Sons.
- de la Peña, D. G. (2004). Introducción al cálculo del LCC de vehículos ferroviarios. In *Anales de mecánica y electricidad* (Vol. 81, No. 6, pp. 38-45). Asociacion de Ingenieros del ICAI.
- De Rus, G., & Inglada, V. (1997). Cost-benefit analysis of the high-speed train in Spain. *The Annals of Regional Science*, 31(2), 175-188.
- Álvarez, O., & Herce, J. A. (1993). Líneas ferroviarias de alta velocidad en España. *Economía Aplicada*, 1(1), 5-32.
- Kjellsson, U., & Hagemann, O. UNIFE-UNILIFE AND UNIFE-UNIDATA-The First European Life Cycle Cost Interface Software Model.
- Hokstad, P., SINTEF, L., Øien, K., & Vatn, J. (1998). Life Cycle Cost Analysis in Railway Systems. *SINTEF Industrial Management*.
- Dersin, P., Dupre, D., Schiwek, L. W., Ludwig, H., Gosnet, J. P., & Schneider, M. (2001). Guidelines for life cycle cost. UNIFE, Terms and definitions for total railway systems.
- Emblemsvåg, J. (2003). Life-cycle costing: using activity-based costing and Monte Carlo methods to manage future costs and risks. John wiley & sons.
- Burström, B., Ericsson, G., & Kjellsson, U. (1994, January). Verification of life-cycle cost and reliability for the Swedish high speed train X2000. In *Reliability and Maintainability Symposium, 1994. Proceedings.*, Annual (pp. 166-171). IEEE.
- Akselsson, H., & Burström, B. (1994). Life Cycle Cost Procurement of Swedish State Railways' High-Speed Train X2000. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 208(1), 51-59.
- Edquist, C., Hommen, L., & Tsipouri, L. (2000). Introduction. In *Public Technology Procurement and Innovation* (pp. 1-4). Springer US.
- Hokstad, P., SINTEF, L., Øien, K., & Vatn, J. (1998). Life Cycle Cost Analysis in Railway Systems. *SINTEF Industrial Management*.
- Nissen, A. (2009). Development of life cycle cost model and analyses for railway switches and crossings.

- Patra, A. P., Kumar, U., & Kraik, P. O. L. (2010, January). Availability target of the railway infrastructure: an analysis. In Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2010 Proceedings-Annual (pp. 1-6). IEEE.
- Jun, H. K., & Kim, J. H. (2007, October). Life cycle cost modeling for railway vehicle. In Electrical Machines and Systems, 2007. ICEMS. International Conference on (pp. 1989-1994). IEEE.
- Kim, G. T., Kim, K. T., Lee, D. H., Han, C. H., Kim, H. B., & Jun, J. T. (2010). Development of a life cycle cost estimate system for structures of light rail transit infrastructure. Automation in Construction, 19(3), 308-325.
- Crespo Robles, E. (2008). Optimización estocástica del mantenimiento de sistemas de transporte y secado de sustancias minerales (Doctoral dissertation, Minas).
- Mazzuchi, T. A., Noortwijk, J. M., & Kallen, M. J. (2007). Maintenance optimization. Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability.
- Barlow, R. E., Proschan, F., & HUNTER, L. (1965). Mathematical Theory of Reliability. John Wiley & Sons. New York.
- Pierskalla, W. P., & Voelker, J. A. (1976). A survey of maintenance models: the control and surveillance of deteriorating systems. Naval Research Logistics Quarterly, 23(3), 353-388.
- Osaki, S., & Nakagawa, T. (1976). Bibliography for reliability and availability of stochastic systems. IEEE Transactions on Reliability, 4, 284-287.
- Nakagawa, T., & Yasui, K. (2005). Note on optimal redundant policies for reliability models. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 11(1), 82-96.
- Smith, M. L. (1981). Optimal maintenance models for systems subject to failure-a review. fNRYRL RE (SEARfCH LOGISTICS QUARfTEL [Y~, 47.
- Jardine, A. K. S., & Buzacott, J. A. (1985). Equipment reliability and maintenance. European Journal of Operational Research, 19(3), 285-296.
- Valdez - Flores, C., & Feldman, R. M. (1989). A survey of preventive maintenance models for stochastically deteriorating single - unit systems. Naval Research Logistics (NRL), 36(4), 419-446.
- Cho, D. I., & Parlar, M. (1991). A survey of maintenance models for multi-unit systems. European Journal of Operational Research, 51(1), 1-23.
- McCall, J. J. (1965). Maintenance policies for stochastically failing equipment: a survey. Management science, 11(5), 493-524.
- Dekker, R. (1996). Applications of maintenance optimization models: a review and analysis. Reliability Engineering & System Safety, 51(3), 229-240.
- Dekker, R., Wildeman, R. E., & van der Duyn Schouten, F. A. (1997). A review of multi-component maintenance models with economic dependence. Mathematical Methods of Operations Research, 45(3), 411-435.
- Pham, H., & Wang, H. (1996). Imperfect maintenance. European Journal of Operational Research, 94(3), 425-438.

