



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

PROYECTO FINAL DE CARRERA

INGENIERÍA INDUSTRIAL

**MODELO DE ANÁLISIS DE
PLANES DE MANTENIMIENTO DE
MATERIAL RODANTE
FERROVIARIO**



AUTOR: JOSÉ DANIEL CASAS MARTÍNEZ

DIRECTOR: EMILIO LARRODÉ PELLICER

FEBRERO 2012

RESUMEN

La teoría de cálculo de costes LCC (“Life Cycle Cost” o, en castellano “Coste de Ciclo de Vida”) tiene como objeto el definir el coste global de una instalación o equipo durante su ciclo de vida completo, incluyendo costes de adquisición y de explotación (y eliminación en su caso). El desarrollo de una metodología de análisis de costes de mantenimiento en función de la fiabilidad y la necesaria preparación de una herramienta informática de cálculo resultaría de gran interés para administraciones, operadores/mantenedores, fabricantes, la comunidad investigadora y en general el conjunto del sector puesto que:

- Serviría para analizar los costes de los planes de mantenimiento de flotas u otros activos ferroviarios, pudiendo así estudiar las variables que en cada operación llevan al punto óptimo de servicio.
- Ayudaría al proyectista a precisar, durante la fase de diseño, el impacto de utilizar con componentes distinta fiabilidad, puesto que podría calcular el coste de mantenimiento en función de dicha fiabilidad.
- Mejoraría criterios de contratación al incluir en un solo ratio todos los costes de adquisición y mantenimiento, pudiendo incluirse el de las instalaciones y equipos necesarios para llevar a cabo el mantenimiento.
- Serviría para llevar a cabo comparativas (benchmarking) de costes de bajo distintos escenarios (composiciones de flotas, etc...), para establecer y estudiar las relaciones entre diferentes subsistemas del conjunto y en general, para avanzar en futuras investigaciones en el campo del cálculo de costes de mantenimiento electromecánico ferroviario.

Por ello, lo que se pretende con el desarrollo de este PFC es adaptar una herramienta informática y establecer un modelo de cálculo de costes de mantenimiento en función de la variable clave, la fiabilidad.

AGRADECIMIENTOS

Antes de comenzar con el desarrollo de la memoria de este PFC, me gustaría dedicar unas palabras a todas las personas que lo han hecho posible:

Gracias a D. Emilio Larrodé por dirigirme durante el proyecto, por tu gran disposición a ayudar y por conseguir sacar siempre algo de su valioso tiempo para poder dedicármelo.

D. Fernando Pascual, nunca olvidaré tus charlas y las tardes realizando el proyecto, me has dado otro punto de vista de las cosas. Me has demostrado que si hace falta llamar a Bélgica o a donde haga falta para obtener información, se llama.

Agradecer a mis padres, Daniel y M^a Carmen, a mis hermanos, Guillermo y Eduardo, y a mi abuela, M^o Romero, todo el apoyo y paciencia que habéis tenido conmigo durante estos años de universidad. Siempre que me he caído habéis estado ahí para levantarme. Sé que sin vuestro cariño, que sin vuestra ayuda, jamás habría llegado hasta aquí. Gracias por demostrarme que los límites se los pone uno mismo y que con esfuerzo y trabajo se puede conseguir lo que uno se proponga. Sabéis lo mucho que os quiero y lo que significáis para mí.

Júlia, gracias por estar siempre ahí, por aguantarme, por estar siempre dispuesta a ayudarme, por saber sacarme una sonrisa, por tus ganas de ver el mundo, por la ilusión que demuestras. Gracias por ser tú.

Gracias a mis amigos, tanto a los de mi pueblo, como a los de mi vida universitaria. Por muchas veces que os haya dicho “no salgo, tengo que estudiar” aún me seguís llamando cuando hay plan, os lo agradezco.

ÍNDICE

MEMORIA.....	5
1 Introducción y motivaciones	6
2 El estado del arte.....	8
2.1. El RAMS y el enfoque LCC.	8
2.2. El mantenimiento del material rodante.....	9
2.3. Ingeniería de la fiabilidad aplicada a los vehículos ferroviarios.....	10
2.4. Las herramientas de cálculo disponibles en el mantenimiento ferroviario.....	11
3 Modelo de cálculo del coste del mantenimiento de una flota ferroviaria	13
3.1. División en componentes del material rodante.....	13
3.2. División de las tareas de mantenimiento.....	15
3.3. Resultado de esta descomposición. Conclusiones.....	18
4 Adaptación de una herramienta informática de cálculo	20
4.1. Necesidades específicas a nuestro problema	20
4.2. Software de presupuestos. Arquímedes.....	20
4.3. Creación de las Bases de Datos	21
4.4. Resultado Final	22
5 Modelo de cálculo de la relación entre mantenimiento preventivo y mantenimiento correctivo en función de la fiabilidad.....	23
5.1. Fiabilidad. Definición. Distribuciones tasa de fallo.	23
5.2. Selección de la distribución de fallo. Métodos de cálculo.	24
5.2.1. Cálculo de la fiabilidad de forma teórica. Ejemplo.	26
5.2.2. Cálculo de la fiabilidad de forma experimental. Ejemplo.	27
5.3. Modelo de cálculo del número de operaciones de mantenimiento preventivo anuales.	29
5.4. Modelo de cálculo del número de operaciones de mantenimiento correctivo anuales.	31
5.5. Resolución de un equipo completo.....	32
6 Validación del modelo. Análisis de sensibilidad.....	35
7 Conclusiones y futuras líneas de investigación.....	38

ANEXOS	40
ANEXO A: EL MANTENIMIENTO FERROVIARIO	41
ANEXO B: INGENIERÍA DE LA FIABILIDAD	83
ANEXO C: EL LCC FERROVIARIO	112
ANEXO D: CÁLCULOS	126
LISTA DE TABLAS.....	164
LISTA DE FIGURAS.....	165
BIBLIOGRAFÍA.....	168

MEMORIA

1 Introducción y motivaciones

La teoría de cálculo de costes LCC (“Life Cycle Cost” o, en castellano “Coste de Ciclo de Vida”) tiene como objeto el definir el coste global de una instalación o equipo durante su ciclo de vida completo, incluyendo costes de adquisición y de explotación (y eliminación en su caso).

En el caso del sector ferroviario, toma una especial importancia el coste del mantenimiento, tanto a la hora de la venta de este servicio o a la hora de la comparación entre diferentes ofertas. Además, hoy en día es de especial importancia en concepto de fiabilidad en este sector, ya que cada vez aparece más en el pliego de condiciones de los equipos. Por ello, el desarrollo de una metodología de análisis de costes de mantenimiento en función de la fiabilidad y la necesaria preparación de una herramienta informática de cálculo resultaría de gran interés para administraciones, operadores/mantenedores, fabricantes, la comunidad investigadora y en general, el conjunto del sector.

Tras analizar los diferentes softwares de cálculo, tal y como se expone en el Anexo C, sale a la luz la necesidad de una herramienta de cálculo de costes de mantenimiento propia para el material rodante, por lo que se opta por establecer una metodología de cálculo para tal fin, expuesta en el punto número 2 de este PFC, como de la adaptación de una herramienta informática, debido a la necesidad de una potencia de cálculo muy alta (muchos equipos, datos y valores diferentes). El cómo se ha adaptado una herramienta para tal fin viene expuesto en el tercer punto del presente documento.

Siendo igual de importante que lo anterior, es el cálculo de la fiabilidad de un componente, equipo o sistema, ya que esta será la variable bajo la cual se ha establecido un modelo de cálculo del número de operaciones de mantenimiento preventivo y de mantenimiento correctivo anuales. La explicación de cómo se ha solucionado este problema y el modelo mencionado anteriormente se encuentran en el punto número 4 del documento.

El siguiente paso es el cálculo de los costes en función del modelo de obtención de las operaciones de mantenimiento, tanto preventivo como correctivo, y para ello se utiliza la herramienta adaptada para tal fin. En el punto número 5 del PFC se ha desarrollado la resolución de un ejemplo completo, de tal forma que permite observar cómo varían los costes en función de la fiabilidad deseada. Además, esto también es útil de cara al proyectista de un nuevo equipo, ya que le ayudaría a precisar, durante la fase de diseño, el impacto de utilizar con componentes distinta fiabilidad, puesto que podría calcular el coste de mantenimiento en función de dicha fiabilidad.

Además, el modelo propuesto serviría para llevar a cabo comparativas (benchmarking) de costes de bajo distintos escenarios (composiciones de flotas, etc...), para establecer y estudiar las relaciones entre diferentes subsistemas del conjunto y en general, para avanzar en futuras investigaciones en el campo del cálculo de costes de mantenimiento electromecánico ferroviario.

MODELO DE ANÁLISIS DE PLANES DE MANTENIMIENTO DE MATERIAL RODANTE FERROVIARIO

Para finalizar, se establece un análisis de sensibilidad del modelo, desarrollado en el punto 6, para poder comprobar la variación de los costes en función de un nuevo parámetro, I , denominado índice de confianza, en cual analizará la posible variación de los km recorridos a una fiabilidad dada, siendo siempre conservador en el cálculo, ya que serán siempre menos kilómetros de los obtenidos mediante el modelo.

Cabe mencionar la importancia de la investigación realizada y la dificultad de encontrar valores fiables para el desarrollo del modelo, ya que las tasa de fallo o el acceso a históricos es algo que no se comparte, es confidencial.

2 El estado del arte

2.1. El RAMS y el enfoque LCC.

El planteamiento del cálculo de costes LCC comienza a tomar forma, en ciertos programas del Departamento de Defensa de los Estados Unidos aproximadamente a finales de 1968. Su desarrollo en otras áreas, sobretodo en el campo militar, fue progresivo hasta que a principios de los 80 se introdujo a otras industrias entre ellas la ferroviaria.

“Life cycle cost: A method for reducing costs and improving railway vehicles”, artículo expuesto por Stern, J. en 1993 en el “World Congress on Railroad Research” nos indica los inicios de un método unificado de cálculo de costes en el sector ferroviario. El mismo Stern, J. en junio de 1996 publica el artículo “Life cycle costing of railway vehicles” en la “European Railway Review” en el mismo sentido.

Queda pues entendido por LCC todos los costes asociados con el ciclo de vida del sistema como lo define el texto de 1995 “Maintainability: A key to Effective Serviceability and Maintenance Management” (New York, John Willey and Sons Inc.) de B.S. Blanchard, D. Verma and E.L. Peterson, que agregan que estos costes incluyen: costes de investigación y desarrollo, de construcción y producción, de operación y mantenimiento, y de retiro y/o eliminación.

En 1991 nace UNIFE (Asociación Europea de Industrias Ferroviarias) tras la fusión de AICMR, AFEDEF y CELTE. En 1999 además, el CENELEC (Comité Europeo de Normalización Electrotécnica) define los elementos básicos del RAMS en la primera norma europea (EN 50126) para el sistema ferroviario. Se define pues la fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad (RAMS) como una característica de operación a largo plazo de un sistema y en la que la aplicación de los conceptos, métodos, herramientas y técnicas que establece la ingeniería se dan durante todo el ciclo de vida del sistema. Además, esta norma está a la orden día, ya que se exige la demostración de la estas variables a la entrega del producto.

Siguiendo la norma citada anteriormente, la fiabilidad es una probabilidad, de ahí la importancia de los estudios estadísticos aplicados al mantenimiento. Basado en estos estudios de estadística aplicados al mantenimiento A. Danek y M. Richtar aportan nuevos métodos matemáticos de cálculo para la evaluación de costes del LCC de vehículos ferroviarios en su artículo “New Approaches to the Life Cycle Costs Philosophy of the Railway Vehicles” (2003). El artículo redactado por David González de la Peña “Introducción al cálculo del LCC de vehículos ferroviarios” en diciembre de 2004, aporta una visión acerca de la utilidad, limitaciones y previsiones de futuro del LCC en el ámbito ferroviario. En él se deja claro que un LCC debe ser una característica inherente al equipo, como lo es su peso o sus dimensiones. D. Gonzalez recalca que la información a utilizar debe estar basada en la experiencia y cálculos teóricos del fabricante, la experiencia del cliente como operador y la información de los fabricantes de subsistemas, incidiendo en la utilidad transversal de los análisis LCC en la industria ferroviaria (operador-fabricante de flota-fabricantes de equipos).