- Wang, H., & Pham, H. (2006). Reliability and optimal maintenance. Springer Science & Business Media.
- Wang, H. (2002). A survey of maintenance policies of deteriorating systems. European journal of operational research, 139(3), 469-489.
- Cox, D. R. (1962). Renewal Theory, Methuen and Co. Ltd., London.
- RICHARD, E. B., & PROSCHAN, F. (1965). Mathematical theory of Reliability. SIAM, Philadelphia.
- Bartholomew, D. J. (1963). Two-stage replacement strategies. OR, 71-87.
- Bartholomew, D. J. (1963). A multi-stage renewal process. Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological), 150-168.
- Wang, H., & Pham, H. (2006). Reliability and optimal maintenance. Springer Science & Business Media.
- Jardine, A. K., & Tsang, A. H. (2013). Maintenance, replacement, and reliability: theory and applications. CRC press.
- Ascher, H., & Feingold, H. (1984). Repairable systems reliability: modeling, inference, misconceptions and their causes (p. 232). New York: M. Dekker.
- Glasser, G. J. (1969). Planned replacement- Some theory and its application(Probability theory applied to age and block replacement models in preventive maintenance of parts, noting inspection cost distribution). Journal of Quality Technology, 1, 110-119.
- Moubray, J. (1997). Reliability centered maintenance. Industrial Press.
- Vaurio, J. K. (1997). On time-dependent availability and maintenance optimization of standby units under various maintenance policies. Reliability Engineering & System Safety, 56(1), 79-89.
- Vaurio, J. K. (1997). Reliability characteristics of components and systems with tolerable repair times. Reliability Engineering & System Safety, 56(1), 43-52.
- Nakagawa, T. (1981). A summary of periodic replacement with minimal repair at failure. Journal of the Operations Research Society of Japan, 24(3), 213-227.
- Jardine, A. K., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. Mechanical systems and signal processing, 20(7), 1483-1510.
- Badia, F. G., Berrade, M. D., & Campos, C. A. (2001, June). Maintenance and monitoring policy under unrevealed failures. In Proceedings of the 10th International Symposium on Applied Stochastic Models and Data Analysis (Vol. 1, pp. 142-7).
- Badia, F. G., Berrade, M. D., & Campos, C. A. (2001). Optimization of inspection intervals based on cost. Journal of Applied Probability, 38(4), 872-881.
- Berrade, M. D. (2012). A two-phase inspection policy with imperfect testing. Applied Mathematical Modelling, 36(1), 108-114.