2.2. El mantenimiento del material rodante.

El mantenimiento del material rodante no es sencillo, ya que es un sistema muy complejo con un número de componentes muy elevado y que no deben tratarse por igual. En el Anexo A del presente PFC se expone un modelo de propio de ordenación de estos sistemas. Además, si se desea obtener un información muy detalla, se puede consultar el conjunto tres de normas UNE – EN – 15380 “Aplicaciones ferroviarias: Sistema de designación para vehículos ferroviarios” donde hay una descomposición de elementos de un sistema ferroviario.

No obstante, para el adecuado mantenimiento son necesarias un conjunto de instalaciones mecánicas, eléctricas y de limpieza, las cuales son explicadas en el mismo anexo que lo anterior, es decir, en el Anexo A.

Como se ha podido observar en el apartado anterior, el mantenimiento ferroviario es de especial interés para el cálculo del LCC debido a los costes que conlleva. Según la norma AFNOR (NF X 60-010) se pueden establecer las siguientes tipologías de mantenimiento:

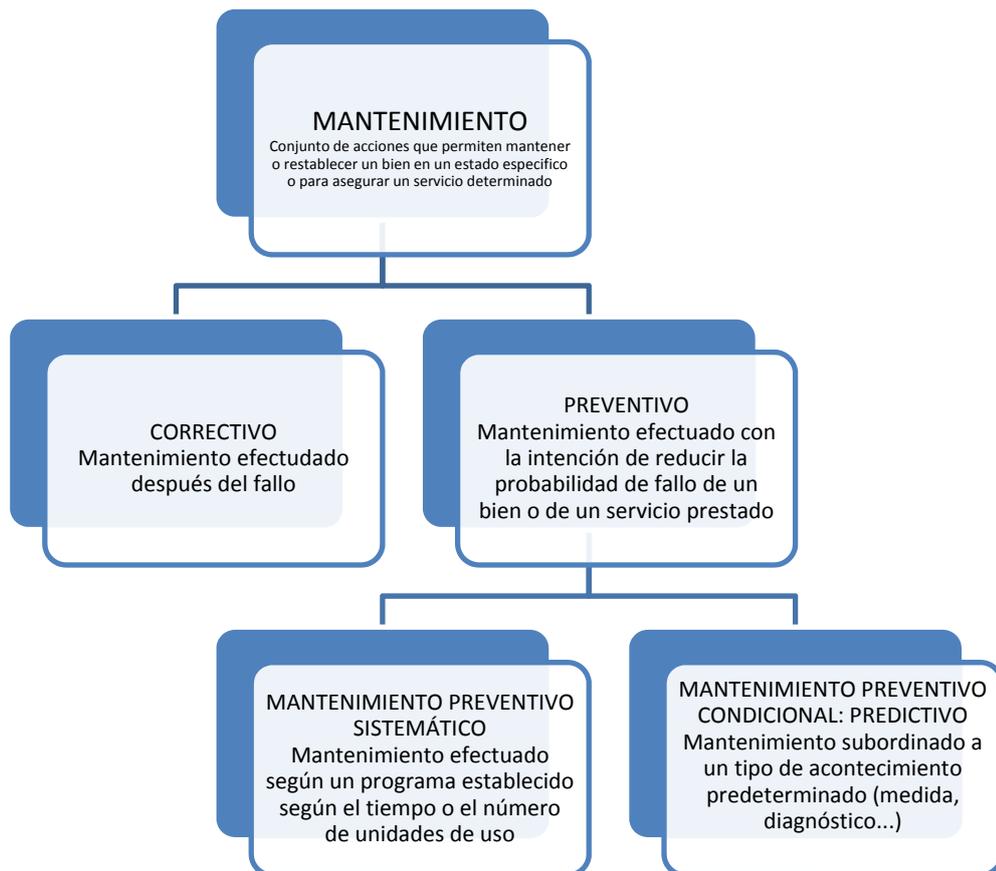


Figura 1 – Mantenimiento según AFNOR

Además, según el artículo “Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment” de la N.A.S.A, publicado en febrero del 2000, habla, entre otras, de una tipología más de mantenimiento, el proactivo, que incluye un posible rediseño del sistema/componente

para la mejora del mantenimiento. También en 2000 la facultad de informática de la Universidad Politécnica de Madrid y ADEPA (Paris) publican un estudio conjunto titulado "Study Of Existing Reliability Centered Maintenance (RCM) Approaches Used In Different Industries", en el que se describe el estado actual de la metodología "Reliability Centred Maintenance" (RCM) y se revisan las diferentes herramientas informáticas de tratamiento de bases de datos de fiabilidad de componentes para llevar a cabo modelos de riesgo, simulaciones, etc...de gran interés cuando se lleva a cabo la implementación de una herramienta RCM.

Se puede pensar que la clave para una correcta optimización del coste de mantenimiento será establecer una relación entre las diferentes tipologías de mantenimiento. Adolfo Alcalá (CULTCA) propone en su artículo "Propuesta de un modelo matemático de optimización de costos en mantenimiento correctivo" (2006) un planteamiento matemático de gran utilidad que relacionan los costes de mantenimiento preventivo y correctivo.

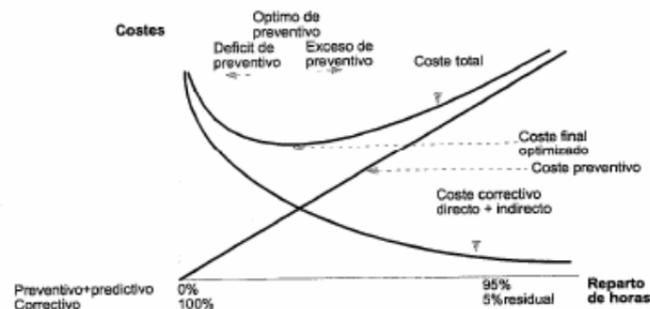


Figura 2 – Costes Mantenimiento Preventivo y Correctivo

Esta relación entre ambas tipologías de mantenimiento no queda especificada de una manera concisa, por lo que con el presente PFC, se pretende encontrar esa relación a través de la fiabilidad.

2.3. Ingeniería de la fiabilidad aplicada a los vehículos ferroviarios.

Para poder relacionar de una forma clara, ordenada y científica la fiabilidad con el mantenimiento se ha contactado con importantes empresas del sector ferroviario, como "Construcción y Auxiliar de Ferrocarriles" (CAF) y "Tren Articulado Ligero Goicoechea Oriol" (Talgo) y la respuesta de ambas fue la misma, que los cálculos de fiabilidad son "si el cliente lo solicita" y no para el mantenimiento y en ningún caso, este mantenimiento se centra en la fiabilidad, se realiza según la experiencia, por históricos propios o través de bases de datos como puede ser el "Military Handbook MIL-HDBK-217 - Reliability Prediction of Electronic Equipment" o a través de bibliografía como el NPRD-95 "Non-electronic Parts Reliability Data".

Sin embargo, lo anterior es posible siempre y cuando se tenga unas bases de datos apropiadas y se tenga acceso a ellas, lo cual no resulta sencillo. Además, si el componente es nuevo, habrá que calcular esta fiabilidad de forma teórica. Para estos cálculos se puede utilizar el "Naval Surface Warfare Center – Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical

Equipment”, de 2011 o siguiendo el procedimiento descrito, por ejemplo, en el “Military Handbook MIL-STD-756 - Reliability Modelling and Prediction”.

La optimización del mantenimiento en función de la fiabilidad se denomina RCM “Reliability Centered Maintenance”. La norma CEI – 60300 – 11 “Dependability Maintenance Part 3-11: Application Guide – Reliability Centered Maintenance” nos expone las virtudes de este tipo de mantenimiento, así como los pasos a seguir para aplicarlo.

Además, según el artículo de D. Milutinović y V. Lučanin “Relation of Reliability and Availability of Railway Vehicles” de la universidad de Belgrado, se establece una relación entre la fiabilidad y la disponibilidad.

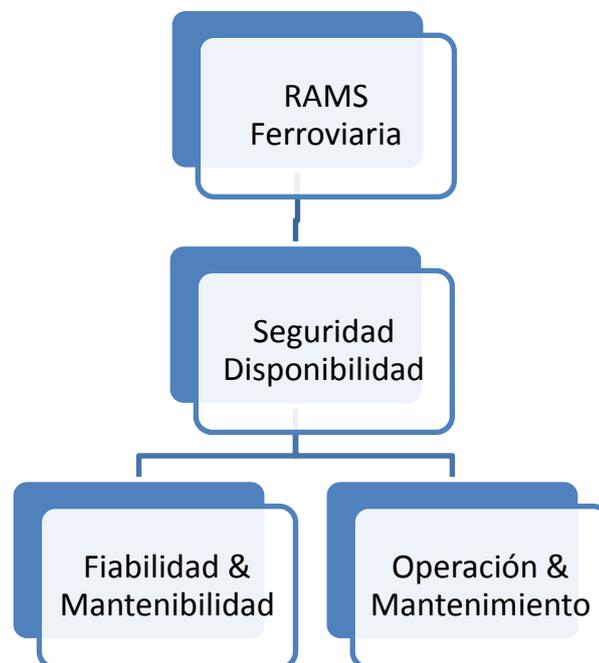


Figura 3 – Relación entre fiabilidad y disponibilidad

Como lo que se pretende con el PFC es establecer la relación entre la fiabilidad y el mantenimiento, esto lleva a que la fiabilidad es una variable fundamental para la explotación óptima de la flota de vehículos.

2.4. Las herramientas de cálculo disponibles en el mantenimiento ferroviario

En lo que respecta al cálculo de costes de mantenimiento en el ámbito ferroviario, UNIFE ha desarrollado la base de datos de costes UNIDATA.xls que luego es procesada en otra hoja de cálculo llamada UNILIFE.xls. Es este software el único disponible actualmente para que fabricantes, operadores y administraciones del sector ferroviario realicen cálculos LCC, que influye en la compra y en el plan de mantenimiento de las unidades.

En lo referente a las herramientas informáticas existentes para el cálculo de LCC, INNTRACK lleva a cabo en su informe "Benchmark of LCC tools" (2008) una comparativa objetiva entre los software de LCC comerciales UNIFE-UNILIFE (UNIFE, Belgica), CATLOC (Systecon AB, Suecia), D-LCC (ALD, Deutsche Bahn AG), LCCWare (Isograph), Relex LCC (Relex) concluyendo que existen puntos de mejora en todos ellos en temas como la importabilidad de datos, la flexibilidad de adaptación de los modelos a lo largo del tiempo, la capacidad de explotación de datos y la imposibilidad de incorporar simulaciones de Montecarlo.

En el artículo "Maintenance Cost Prediction Model for Railway Vehicle" de Hyun-Kyu Jun, Jae-Hoon Kim, Jun-Seo Park se simulan los costes de mantenimiento en un caso real simulado y se demuestra la gran diferencia en influencia que existe entre los costes del mantenimiento preventivo frente a los costes de mantenimiento correctivo. Hyun-Kyu Jun desarrolla además en 2007 un modelo LCC para vehículos ferroviarios urbanos.

Centrándonos en el cálculo de fiabilidad, existe software relacionado como puede ser "Weibull ++" de Reliasoft, mediante el cual gracias a una serie de ensayos realizados previamente podemos obtener la distribución de la tasa de fallo aproximada mediante la curva de Weibull. Otros softwares de este fabricante son " λ Predict", el cual puede darnos una tasa de fallo basándose en los principales estándares de predicción de fiabilidad (MLT-HDBK-217, Bellcore/Telcordia, NSWC Mechanical), "XFMEA", que se trata de un software para el análisis del modo de fallo para obtener criticidades y así, poder mejorar el diseño, "BlockSim", mediante el cual se pueden representar gráficamente diagramas de bloques de fiabilidad para posteriormente analizarlos.