- Tang, T. (2012). Failure Finding Interval Optimization for Periodically Inspected Repairable Systems (Doctoral dissertation, University of Toronto).
- Zhu, Q., Peng, H., & van Houtum, G. J. (2012). A condition-based maintenance policy for multi-component systems with a high maintenance setup cost. Beta Research School for Operations Management and Logistics: Beta Working Paper series, 400.
- Cox, D. R. (1972). Regression models and life-tables. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 187-220.
- Makis, V., & Jardine, A. K. (1992). Optimal replacement in the proportional hazards model. *Infor*, 30(2), 172.
- Vlok, P. J., Coetzee, J. L., Banjevic, D., Jardine, A. K. S., & Makis, V. (2002). Optimal component replacement decisions using vibration monitoring and the proportional-hazards model. *Journal of the operational research society*, 193-202.
- Chevalier, R., Garnero, M. A., Jardine, A. K. S., Banjevic, D., & Montgomery, N. (2004, October). Optimizing CM data from EDF main rotating equipment using proportional hazard model. In *Surveillance 5 Conference*. France (Vol. 11, p. 13).
- Jeffris, T., Banjevic, D., Jardine, A. K. S., & Montgomery, N. (2004). Oil analysis of marine diesel engines: optimizing condition-based maintenance decisions. COMADEM 2004.
- Lin, D., Wiseman, M., Banjevic, D., & Jardine, A. K. Optimized Interpretation Of Maintenance Data From Gearboxes Subject To Tooth Failure.
- Shuai, L., Limin, J., Yong, Q., Bo, Y., & Yanhui, W. (2014). Research on Urban Rail Train Passenger Door System Fault Diagnosis Using PCA and Rough Set. *Open Mechanical Engineering Journal*, 8, 340-348.
- Gormaz-González, J., González-Fernández, F. J., Rodríguez-Nieto, J., & Saludes-Rodil, S. (2012). Planificación del mantenimiento de material rodante. *DYNA-Ingeniería e Industria*, 87(1).
- Choi, K. M. (1997). Semi-Markov and delay time models of maintenance (Doctoral dissertation, University of Salford, UK).
- Baker, R. D., & Wang, W. (1991). Estimating the delay-time distribution of faults in repairable machinery from failure data. *IMA Journal of Management Mathematics*, 3(4), 259-281.
- Baker, R. D., Scarf, P. A., & Wang, W. (1997). A delay-time model for repairable machinery: maximum likelihood estimation of optimum inspection intervals. *IMA Journal of Management Mathematics*, 8(1), 83-92.
- Tang, Y., Jing, J. J., Yang, Y., & Xie, C. (2014). Parameter Estimation of a Delay Time Model of Wearing Parts Based on Objective Data. *Mathematical Problems in Engineering*.

- Christer, A. H., & Waller, W. M. (1984). Delay time models of industrial inspection maintenance problems. *Journal of the Operational Research Society*, 401-406.
- Wang, W. (1997). Subjective estimation of the delay time distribution in maintenance modelling. *European Journal of Operational Research*, 99(3), 516-529.
- Christer, A. H., Wang, W., Choi, K., & Sharp, J. (1998). The delay-time modelling of preventive maintenance of plant given limited PM data and selective repair at PM. *IMA Journal of Management Mathematics*, 9(4), 355-379.
- Zajac, P. (2015). Use Of Delay-Time Concept In Modelling Process Of Technical And Logistics Systems Maintenance Performance. Case Study Zastosowanie Koncepcji Opóźnień Czasowych W Procesie Modelowania Utrzymania W Stanie Zdatności Systemów Technicznych I Logistycznych. Studium Przypadku. *Eksploatacja I Niezawodnosc*, 17(2), 174.
- Baker, R. D., & Scarf, P. A. (1995). Can models fitted to small data samples lead to maintenance policies with near-optimum cost?. *IMA Journal of Mathematics applied in Business and Industry*, 6(1), 3-12.
- Christer, A. H., & Wang, W. (1995). A delay-time-based maintenance model of a multi-component system. *IMA Journal of Management Mathematics*, 6(2), 205-222.
- Christer, A. H., Wang, W., Baker, R. D., & Sharp, J. (1995). Modelling maintenance practice of production plant using the delay-time concept. *IMA Journal of Management Mathematics*, 6(1), 67-83.
- Luss, H., & Kander, Z. (1974). Inspection policies when duration of checkings is non-negligible. *Operational Research Quarterly*, 299-309.
- Munford, A. G., & Shahani, A. K. (1972). A nearly optimal inspection policy. *Operational Research Quarterly*, 373-379.
-
-
-