Por último, el artículo "Study of Existing Reliability Centered Maintenance (RCM) Approaches Used in Different Industries", de la Universidad Politécnica de Madrid, se hace una comparativa entre el diferente software para el cálculo del RCM ("RCMcost", "RCM Turbo", entre otros muchos). Además, en el mismo artículo nos expone diferentes bases de datos relacionadas con el cálculo de RCM, como pueden ser datos sobre fiabilidad, tasas de fallo, etc.

Otro software de RCM, perteneciente al fabricante Reliasoft es RCM++. Lo novedoso es que puede comparar varios planes de mantenimiento, en función del coste o de la disponibilidad, pero su manejo no es sencillo y además no está relacionado con el tema ferroviario.

3 Modelo de cálculo del coste del mantenimiento de una flota ferroviaria

En este apartado se va a proponer un modelo para el cálculo del coste de mantenimiento de una flota ferroviaria.

3.1. División en componentes del material rodante

Para entender de la mejor forma posible todo lo que conlleva el material rodante, y poder aclararnos a la hora del cálculo del coste de mantenimiento se tiene que dividir el conjunto global.

Para ello, se debe realizar una división de los diferentes sistemas que componen el material rodante. Se pueden dividir en los siguientes sistemas:

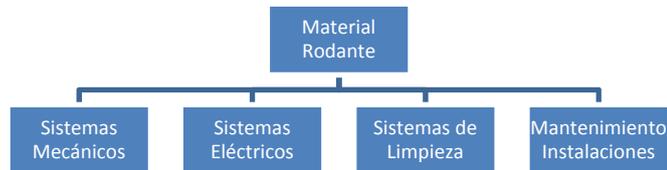


Figura 4 – Descomposición del material rodante es sistemas

Se introduce en este apartado una partida de Mantenimiento de Instalaciones, ya que se considera que cuánto mejor son las instalaciones y mejor organizadas se tengan, más fácil será realizar el mantenimiento del material rodante. Además, las instalaciones para el mantenimiento de material rodante son muy costosas y por tanto, se deben incluir dentro del coste del mantenimiento para el cómputo global del LCC.

A su vez, cada uno de estos sistemas se subdivide en una serie de elementos:

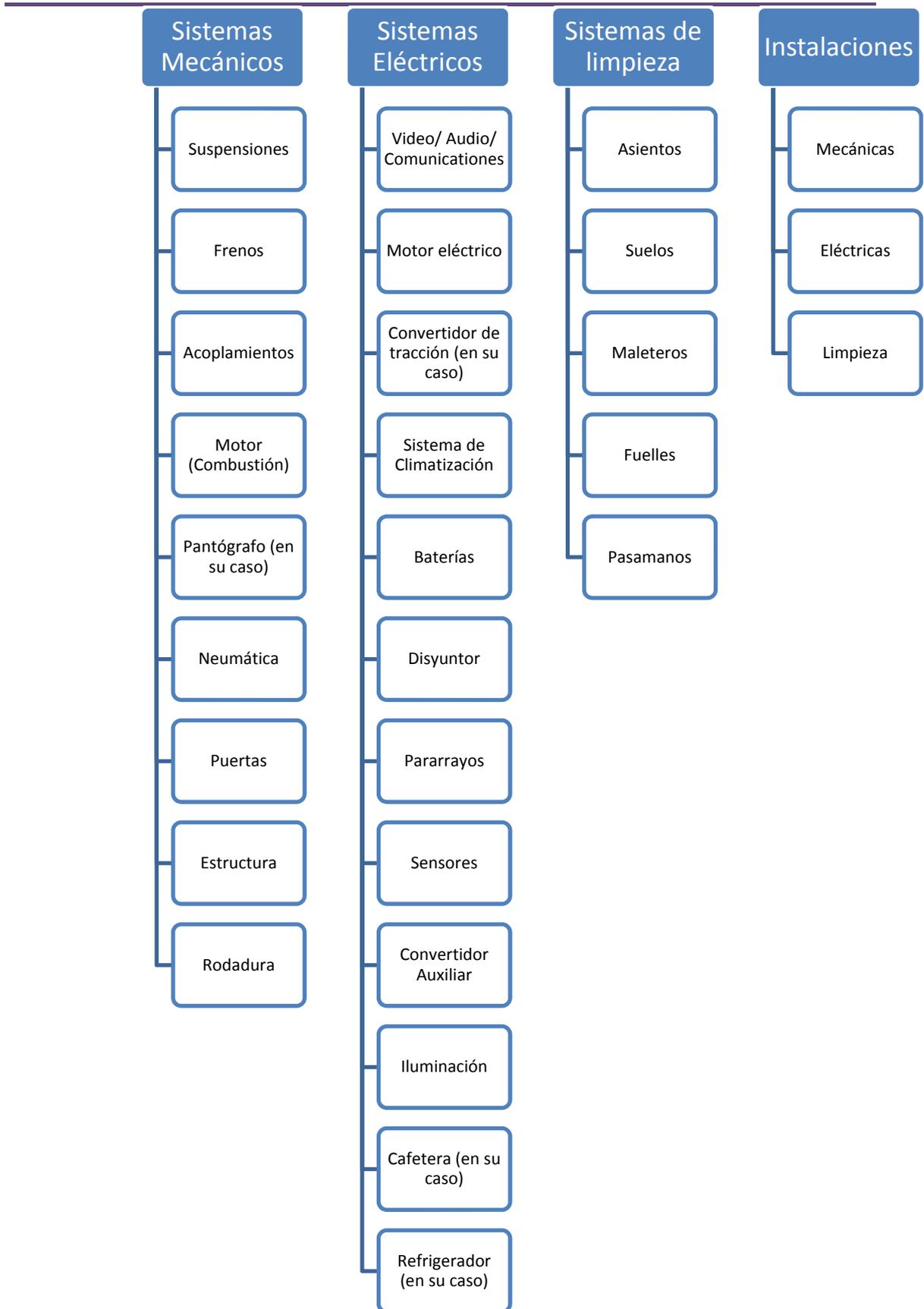


Figura 5 – Descomposición de los sistemas

Además, para ser más precisos, hay elementos que están compuestos por una serie de componentes. En la siguiente figura se muestra el caso de los elementos de freno:

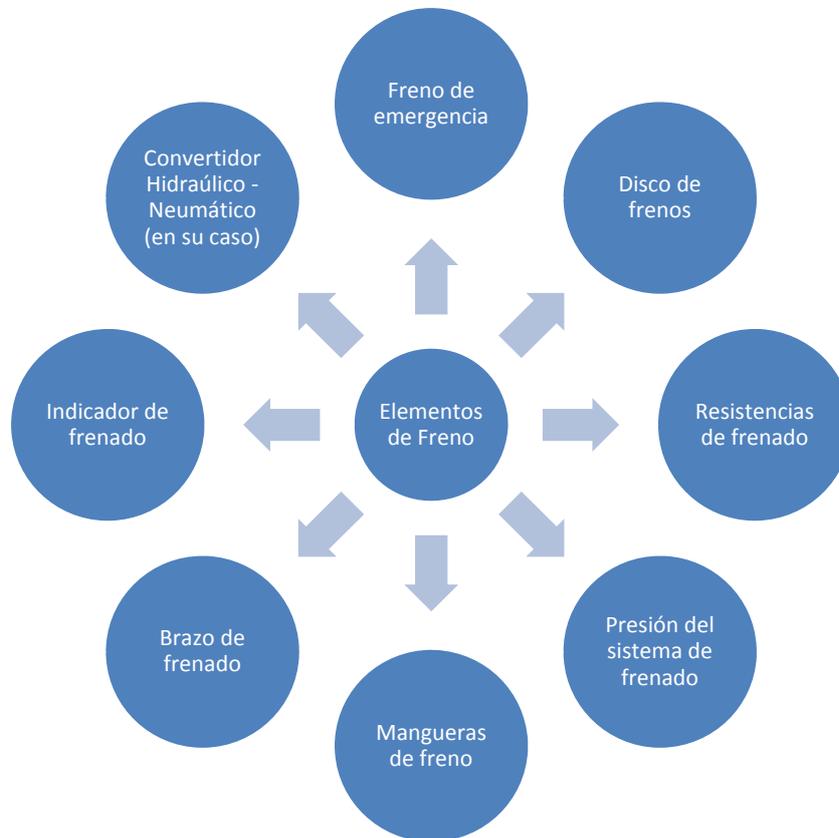


Figura 6 – Descomposición de los elementos de frenado

Para saber en qué consiste cada uno de los elementos, componentes e instalaciones, así como cuál es su función, ver el Anexo A del documento.

3.2. División de las tareas de mantenimiento

Una vez “descompuesto” el material rodante en componentes más sencillos, ahora se trata de dividir las diferentes operaciones de mantenimiento que se realizarán a cada componente/elemento. El mantenimiento se puede dividir, según la norma IEC 60300 Parte 3-11 en operaciones de mantenimiento preventivo y operaciones de mantenimiento correctivo.

El siguiente paso es subdividir cada una de estas operaciones en tareas más sencillas, y estas tareas habrá que traducirlas a términos de costes. La siguiente figura representa la subdivisión del mantenimiento.

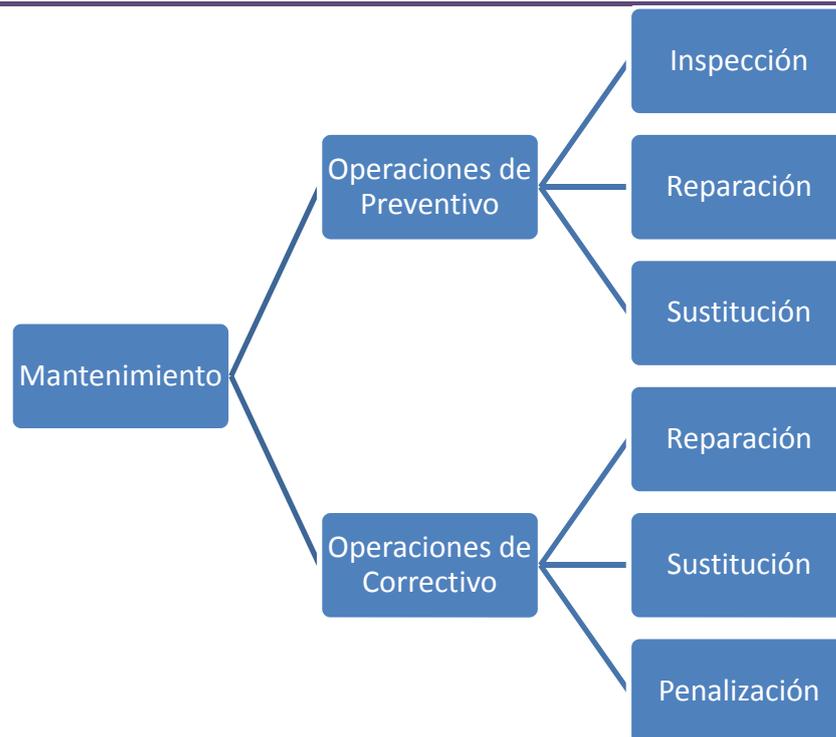


Figura 7 – Descomposición de las Operaciones de Mantenimiento

Para comprender mejor la subdivisión realizada a cada mantenimiento se expondrá lo que conlleva cada una de las tareas citadas anteriormente, así como los costes asociados a cada una de ellas:

- Inspección

“Examen de un elemento frente a una norma concreta” (según la norma 200001-3-11, Gestión de la Confiabilidad, guía de aplicación, mantenimiento centrado en la fiabilidad”.

En el presente PFC, cuando se menciona inspección hace referencia a la comprobación del elemento o sistema para garantizar que se encuentra en perfectas condiciones.

Los costes asociados a la inspección se establecen a través de un número concreto de horas de oficial de mantenimiento, cuyo número depende de cada equipo a inspeccionar.