ANEXO I Rutinas de Phyton utilizadas

Plot principal

```

k1 = np.logspace(-2, 3, 25) # 50                                     # 1, 2000
b1 = np.logspace( -5.30103, 1, 150 )
Ca = []
CM = []
Cm = []
for bv in b1: # bucle exterior en y
    co = []
    tm = []
    tM = []
    cm= []
    cM= []
    for kv in k1: # bucle interior en x
        f = lambda x: fCoste( kv, bv, x )
        tmin = fmin( f, 500, maxiter=50, maxfun=100 )[0]
        #t.append( tmin )

        cmin = fCoste( kv, bv, tmin )
        co.append( cmin )

        # SENSIBILIDAD DERECHA No funciona bien con FMIN....
        #f = lambda x: abs(fCoste(kv,bv,x) - (cmin+abs(cmin)*elast) )
        #fm = fmin( f, 1000, maxiter=50, maxfun=100 )
        #fm = fmin_slsqp( f, tmin, bounds=[(tmin, 1000)], iter=500 ),,
        maxfun=100 )
        #if len( fm ) > 1:
        #    print fm
        #    exit()

        #tMv = max( fm )
        #print tMv
        #tm.append( round( -(elast*cmin)/ tMv, 0 ) )
        tm.append( ((tMv-tmin)/tmin) )

        # SENSIBILIDAD IZQUIERDA funciona bien con FMIN
        #f = lambda x: abs(fCoste(kv,bv,x) - (cmin+abs(cmin)*elast) )
        #fm = fmin( f, 1, maxiter=50, maxfun=100 )
        #fm = fmin_slsqp( f, 1, bounds=[(0, tmin)], iter=500 )
        #if len( fm ) > 1:
        #    print fm
        #    exit()

        #tmv = min( fm )
        #print tmv
        #tm.append( round( -(elast*cmin)/ tmv, 0 ) )
        tm.append( ((tmin-tmv)/tmin) )

dT = 0.25
cm.append( abs( fCoste( kv,bv, tmin*(1*0.5) ) - cmin ) ) #
/abs(cmin)
cM.append( abs( fCoste( kv,bv, tmin*(1+1) ) - cmin ) ) #
/abs(cmin)