- Reparación

Una reparación consiste en la devolución a un estado de correcto funcionamiento de un bien o equipo, es decir, devolver a ese equipo la capacidad de realizar su función adecuadamente.

Para el modelo expuesto, la reparación se descompone en costes de oficial de mantenimiento, costes de peón de mantenimiento y un coste asociado al uso de materiales auxiliares, expuesto como un porcentaje de la suma de los otros dos componentes.

Su aportación, tanto para el coste de mantenimiento preventivo como para el coste de mantenimiento correctivo se establece a través de un porcentaje, el cual es variable según el equipo a analizar. Este valor se obtiene del estudio de históricos o de la propia experiencia del fabricante. Otro modo sería estimarlo en función de las partes que componen el equipo, a través de análisis de fiabilidad.

- **Sustitución**

Es la eliminación de un elemento o equipo completamente del sistema, ya que no es válido para realizar la función para la que estaba diseñado o debido a que su reparación no es económicamente favorable, y la puesta en su lugar de otro el cuál está en plenas condiciones.

Los costes asociados a una sustitución se han modelado como unos costes de oficial de mantenimiento, unos costes de peón de mantenimiento, el coste del equipo a sustituir y un coste asociado al uso de materiales auxiliares.

Su aportación al coste, tanto de mantenimiento preventivo como de correctivo, es a través de un porcentaje, el cual se puede estimar del mismo modo que en el caso de la reparación.

- **Penalización:**

Una penalización es una sanción económica (en este caso) causada por algún tipo de fallo.

La penalización es parte sólo del coste de mantenimiento correctivo, ya que el fallo de un componente de una forma no prevista puede acarrear gastos adicionales.

Se consideran cuatro tipos diferentes de penalizaciones, en función de la severidad que ocasione al vehículo:

- Penalización por confort: es un coste adicional debido a las molestias que puede ocasionar un fallo en el bienestar de los pasajeros. Se le da un valor estimado de 200€.
- Penalización de servicio: consiste en la imposibilidad de ofrecer un servicio determinado. Se le da un valor de 200€.
- Penalización por retraso mayor de 15 minutos: se modela con un valor de 1000€.
- Penalización por retraso superior a 2 horas o cancelación: se la da un valor de 1900€.

Las penalizaciones se introducen en el modelo como un porcentaje, es decir, existe un porcentaje determinado de que la necesidad de un mantenimiento correctivo implique una penalización de alguno de los tipos citados anteriormente.

Recalcar que en el apartado de mantenimiento preventivo, los porcentajes de asignados a reparaciones y sustituciones no tienen que sumar uno, ya que no todas las inspecciones realizadas conllevarán una de estas tareas.

Por el contrario, en el apartado de mantenimiento correctivo, la suma de los porcentajes asignados a operaciones de reparación y sustitución sí que tienen que ser igual a uno, ya que siempre que se tenga que realizar una operación de mantenimiento correctivo conllevará, o una reparación, o una sustitución.

Para estimar el tiempo de inspección, sustitución o reparación de cada aparato; existen muchos métodos estadísticos utilizables para llegar a un valor estándar entre los tiempos más favorables y los más desfavorables. Uno de ellos podría ser, por ejemplo, el de tiempo medio de operación:

$$D = \frac{a + 4 \cdot m + b}{6}$$

Donde:

- D = Tiempo medio de Operación
- a = Tiempo más optimista para la operación
- m = Tiempo más probable para la operación
- b = Tiempo más pesimista para la operación

3.3. Resultado de esta descomposición. Conclusiones.

Gracias a esta descomposición se puede obtener de una forma ordenada todo lo necesario para realizar el coste del plan de mantenimiento.

Se va a mostrar un ejemplo, de un único componente, realizado en la plataforma de "Microsoft Office Excel", para comprender mejor la descomposición descrita anteriormente, así como los datos que habría que introducir:

MODELO DE ANÁLISIS DE PLANES DE MANTENIMIENTO DE MATERIAL RODANTE FERROVIARIO

Unidades	Explicación			Cantidad	Coste
A	Eléctricos			1	3019,20
	A.1	Sistema Climatización		1	3019,20
		Mantenimiento Preventivo		1,00	581,06
			Inspección	1	10,00
			H. Ofic Mec	0,5	20,00
			Sustitución	0,1	5294,20
			H. Ofic Mec	4	20,00
			H. Peón Mec	4	15,00
			Equipo	1	5000,00
			%Aux	3	5140,00
			Reparación	0,3	82,40
			H. Ofic Mec	2,5	20,00
			H. Peón Mec	2	15,00
			%Aux	3	80,00
		Mantenimiento Correctivo		1	2438,13
			Sustitución	0,4	5294,20
			H. Ofic Mec	4	20,00
			H. Peón Mec	4	15,00
			Equipo	1	5000,00
			%Aux	3	5140,00
			Reparación	0,6	82,40
			H. Ofic Mec	2,5	20,00
			H. Peón Mec	2	15,00
			%Aux	3	80,00
			Penalización	1	200,00
			Fallo Confort	1	200,00
			Fallo servicio	0	200,00
			>15 min	0	1000,00
			>2 horas o ca	0	1900,00

Tabla 1 – Desglose de los costes de un sistema de climatización

Tras esta implementación, se muestra, claramente una serie de inconvenientes para realizar el coste del plan de mantenimiento sobre “Excel”, por lo que para solventarlos, se ha adaptado una herramienta informática para nuestro fin.

4 Adaptación de una herramienta informática de cálculo

Tal y como se ha podido apreciar anteriormente, las hojas de cálculo son muy oportunas para este trabajo aunque se hace demasiado compleja la modificación de costes variables como pueden ser el coste de las hora-hombre o los costes de los materiales de recambios. Y por este motivo en este documento se ha elegido realizar éste cálculo de costes de mantenimiento adaptando un software universal de control de costes para construcción a un software de cálculo de costes de mantenimiento para un año de un conjunto de vehículos ferroviarios creando dos bases de datos en las que aparecen tanto las partes en las que se divide el vehículo ferroviario como las diferentes operaciones que hay que realizar en él. El software elegido a sido 'Arquímedes (versión gratuita estudiantes)'.

4.1. Necesidades específicas a nuestro problema

Como se ha demostrado en el apartado anterior, y partiendo además del precedente de UNIFE-UNILIFE, de dónde la herramienta "Excel" resulta complicada manejar para este propósito, se van a enumerar las necesidades específicas para resolver nuestro problema:

- Manejo de un elevado volumen de datos.
- Control del coste de mantenimiento, tanto por partes como el global.
- Actualización constante, tanto de precios de horas hombre como de materiales, así como posibles variaciones en el número de reparaciones, sustituciones y penalizaciones. Además, tras la implantación del un RCM, el número de preventivos y correctivos anuales también sufrirá variaciones.
- Visualmente atractivo, claro, conciso y fácilmente entendible. Esto nos sugiere un escandallo que nos permita obtener de un vistazo la información deseada.
- Gran potencia de cálculo.

4.2. Software de presupuestos. Arquímedes.

Tras una búsqueda de softwares propios de mantenimiento, se ha observado que no existe ninguno con las suficientes herramientas que se necesitan y que por otro lado sea de libre utilización (sin coste). Por lo que, tal y como se ha mencionado al inicial de este apartado, se ha optado por la adaptación de un software universal de control de costes del ámbito de la construcción, se ha escogido CYPE Arquímedes 'Versión estudiantes'.

Este software escogido presenta lo que se demanda en cuanto a presentación, ya que se observa un árbol de elementos que se puede diferenciar en las partes que se crean oportunas. Además, existe una base de datos en la que ya se encuentran elementos aplicables como mano de obra, pero con la posibilidad de ampliarla en cuanto a materiales, ya que en la base de datos habrá elementos relacionados con la construcción y necesitaremos crear elementos propios del sistema ferroviario.

Es importante señalar que al no ser un software de mantenimiento, deberemos alimentarlo a través de una hoja de cálculo en la podremos modificar las variables generales del sistema, como podrán ser, kilómetros recorridos anualmente, número de coches, número de conjuntos de trenes, fiabilidad exigida y número de operaciones de mantenimiento preventivo o correctivo anuales.

Si se desea conocer más sobre este software, se recomienda visitar su página web oficial: <http://arquimedes.cype.es>.

4.3. Creación de las Bases de Datos

Ahora que se ha comprendido mejor el funcionamiento de Arquímedes, hay que crear las bases de datos necesarias para el objetivo propuesto. Para tal fin, se proponen dos bases de datos diferenciadas:

- Creación de una base de datos CBS (Cost Breakdown Structure), en la cual deben figurar:
 - Los elementos del tren involucrados en el cálculo, para lo cual se seguirá el escandallo tipo expuesto en el apartado 2.1 de este documento, y de modo que en él quede reflejado un modelo patrón para poder adaptar diferentes tipos de flotas y;
 - El modelo de operaciones de mantenimiento descrito en el punto 2.2 de este documento, incluyendo los tiempos medios de las operaciones recopilados a través de históricos y experiencias, tanto de proveedores como de clientes. Estos históricos deberán incluir el porcentaje de reparaciones y sustituciones, imprescindible para el cálculo.

Código	Doc	Pli	Ud	Resumen	Cant.	Coste	Importe
GENERAL ...				Presupuesto plan de mantenimiento ferroviario	1,000	46.717,67	46.717,67
MEC				Sistemas mecánicos	1,000	38.393,98	38.393,98
SUSP				Elementos de suspensiones	1,000	28.524,12	28.524,12
FRE				Elementos de frenos	1,000	9.869,86	9.869,86
F1				Freno de emergencia	1,000		
F2				Disco de freno	1,000		
F3				Presión sistema de freno	1,000		
F4				Mangueras de freno	1,000		
F5				Brazo de frenado	1,000		
F6				Convertidor hidráulico-neumático	1,000	9.869,86	9.869,86
MPf6		ud		Mantenimiento Preventivo	0,250	7.046,02	1.761,51
InspPf6		ud		Inspecciones	60,000	2,00	120,00
SustPf6		ud		Sustituciones	4,000	1.599,08	6.396,32
OMEC		Horas		Oficial Mecánico	1,500	20,00	30,00
P MEC		Horas		Peón Mecánico	1,500	15,00	22,50
F6M		ud		Convertidor Hidráulico-Neumático	1,000	1.500,00	1.500,00
%Mat		%		Materiales Auxiliares	3,000	1.552,50	46,58
RepaPf6		ud		Reparaciones	6,000	54,08	324,48
MCI6		ud		Mantenimiento Correctivo	5,000	1.621,67	8.108,35
SustCf6		ud		Sustituciones	0,400	1.599,08	639,63
RepaCf6		ud		Reparaciones	0,600	54,08	32,45
PenaCf6		ud		Penalizaciones	0,750	1.203,15	902,36
15min		ud		Retraso > 15min	0,750	970,87	728,15
2horas		ud		Retraso > 2h ó cancelación	0,250	1.900,00	475,00

Figura 8 – Base de Datos CBS

MODELO DE ANÁLISIS DE PLANES DE MANTENIMIENTO DE MATERIAL RODANTE FERROVIARIO

- Creación de una base de datos de precios, para la cual habrá que considerarse:
 - Los costes de materiales, información ajustable a los precios dados por proveedores de subsistemas y componentes.
 - Los costes de horas hombre, de acuerdo a los convenios existentes y considerando el factor de corrección para las horas no productivas o llamadas “horas muertas”. Cabe resaltar que el coste de horas hombre representa alrededor de un 55% del mantenimiento según algunos autores.
 - Los costes de instalaciones y mantenimiento de las mismas.

Código	Doc	Pli	Ud	Resumen	Cant.	Coste	Importe
TIPOS MAN..				Tipos mantenimiento	1,000		
TP				Operaciones de mantenimiento	1,000		
OPE				Operarios	1,000		
Of.Me.		ud		Oficial Mecánico		20,60	
Pe.Me.		ud		Peón Mecánico		15,45	
Of.El.		ud		Oficial Electricista		20,60	
Pe.El.		ud		Peón Electricista		15,45	
Of.Li.		ud		Oficial Limpieza		20,60	
Pe.Li.		ud		Peón Limpieza		15,45	
MAT				Materiales para recambios	1,000		
PEN				Penalizaciones	1,000		
CONF		ud		Fallo de confort		200,00	
SERV		ud		Fallo de servicio		200,00	
15min		ud		Retraso > 15min		1.000,00	
2h		ud		Retraso > 2h ó cancelación		1.900,00	

Figura 9 – Base de Costes

4.4. Resultado Final

Una vez creadas nuestras bases de datos, ya se tiene la adaptación de la herramienta informática. El resultado que obtenemos es el siguiente:

The screenshot shows the 'Arquímedes' software interface. The left window, 'TIPOS MANT:Árbol de descomposición', displays the same data as Figure 9. The right window, 'GENERAL PLAN MANTENIMIENTO:Árbol de descomposición', shows a detailed breakdown of maintenance costs for a specific plan (34) and category (Penalizaciones). The data is as follows:

Código	Doc	Pli	Ud	Resumen	Cant.	Coste	Importe
GENERAL..				Presupuesto plan de mantenimiento ferroviar	1,000	46.717,67	46.717,67
MEC				Sistemas mecánicos	1,000	38.393,98	38.393,98
SUSP				Elementos de suspensiones	1,000	28.524,12	28.524,12
FRE				Elementos de frenos	1,000	9.869,86	9.869,86
F1				Freno de emergencia	1,000		
F2				Disco de freno	1,000		
F3				Presión sistema de freno	1,000		
F4				Mangueras de freno	1,000		
F5				Brazo de frenado	1,000		
F6				Convertidor hidráulico-neumático	1,000	9.869,86	9.869,86
MP6				Mantenimiento Preventivo	0,250	7.046,02	1.761,51
InspP6			ud	Inspecciones	60,000	2,00	120,00
SustP6			ud	Sustituciones	4,000	1.599,08	6.396,32
OMEC			ud	Horas Oficial Mecánico	1,500	20,00	30,00
PMEC			ud	Horas Peón Mecánico	1,500	15,00	22,50
F3M			ud	Convertidor Hidráulico-Neumático	1,000	1.500,00	1.500,00
MMat		%		Materiales Auxiliares	3,000	1.552,50	46,58
RepaP6			ud	Reparaciones	6,000	54,08	324,48
MC6			ud	Mantenimiento Correctivo	5,000	1.621,67	8.108,35
SustC6			ud	Sustituciones	0,400	1.599,08	639,63
RepaC6			ud	Reparaciones	0,600	54,08	32,45
PenaC6			ud	Penalizaciones	0,750	1.203,15	902,36
15min			ud	Retraso > 15min	0,750	970,87	728,15
2horas			ud	Retraso > 2h ó cancelación	0,250	1.900,00	475,00

Figura 10 – Imagen completa de Arquímedes.

5 Modelo de cálculo de la relación entre mantenimiento preventivo y mantenimiento correctivo en función de la fiabilidad

5.1. Fiabilidad. Definición. Distribuciones tasa de fallo.

El concepto de fiabilidad puede definirse como la probabilidad de que un sistema o producto funcione de una manera satisfactoria durante un período de tiempo en el que es utilizado en unas condiciones de funcionamiento especificadas.

La fiabilidad de un sistema se puede aumentar reduciendo su complejidad, aumentando la fiabilidad de los componentes, acoplando elementos redundantes, reparando el componente e implantando un mantenimiento preventivo.

Como ya se ha comentado, la fiabilidad está íntimamente ligada con los sucesos de índole aleatoria; de aquí su evaluación por parte de la Estadística. Estos sucesos se tipifican asumiendo una "Función de Fallo" (variable aleatoria continua que nos da la probabilidad de fallo para un tiempo" de un Elemento / Componente / Subsistema / Sistema), función que como toda variable aleatoria, viene caracterizada por una "Función de Densidad de Fallo", $f(t)$, y una "Función de Distribución de Fallo", $F(t)$.

La estadística define la "Fiabilidad" como una función $R(t)$, que representa la probabilidad de que el sistema / componentes etc. no falle en el intervalo $(0,t)$.

Esta función, mantiene la siguiente relación con la función de Distribución de Fallo $F(t)$:

$$R(t) = 1 - F(t)$$

Existen distintas Funciones de Fallo relacionados con los Estudios de Fiabilidad. La adopción de una cualquiera de estas funciones depende del grado de ajuste de los datos al proceso a considerar o la función considerada o del tipo de fenómeno a analizar. Las más usuales son:

- Distribución Exponencial
- Distribución Weibull
- Distribución Normal
- Distribución Log-Normal
- Distribución Binomial
- Distribución de Poisson

Si se desea conocer como son estas distribuciones más a fondo ir al Anexo C del presente PFC.

5.2. Selección de la distribución de fallo. Métodos de cálculo.

De todas ellas, la más ampliamente utilizada en cálculos de fiabilidad es la Exponencial, por su comodidad a la hora de efectuar cálculos y por su adecuada representación de todo tipo de sucesos, dentro del rango de tiempos de la vida del sistema en estudio, en el que los fallos del mismo se deben a sucesos aleatorios.

Se caracteriza porque supone que la tasa de fallos es constante. El resto de sus características principales son las siguientes:

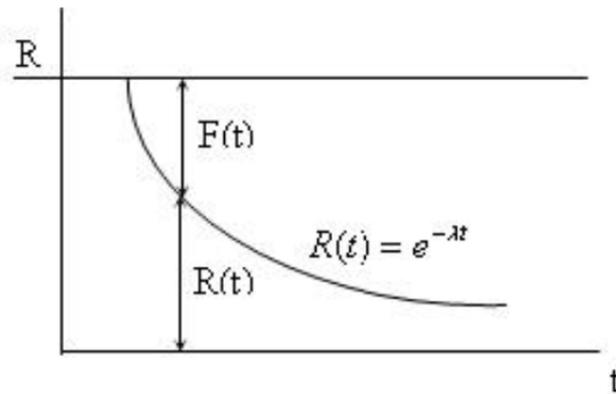


Figura 11 – Fiabilidad frente a tiempo

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

$$R(t) = \int f(t) dt = e^{-\lambda \cdot t}$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t}$$

$$\lambda = h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = cte$$

Siendo,

- R(t): fiabilidad
- F(t): función de distribución de fallo
- f(t): función de densidad de fallo
- h(t): tasa de fallo

Un parámetro ampliamente utilizado en los estudios de fiabilidad es el “Tiempo Medio entre fallos”, o MTBF definido como:

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

En el caso de la Distribución Exponencial se cumple lo siguiente:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda}$$

En el ámbito del ferrocarril, se suele usar también el parámetro “Kilómetros Medios entre fallos”, o MKBF, que en otra bibliografía toma también el nombre de MDBF, o “Distancia Media entre Fallos”. Esto se calcularía con el dato de la velocidad media (en km/h, suponiendo que la tasa de fallos viene dada en fallos por hora).

$$MKBF(km) = MDBF(km) = MTBF(h) \cdot Velocidad Media \left(\frac{Km}{h}\right)$$

Por tanto, y para el caso de la Distribución Exponencial en la que la tasa de fallos es constante, el MTBF se define como la inversa de la tasa de fallos constante, λ . Hay que recalcar que esta igualdad ampliamente utilizada en los estudios de fiabilidad y en particular en los referidos a material ferroviario, es únicamente cierta para el caso de que el sistema siga un comportamiento definido por la Distribución Exponencial de fallo.

El citado modelo matemático, basado en la Distribución Exponencial, es el que ha sido usado en este estudio. A continuación se justifica el uso de este modelo en los estudios de fiabilidad de material ferroviario.

La variación de la tasa instantánea de fallos $h(t)$ con respecto al tiempo se representa en la mayoría de los casos con la curva conocida como “la curva de la bañera”. Dicha curva tiene tres etapas diferentes muy definidas:

- Etapas de fallos infantiles: Corresponde a dispositivos defectuosos con una tasa de fallos superior a lo normal debido a fallos latentes del propio material, fallos de fabricación, etc.
- Etapas de fallos aleatorios: Son fallos que ocurren durante la vida normal del equipo. Los fallos son inesperados.
- Etapas de fallos de desgaste o envejecimiento: Ocurre cuando se supera la vida prevista del componente debido a factores tales como el desgaste, la fatiga, etc.

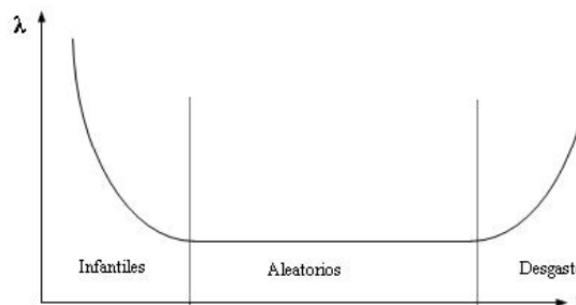


Figura 12 – Curva de la bañera

La Distribución Exponencial describe el comportamiento en la zona de fallos aleatorios en la que la tasa de fallos es constante. Las especiales características de esta distribución simplifican mucho los cálculos a realizar por lo que es ampliamente utilizada en estudios de diversos campos. Se ha discutido mucho sobre la validez de la función Exponencial de cara a su aplicación a todo tipo de sistemas. Hoy en día, rigurosos estudios han demostrado que su utilización en sistemas de índole eléctrica / electrónica está plenamente justificada y es idónea. Para los sistemas mecánicos (en los que los procesos de desgaste y fatiga son fundamentales), se considera más adecuada (desde el punto de vista de la matemática formal) la función de Weibull, si bien, se ha demostrado que para los sistemas multicomponentes, el uso de la función Exponencial es igualmente válido (además de más cómodo e intuitivo). Incluso a nivel de componentes individuales mecánicos, se observa que los resultados de fiabilidad alcanzados por la función de Weibull respecto a la Exponencial apenas difieren.

Por todas estas razones, se justifica el hecho de usar el modelo matemático basado en la distribución exponencial para el desarrollo de los siguientes puntos del PFC.

Para calcular la tasa de fallo (λ), se puede proceder de dos formas distintas, de una forma teórica y de una forma experimental, dependiendo de los datos de partida.

5.2.1. Cálculo de la fiabilidad de forma teórica. Ejemplo.

Este método de cálculo se recomienda utilizarlo siempre y cuando no se tenga acceso a bases de datos o históricos, o bien, cuando el equipo para el cual se va a desarrollar el estudio sea novedoso y no tenga similitud con ningún otro.

El procedimiento a seguir será el siguiente:

1º Descomposición del sistema en elementos más simples:

Cálculo de la tasa de fallo de cada uno de estos elementos. Para ello hay que seguir la formulación de diversos manuales. Los más extendidos son, por ejemplo, el “Naval Surface Warfare Center – Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment”, de 2011 o siguiendo el procedimiento descrito, por ejemplo, en el “Military Handbook MIL-STD-756 Reliability Modelling and Prediction”.