```

```
# -----
#-----#
#continue

# if tmin > 10000:
#     tM.append( -(elast*cmin)/ 3*tmin )
#     tm.append( -(elast*cmin)/ 10 )
#     continue
# tmin_int = round( tmin, 0 )
# llego = False
# tmin_int = round( tmin, 0 )
# while( True ):
#     #print tmin_int
#     #if llego:
#     #    tmin_int -= 1
#     #else:
#     #    tmin_int += 10
#     tmin_int += 1
#     if fCoste(kv,bv, tmin_int) > ( cmin + abs(cmin)*elast ) or
tmin_int > 10*tmin or tmin_int > 2000 :
#         #    llego = True
#         #
#         #if llego and fCoste(kv,bv, tmin_int) < ( cmin +
abs(cmin)*elast ) or tmin_int <=1:
#             tMbueno = tmin_int/tmin
#             tMv = ( tmin_int - tmin ) / tmin
#             #tM.append( ( -(elast*cmin) )/ tMv )
#             tM.append( tMv )
#             break
#
#     tmin_int = round( tmin, 0 )
#     llego = False
#     while( True ):
#         #print tmin_int
#         #if llego:
#         #    tmin_int += 1
#         #else:
#         #    tmin_int -= 10
#         #    if tmin_int < 1:
#         #        tmin_int = 1
#         tmin_int -=1
#         #print tmin_int
#         if tmin_int > 10000:
#             tmv = 100
#             tm.append( tmv )
#             break
#             if fCoste(kv,bv, tmin_int) > ( cmin + abs(cmin)*elast ) or
tmin_int <2 or tmin_int < ( 0.1*tmin ) or abs(tmin-tmin_int)>5000:
#                 #    llego = True
#                 #if ( llego and fCoste(kv,bv, tmin_int) < ( cmin +
abs(cmin)*elast ) ) or tmin_int <= 1:
#                     tmbueno = tmin_int/tmin
#                     tmv = tmin - tmin_int
#                     #tm.append( ( -(elast*cmin)/tmv ) )
#                     tm.append( tmv )
#                     break
# Ca.append( co )
```

```
Tma.append( tm )
TMa.append( tM )
CM.append( cM )
Cm.append( cm )

K, B = np.meshgrid( k1, bl )
#lvl_ca = [ -9,-8,-7,-6,-5,-4,-3,-2,-1,-.9,-.8,-.7,-.6,-.5,-.4,-.3,-.2,-.1]
lvl_ca = -np.logspace( -2,3, 25)
lvl_ca = [ -1000, -600, -400, -200, -150,-100, -50, -25, -20,-15,-10,-5, -2, -1.5, -1, -0.5, -0.25, -0.1,-0.05, -0.02, -0.01, -0.005, -0.002]
#lvl_ca = []
#lvl_ca = -np.linspace( 0, 1000, 26 )

CS5 = ax.contour(K, B, Ca, 25, colors='grey', alpha=0.5, levels=lvl_ca)
ax.clabel(CS5, inline=False , fontsize=10, colors='black', fmt="%1.2f")      #
inline = 0

ax.set_ylimits( 1e-4, max(bl))
ax.set_xlimits( 1e-2, 1e3)
ax.set_yscale('log')
ax.set_xscale('log')
ax.grid(True)
ax.grid(b=True, which='minor', color='grey', alpha=0.2)
```

Función cálculo coste y cálculo coste mínimo para una beta, periodo dadas.

```
import operator
def fCoste( k, beta, T ):
    if T > 0:
        return k*( exp(-beta*T) - 1 )/(beta*T) + 1/T
        #return beta*k*( exp(-beta*T) - 1 )/(beta*T) + 1/T    # caso beta = lambda
    else:
        return abs(T)*10000

def fCoste_min( beta, T ):
    k = -beta*exp(T*beta)/(T*beta - exp(T*beta) + 1)
    #k = -exp(T*beta)/(T*beta - exp(T*beta) + 1) # caso beta = lambda
    if T > 0:
        c = k*( exp(-beta*T) - 1 )/(beta*T) + 1/T
    else:
        c = abs(T)*10000
    return k, c
```

```
# CALCULO PARA UN PUNTO
print "Cálculo para un punto"
kg, beta = ( 225, 0.0005 )
f = lambda x: fCoste( kg, beta, x )
tmin = fmin( f, 500, maxiter=50, maxfun=100 )[0]
cmin = fCoste( kg, beta, tmin )
print tmin, cmin
#cmin = fCoste( kg, beta, 130 )
#print tmin, cmin
```

multiples plots PARA distintos periodos equalizando mínimo (alinea en los mínimos para ver la "apuntamiento" de la función de coste.

```
if True:
    bl = np.logspace( -2,1, 50 )
    T = [1]
    for t in T:
        for bv in bl:
            k, c = fCoste_min( bv, t )
            cp = []
            tr = np.linspace( t/2, t*2, 50)
            for ti in tr:
                cp.append( fCoste( k, bv, ti) -c )
            ax.plot( tr, cp, label='Beta = '+str(bv) )
    #ax.set_ylim( )
    ax.set_xlim( 0, 20)
    #plt.legend()
    plt.show()
```