2º Un ejemplo de formulación, por ejemplo para un eje, sería la siguiente:

$$\lambda_{SH} = \lambda_{SH,B} \cdot C_f \cdot C_T \cdot C_{DY} \cdot C_{SC}$$

Siendo cada uno de estos términos:

- $\lambda_{SH,B}$ = Tasa de fallos base, en Fallos/Millón de ciclos
- C_f = Factor debido al acabado superficial
- C_T = Factor debido a la temperatura
- C_{DY} = Factor debido a los desplazamientos del eje
- C_{SC} = Factor de concentración de tensión debido a discontinuidades en el eje

Como se puede apreciar, se establece una tasa de fallo base, que es multiplicada por una serie de coeficientes para aproximarla mejor a nuestra necesidad

3º Combinación de la tasa de fallo de todos los elementos para el cálculo de la tasa de fallo de nuestro sistema. Si nuestro sistema está contemplado en la bibliografía citada anteriormente, nos explicará la forma de proceder, en caso contrario, habrá que aplicar un diagrama de bloques de fiabilidad o bien, resultando el caso más desfavorable y más utilizado, realizar la siguiente expresión:

$$\lambda_{sistema} = \sum \lambda_{elemento,i}$$

Se ha realizado el ejemplo de un compresor, en el cual siguiendo los pasos indicados en el "NSWC-2011", se calcularía siguiente la siguiente expresión:

$$\lambda_C = (\lambda_{FD} \cdot C_{SF}) + \lambda_{CA} + \lambda_{BE} + \lambda_{VA} + \lambda_{SE} + \lambda_{SH}$$

Siendo cada uno de los componentes de la ecuación:

- λ_C = Tasa de fallo total del compresor, en Fallos/Millón de horas
- λ_{FD} = Tasa de fallo de los conductores, en Fallos/Millón de horas
- C_{SF} = Factor de Multiplicación por servicio
- λ_{CA} = Tasa de fallo de la cubierta del compresor, en Fallos/Millón de horas
- λ_{BE} = Tasa de fallo de los rodamientos, en Fallos/Millón de horas
- λ_{VA} = Tasa de fallo de las válvulas de control, en Fallos/Millón de horas
- λ_{SE} = Tasa de fallos de las juntas, en Fallos/Millón de horas
- λ_{SH} = Tasa de fallos del eje, en Fallos/Millón de horas

El procedimiento es calcular cada una de estas tasas de fallo por separado para luego sumarlas.

Finalmente, se obtiene para el compresor una tasa de fallo de:

$$\lambda_C = 7,99E-5 \text{ Fallos/ hora}$$

Para ver el proceso de cálculo seguido completo, ir al Anexo B.

5.2.2. Cálculo de la fiabilidad de forma experimental. Ejemplo.

Es la forma más extendida. Se trata de buscar mediante una base de datos de históricos, propia o externa, la tasa de fallo del sistema, o de los elementos que componen nuestro sistema.

También existe cierta bibliografía referente a este tema, como Military Handbook MIL-HDBK-217 - Reliability Prediction of Electronic Equipment" o a través del NPRD-95 "Non-electronic

MODELO DE ANÁLISIS DE PLANES DE MANTENIMIENTO DE MATERIAL RODANTE FERROVIARIO

Parts Reliability Data" en los cuales, se puede ver una tasa de fallo aproximada de cada uno de los elementos que componen nuestro sistema. Por ejemplo:

NPRD-95				Part Details 3-5	
Part Desc.	Qual Lev	App Env	Data Source	Part Characteristics	Fail/Hrs or Miles(M) (E6)
Air Conditioner,Comfort					
Unk	GM		18459-000	-No Details,Pop:25	0/0.0595
Air Conditioner,Process					
Unk	GF		18459-000	-No Details,Pop:5	0/0.1250
Air Dryer					
Com	GF		23047-010	-Style:Packaged Unit,Pop:6	0/0.9795
Com	GF		23047-027	-Style:Packaged Unit,Pop:1	0/0.1018
Com	GF		23047-040	-Style:Packaged Unit,Pop:1	3/0.0293
				-Style:Packaged Unit,Pop:1	3/0.0293
Com	GF		23047-050	-Style:Packaged Unit,Pop:1	0/0.5951
Com	GF		23047-059	-Mfr:Ingersoll-Rand,Style:Packaged Unit,Pop:3	0/0.1498
Com	GF		23047-064	-Style:Packaged Unit,Pop:2	0/0.3671
Air Handling Unit,Humidity,Non,Without Drive					
Com	GF		23047-060	-Style:Packaged Unit,Pop:6	0/1.0486
Air Handling Unit,Humidity,Pan,Without Drive					
Com	GF		23047-040	-P#:L-31,Mfr:Trane,Style:Packaged Unit,Pop:1	0/0.0836
Com	GF		23047-062	-Style:Packaged Unit,Pop:4	18/0.3088
				-Style:Packaged Unit,Pop:2	18/0.1193
Com	GF		23047-063	-Style:Packaged Unit,Pop:30	0/3.3674
Com	GF		23047-071	-Style:Packaged Unit,Pop:2	0/0.1708
				-Style:Packaged Unit,Pop:3	0/0.1773
Air Handling Unit,Humidity,Spray,Without Drive					
Com	GF		23047-010	-Style:Packaged Unit,Pop:6	0/0.9795
Com	GF		23047-050	-Style:Packaged Unit,Pop:1	1/0.0537
Com	GF		23047-059	-P#:31-B,41-G,86-E,Mfr:Trane,Style:Packaged Unit,Pop:3	5/0.1495
Com	GF		23047-062	-Style:Packaged Unit,Pop:8	0/0.6177
Com	GF		23047-063	-Style:Packaged Unit,Pop:32	0/5.2754

Figura 13 – Imagen obtenida del NPRD - 95

Finalmente se ha resuelto un ejemplo, del mismo compresor citado anteriormente, partiendo de una base de datos de tipo experimental:

Se parte de los datos mostrados en la tabla inferior:

Nº Fallos	Tiempo (Mh)
77	0,01
125	0,02
202	0,03
325	0,04
525	0,05
848	0,06
1369	0,07
2211	0,08
3569	0,09

Tabla 2 – Datos de fallos de un compresor en función del tiempo.

Gracias a esos datos, se puede dibujar la gráfica expuesta, y suponiendo una distribución de la densidad de probabilidad de fallo exponencial, realizar la recta de ajuste.

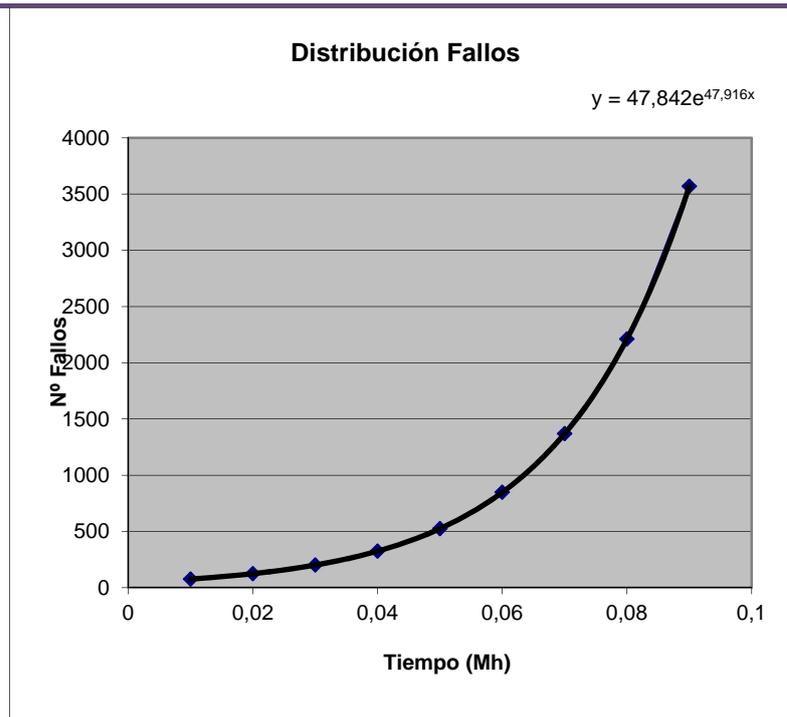


Figura 14 – Nº de fallos de un Compresor en función del tiempo

A partir de la ecuación de la recta de ajuste Obtenemos una $\lambda = 4,78E-5$ Fallos/Hora y por consiguiente, un MTBF = 20902,14 horas.

Como se puede apreciar, este segundo método es más rápido y menos laborioso que el anterior, pero exige tener unos datos fiables y el acceso a una base de datos, lo cual no es siempre posible.

Si se desea conocer más sobre este método, ir al Anexo B del presente PFC

5.3. Modelo de cálculo del número de operaciones de mantenimiento preventivo anuales.

Una vez creado el modelo de cálculo de costes de mantenimiento, nos falta establecer la relación entre el número de operaciones de mantenimiento preventivo y de mantenimiento correctivo, contando a su vez, que para cada uno de los equipos esta relación será diferente. Para ello, el modelo a crear se centrará en un parámetro fundamental, la fiabilidad.

Se necesitan unos datos de partida, los cuáles son fácilmente obtenibles, ya que formarán parte del pliego de condiciones.

Los datos son los siguientes:

- Nº de kilómetros anuales
- Velocidad media establecida. Este puede ser dato o podemos calcularlo. Para calcularlo, son necesarios los siguientes datos:

- Nº de horas de funcionamiento diarias.
- Nº de días de funcionamiento a lo largo del año.
- Km anuales recorridos.

La velocidad media se calcularía mediante la siguiente expresión:

$$V_{media} \left(\frac{Km}{h} \right) = \frac{N^{\circ} \text{ de km anuales}}{N^{\circ} \text{ horas diarias} \cdot N^{\circ} \text{ días anuales}}$$

Decir que se entiende por operación de mantenimiento preventivo, así como cual es su significado.

Poner la formulación siguiente:

$$N^{\circ}P = \frac{Km \text{ anuales a recorrer}}{Km \text{ recorridos a } R \text{ dada}}$$

De aquí podemos ver como varía el número de preventivos conforme vamos variando la fiabilidad.

El cálculo de los kilómetros que se pueden recorrer a una fiabilidad dada se realiza de la siguiente manera:

- a) Necesidad del dato de la tasa de fallo, bien sea calculada u obtenida de una base de datos o histórico.
- b) Despejamos la variable t, de la ecuación de la fiabilidad

$$t = \frac{\ln(R)}{-\lambda}$$

Hay que tener especial cuidado con las unidades, ya que t dependerá de las unidades. Si λ está en km^{-1} , t saldrá ya en Km.

- c) Suponiendo λ en $horas^{-1}$, obtendremos t en horas, el cual tendremos que multiplicar por la velocidad media para obtener los km.

$$Km \text{ recorridos a } R \text{ dada} = t(\text{horas}) \cdot V_{media} \left(\frac{Km}{h} \right)$$

Relacionado con el compresor del cual se ha calculado la tasa de fallos anteriormente, ahora se puede establecer el número de preventivos anuales en función de la fiabilidad requerida. Se muestra en la siguiente gráfica:

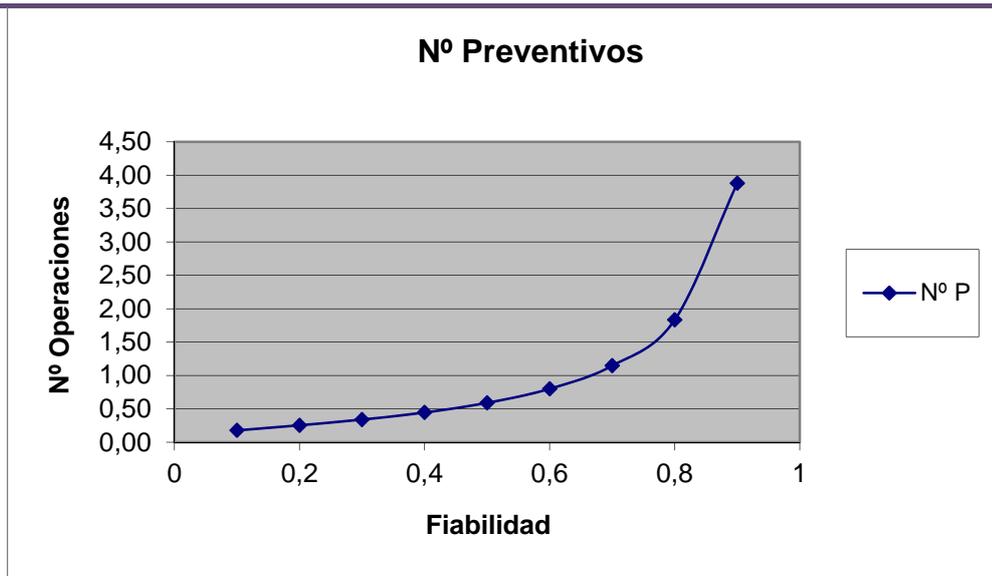


Figura 15 – Nº de operaciones de mantenimiento preventivo anuales en un Compresor

5.4. Modelo de cálculo del número de operaciones de mantenimiento correctivo anuales.

El cálculo del número de operaciones de mantenimiento correctivo anuales se realiza de forma similar al apartado anterior, siendo en este caso el parámetro que varía la No Fiabilidad o función de distribución de fallo. Es decir, estamos calculando cada qué cantidad de km vamos a tener que realizar una operación de correctivo, ya que el sistema fallará.

Se resolvería siguiendo las siguientes expresiones:

$$N^{\circ}C = \frac{Km \text{ anuales a recorrer}}{Km \text{ recorridos a UR dada}}$$

$$UR = 1 - R$$

$$t(km) = \frac{\ln(UR)}{-\lambda} \text{ si } \lambda \text{ está en } Km^{-1}$$

$$t(km) = \frac{\ln(UR)}{-\lambda} \cdot V_{media} \text{ si } \lambda \text{ está en } h^{-1} \text{ y } V_{media} \text{ en } \frac{Km}{h}$$

A continuación se muestra, para el mismo compresor del apartado anterior, como varía el número de operaciones de mantenimiento correctivo en función de la variación de la No Fiabilidad.

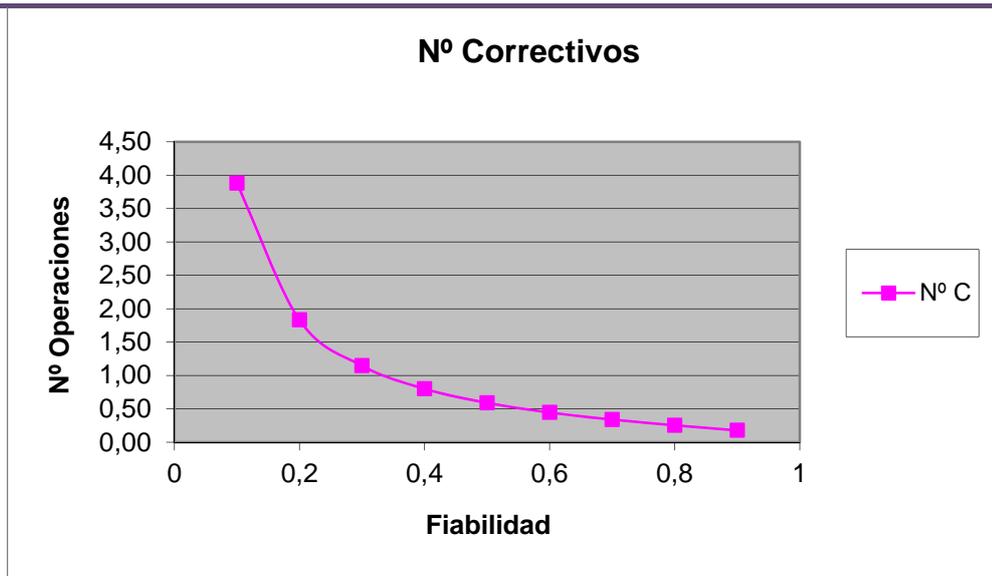


Figura 16 – Nº de operaciones de mantenimiento correctivo anuales en un Compresor

Como es lógico, a menor fiabilidad exigida, resultará que serán necesarias más operaciones de mantenimiento correctivo, y a mayor fiabilidad resultará al contrario, habrá menos operaciones de mantenimiento correctivo y más operaciones de mantenimiento preventivo.

5.5. Resolución de un equipo completo

Una vez definido el modelo de cálculo de las operaciones de mantenimiento preventivo y correctivo en función de la fiabilidad, se va a exponer el ejemplo completo del sistema de climatización de un vehículo ferroviario.

En primer lugar, se calculará la tasa de fallos del sistema completo, en este caso, el valor es:

$$\lambda_{SC} = 0,00010294 \text{ Fallos/ hora}$$

El siguiente paso es establecer el número de operaciones de mantenimiento preventivo y de mantenimiento correctivo anual. Para ello, se sigue el modelo expuesto en los puntos 4.3 y 4.4 del PFC.

Representándolo gráficamente se obtiene lo siguiente:

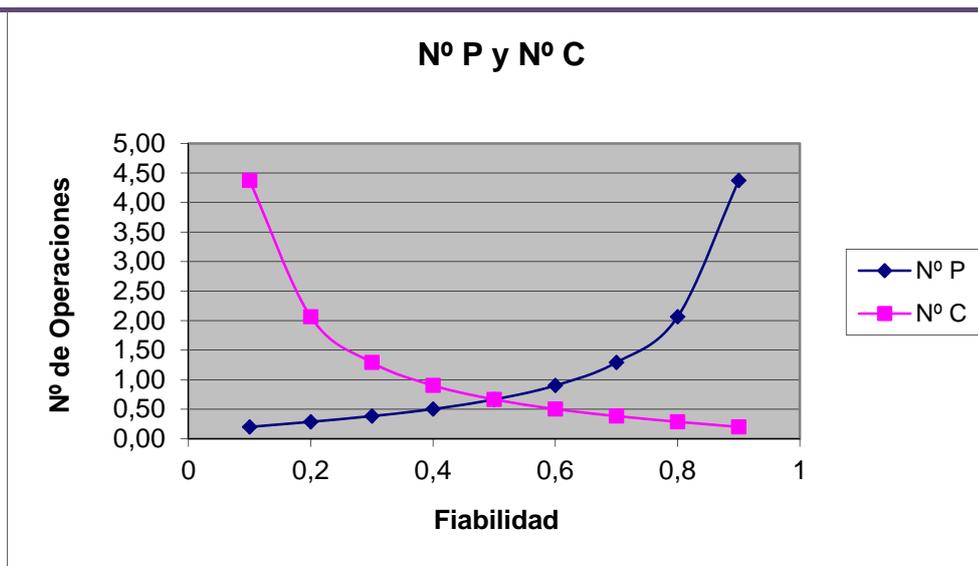


Figura 17 – Nº P y Nº C anual de un sistema de climatización

Una vez calculados el número de preventivos y correctivos anuales, se está en plena disposición de calcular los costes de mantenimiento de este equipo en función de la fiabilidad, para ello se hace uso de la herramienta informática adaptada para tal fin.

Representando los resultados en una tabla y en una gráfica se obtiene:

R	NºP	NºC	Coste P	Coste C	Coste T
0,1	0,20	4,37	116,21	10656,86	10773,07
0,2	0,29	2,06	166,26	5031,79	5198,06
0,3	0,38	1,29	222,26	3148,00	3370,26
0,4	0,50	0,90	292,04	2198,03	2490,07
0,5	0,66	0,66	386,05	1619,88	2005,93
0,6	0,90	0,50	523,84	1225,39	1749,23
0,7	1,29	0,38	750,24	932,59	1682,83
0,8	2,06	0,29	1199,19	697,64	1896,84
0,9	4,37	0,20	2539,78	487,63	3027,41

Tabla 3 – Costes del Mantenimiento en función de R de un sistema de climatización

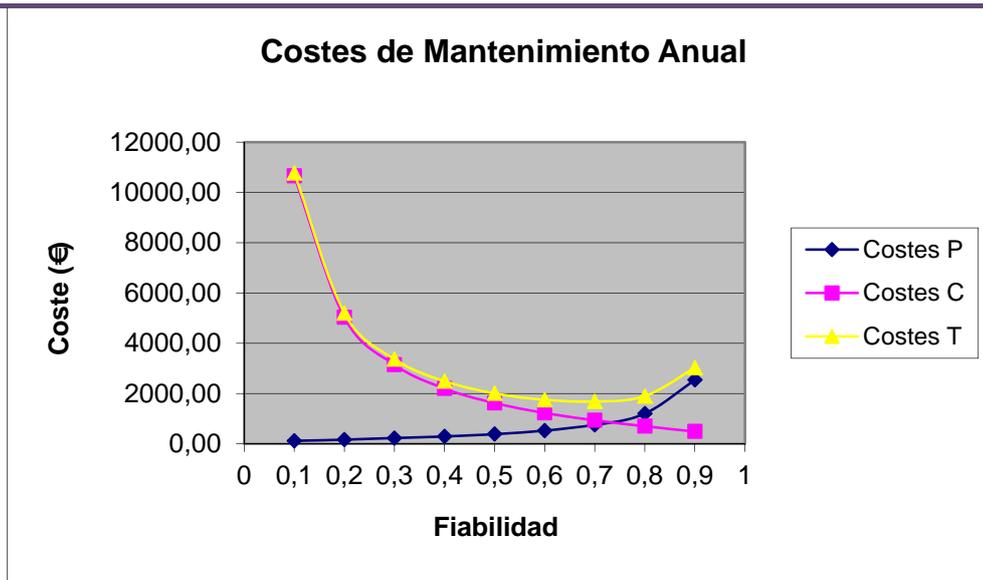


Figura 18 – Costes del Mantenimiento en función de R de un sistema de climatización

A la vista de la figura anterior, se puede constatar la existencia de un coste de mantenimiento mínimo, estableciendo el correcto mix entre el número de operaciones de mantenimiento preventivo y operaciones de mantenimiento correctivo anuales.

6 Validación del modelo. Análisis de sensibilidad.

Tras obtener el análisis de costes representado en la figura 18 del presente documento, y para poder establecer una validación del modelo, se opta por la introducción de un índice de confianza, el cual tomará valores desde 0.1 (caso más desfavorable) hasta 1 (sería como el cálculo inicial). Además, el siguiente análisis servirá para mostrar cual es la sensibilidad del modelo propuesto.

Las ecuaciones a resolver, con los diferentes valores del índice de confianza, son las siguientes:

$$N^{\circ}P = \frac{Km \text{ anuales a recorrer}}{Km \text{ recorridos a R dada} * I}$$

$$N^{\circ}C = \frac{Km \text{ anuales a recorrer}}{Km \text{ recorridos a UR dada} * I}$$

Lo que se está representando es cómo variarán los costes en función de si el número de operaciones de mantenimiento preventivo y el número de operaciones de mantenimiento correctivo variase. Resolviendo esas ecuaciones, se obtiene la siguiente tabla:

		Índice									
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Fiabilidad	0,1	107730,70	53865,35	35910,23	26932,67	21546,14	17955,12	15390,10	13466,34	11970,08	10773,07
	0,2	51980,56	25990,28	17326,85	12995,14	10396,11	8663,43	7425,79	6497,57	5775,62	5198,06
	0,3	33702,55	16851,28	11234,18	8425,64	6740,51	5617,09	4814,65	4212,82	3744,73	3370,26
	0,4	24900,72	12450,36	8300,24	6225,18	4980,14	4150,12	3557,25	3112,59	2766,75	2490,07
	0,5	20059,29	10029,65	6686,43	5014,82	4011,86	3343,22	2865,61	2507,41	2228,81	2005,93
	0,6	17492,31	8746,15	5830,77	4373,08	3498,46	2915,38	2498,90	2186,54	1943,59	1749,23
	0,7	16828,30	8414,15	5609,43	4207,08	3365,66	2804,72	2404,04	2103,54	1869,81	1682,83
	0,8	18968,36	9484,18	6322,79	4742,09	3793,67	3161,39	2709,77	2371,04	2107,60	1896,84
	0,9	30274,09	15137,04	10091,36	7568,52	6054,82	5045,68	4324,87	3784,26	3363,79	3027,41

Tabla 4 – Costes en función del Índice y de la Fiabilidad

Para interpretar mejor los resultados obtenidos en la tabla, se opta por la representación en una gráfica 3D:

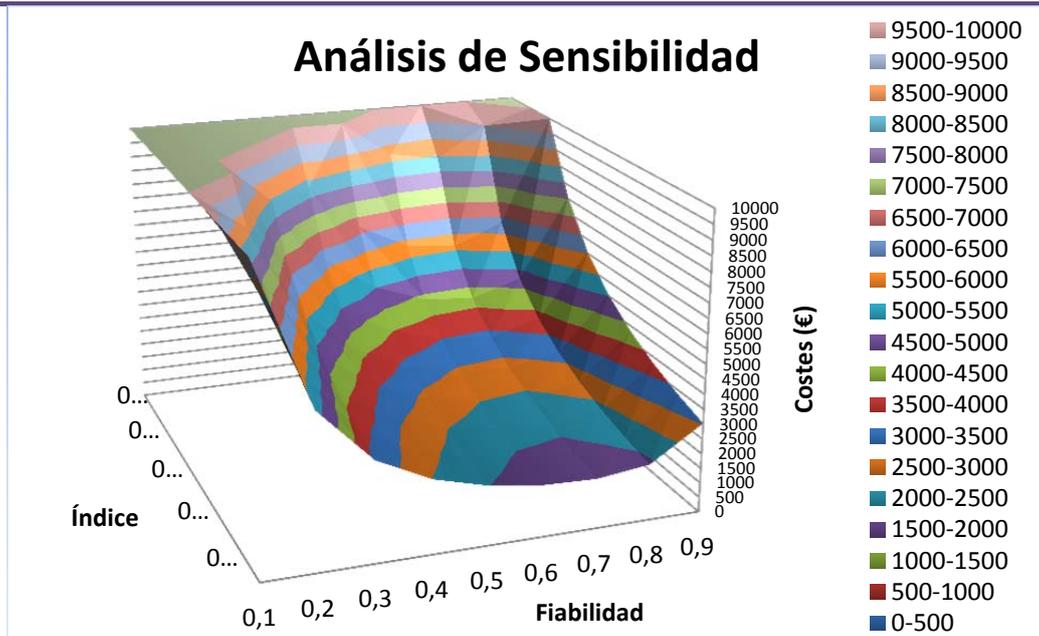


Figura 11 – Análisis de Sensibilidad. Imagen 1

Como primera conclusión, se puede decir que se muestra una especie de “valle”, en donde el valor del coste, pese a movernos en un margen de +10% ó -10% en cuanto a la fiabilidad óptima, y un rango de 1 a 0,8 en cuanto al índice de confianza, no cambia apenas en comparación con el coste total.

Cabe mencionar que la imagen ha sido cortada en el valor de 10000€, por no considerarse necesario el análisis de la parte superior.

Si se realiza una imagen desde el lado del Índice se observa lo siguiente:

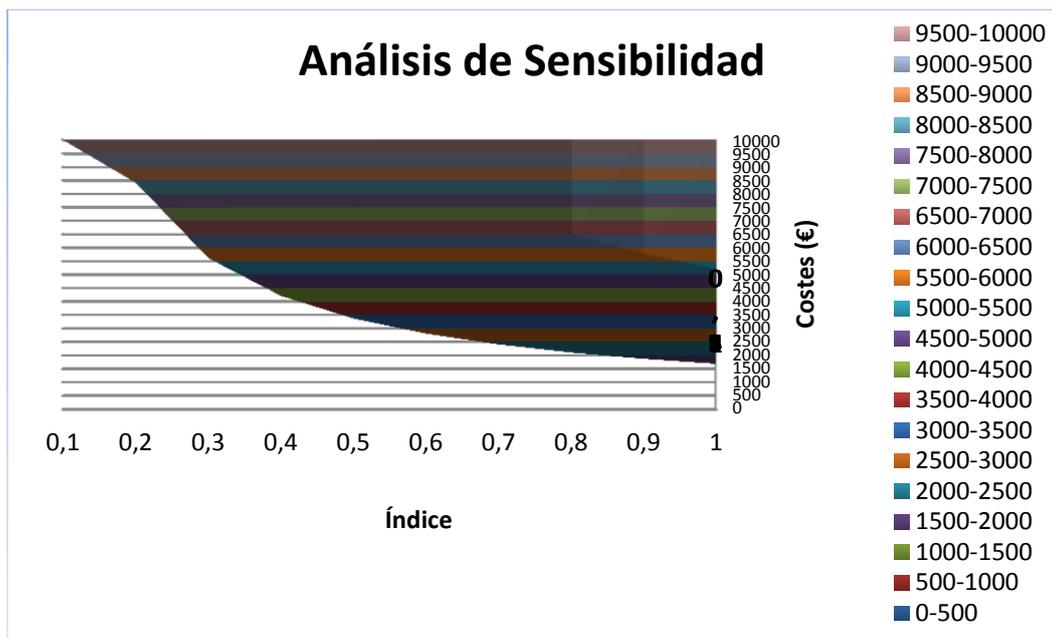


Figura 12 – Análisis de Sensibilidad. Imagen 2

La conclusión que se obtiene es que para valores del índice bajos, los costes se disparan, siendo muy elevados, y a medida que se incrementa el índice estos se van estabilizando.

Finalmente y para concluir el análisis de sensibilidad, se toma una imagen desde la perspectiva de la fiabilidad:

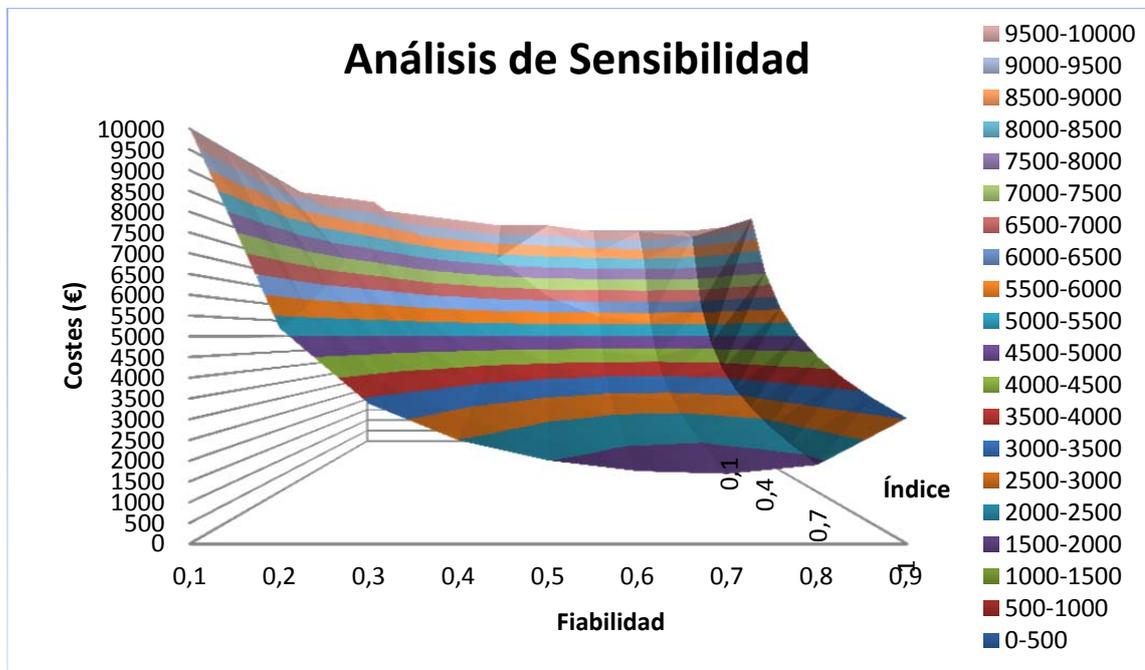


Figura 13 – Análisis de Sensibilidad. Imagen 3

Aquí se ve la unión mediante la superficie de las diferentes curvas que se generan con cada índice. Como es de esperar, el coste mínimo se alcanza con $I=1$. Sin embargo, para la fiabilidad, se puede observar como pese a alguna variación, los costes apenas se ven influenciados.

Se puede concluir finalmente, que para variaciones del orden del 10% a partir del punto de fiabilidad óptimo, y moviéndonos entre valores del índice de 0,8 a 1, los sufren unas variaciones asumibles (supondrían un 20% más en el peor de los casos, prácticamente nada si lo comparas con un mala elección del número de operaciones de mantenimiento anual).

7 Conclusiones y futuras líneas de investigación.

Para finalizar la memoria, se va a proceder a citar las conclusiones de lo que ha sido el trabajo desarrollado, así como de las futuras líneas de investigación a las que da paso el proyecto desarrollado.

Como se primera conclusión se obtiene que se ha adaptado una herramienta informática, creando una base de datos de costes, con el precio de la mano de obra como de los diferentes elementos que componen el material rodante, así como otra base de datos tipo escandallo para diferenciar de una manera clara y ordenada los diferentes sistemas del ferrocarril. Esto ha otorgado al propósito del PFC una buena potencia de cálculo, así como la posibilidad de una actualización constante de los planes de mantenimiento estudiados o los cuales se vayan a analizar, tanto si varía el precio de las horas de un oficial mecánico, como si se decide cambiar de un proveedor a otro, en plan de mantenimiento quedará actualizado instantáneamente.

A continuación, se ha expuesto como se puede calcular la fiabilidad de un elemento complejo, tanto si se poseen datos técnicos, siguiendo, por ejemplo, el manual NSCW-2011, o si se poseen datos experimentales. Esto es posible gracias al cálculo de la función de distribución de la probabilidad de fallo.

Por otro lado, se ha establecido un modelo para relacionar el número de operaciones de mantenimiento preventivo como de mantenimiento correctivo a través de la fiabilidad, calculada anteriormente. Este modelo se basa en la fiabilidad que podemos garantizar de que un componente/equipo/sistema recorra un número de kilómetros determinado sin fallo.

Siguiendo con lo expuesto en el apartado anterior, y gracias a la herramienta informática adaptada para tal fin, se puede pasar de número de operaciones de mantenimiento anual, a costes de mantenimiento anual. Con esto se consigue observar cuál es el impacto de la fiabilidad a la hora del cálculo de costes. Uno de los propósitos es, si se desea obtener una fiabilidad mayor, generalmente establecida por exigencias del cliente, y éste no acepta el coste que generaría realizar ese número de operaciones de mantenimiento preventivo, se puede dar un paso hacia el diseño, ya que, tal y como se ha demostrado en el desarrollo de este PFC, se puede calcular la tasa de fallo por componente, y así, se puede observar qué componentes son los más propensos al fallo y de esta manera, poder mejorarlos.

Otro de los propósitos de este PFC es llegar al punto de coste mínimo en función de la fiabilidad, es decir, se llega a estimar la fiabilidad para la cual el coste de mantenimiento anual es mínimo, o expuesto de otra manera, establecer qué cantidad de operaciones de mantenimiento preventivo y de mantenimiento correctivo anual es la más rentable. Esto nos lleva a la conclusión de que se obtendría el LCC mínimo, en cuanto a términos de mantenimiento se refiere.

Para seguir con esta investigación se propone implementar el término de fiabilidad “dentro” de la herramienta adaptada. Sería de gran utilidad poder elegir la fiabilidad deseada y que te

diera los costes de mantenimiento que supondrían automáticamente o, por el contrario, poder introducir la tasa de fallo de un componente/equipo/sistema y que salieran los mínimos costes, junto con el número de operaciones de mantenimiento, tanto preventivo como correctivo.

Por otro lado, sería conveniente analizar mediante el modelo propuesto y con la herramienta adaptada, un plan de mantenimiento completo de un sistema ferroviario. En este apartado el mayor problema consiste en obtener unos datos fiables, e incluso, poder llegar a obtenerlos, ya que la confidencialidad es muy seria en estos aspectos.

En cuanto a la continuación, desde un punto de vista de la investigación, se proponen dos campos. El primero sería establecer, para un mismo equipo o sistema, la fiabilidad mediante diferentes distribuciones de densidad de probabilidad de fallo e implementarlo en la herramienta informática, como si fuera una elección del usuario a la hora de realizar el plan de mantenimiento. El segundo campo sería introducir una variación en los parámetros de cálculo, como puede ser tomar una tasa de fallo variable en el tiempo, establecer diferenciación entre intervalos de operaciones de mantenimiento preventivo o establecer una variante del número de operaciones de mantenimiento en función de otras características propias de cada equipo (criticidad, importancia...).

Para finalizar, el camino ideal y bastante más complicado de evaluar pero más interesante, sería introducir el término de confiabilidad. Este término contempla fiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad, lo cual daría un plan de mantenimiento completísimo, a la vez que aumentarían las variables para poder determinarlo.