

## ANEXOS

---

# ANEXO A: EL MANTENIMIENTO FERROVIARIO

---

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

A lo largo de la historia la experiencia indica que las máquinas disminuyen su rendimiento con el paso del tiempo, afectando esto a su vida útil. Pero por otra parte se sabe también que eliminando las degradaciones que producen esas ineficiencias, se logra que los equipos de producción alcancen unos niveles de calidad aceptables.

Así pues, aparece el mantenimiento como un conjunto de acciones con el fin de alargar la vida útil de cualquier equipo e instalación reduciendo costes, evitando paradas innecesarias, contribuyendo en la calidad de la producción, sirviendo de apoyo al proceso productivo y a la empresa.

Con el paso del tiempo los equipos se vuelven más sofisticados por lo que el mantenimiento crece en importancia debido al interés de las empresas en mantener la eficacia de los mismos.

OBJETIVOS DEL MANTENIMIENTO			
	Costes ↓	Tiempo de Servicio ↑	Calidad y Prontitud de Servicio ↑
	Costes Bajos	Horas de Funcionamiento Elevado	Seguridad de Funcionamiento Elevada
Mano de Obra (Fabricación+ Mantenimiento) ↓	↓	↓	↓
Repuestos ↓	↓	↓	↓
Disfuncionamientos y averías ↓	↓	↑	↑

**Ideal →**

**Tabla A.1 – Objetivos del mantenimiento**

Dentro del apartado de los ferrocarriles se denomina material rodante a todos los elementos que se encuentran en movimiento o con la capacidad de moverse solidarios al ferrocarril.

Es el material sobre el que vamos a fijar nuestra atención y las fronteras físicas del mismo van desde el contacto del pantógrafo con los cables de tensión hasta el contacto de las ruedas con los carriles.

Para hacernos una idea de la importancia del mantenimiento ferroviario sólo tenemos que prestar atención a los costes derivados de cualquier administración ferroviaria, que en muchas ocasiones supera el 50% en el apartado de mantenimiento. En el caso del mantenimiento ferroviario, es importante explicar que ha tenido un retraso considerable con respecto a otros campos tecnológicos como por ejemplo la aviación o la informática, que presentan unos índices de fiabilidad muy superiores.

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

Como breve introducción a los sistemas que requieren mantenimiento en un sistema ferroviario podemos observar la siguiente tabla en la que aparecen los elementos principales y el tipo de mantenimiento que necesitan.

	CORRECTIVO	PREVENTIVO	MODIFICATIVO	LEGAL	PREDICTIVO	LIMPIEZA
BOGIES	X	X				X
RODADURA	X	X				X
REDUCTOR	X	X			X	X
FRENO	X	X				X
SUSPENSIÓN					X	
MOTORES	X	X	X		X	X
APARELLAJE ELÉCTRICO	X	X	X			X
COMPRESOR	X	X	X		X	X
PUERTAS	X	X	X		X	X
GANCHOS	X	X				X
PANTÓGRAFOS	X	X	X		X	X
ELECTRÓNICA CONTROL	X		X			X
ELECTRÓNICA POTENCIA	X		X			X
NEUMÁTICA	X	X	X	X	X	X
VENTILACIÓN A/A	X	X	X		X	X
DECORACIÓN	X	X	X			X

**Tabla A.2 – Clases de Mantenimientos y equipos**

Sirviendo este punto de partida como introducción, en este primer anexo se expondrán los diferentes tipos de mantenimiento, así como los principales equipos de un sistema ferroviario y las instalaciones necesarias para su mantenimiento, para poder comprender mejor el escandallo realizado.

Además, quedará plasmada la importancia de la gestión del mantenimiento asistido por ordenador, para un mejor control y optimización del mismo.

- Tipos de mantenimiento

La definición de mantenimiento, según la norma IEC 60050-191, es “la combinación de todas las acciones técnicas y administrativas, incluidas las acciones de supervisión, destinadas a mantener un producto en un estado en el que pueda realizar una función requerida, o a devolverlo a dicho estado.”

Se puede hablar de cuatro tipologías diferentes de mantenimiento, las cuales posteriormente dejaremos en dos, debido a que se pueden considerar dentro del tipo citado.

### - Mantenimiento Correctivo

Este mantenimiento también es denominado “mantenimiento reactivo”, tiene lugar después de que haya ocurrido un fallo o avería, es decir, solo actuará cuando se presenta un error en el sistema. En este caso si no se produce ningún fallo, el mantenimiento será nulo, por lo que se tendrá que esperar hasta que se presente el desperfecto para poder corregirlo. Entre las consecuencias que trae este tipo de mantenimiento, podemos citar las siguientes:

- Paradas no previstas en el proceso productivo, disminuyendo las horas operativas y la disponibilidad.
- Afecta las cadenas productivas, es decir, que los ciclos productivos posteriores se verán parados a la espera de la corrección de la etapa anterior.
- Presenta costes por reparación y repuestos, en principio, no presupuestados, por lo que se puede dar el caso que por falta de recursos económicos no se puedan adquirir los recursos necesarios en el momento adecuado.
- La predicción del tiempo que el sistema estará fuera de operación o no disponible es complicada, acarreado nuevos costes en forma de penalizaciones.

### - Mantenimiento Preventivo

Este mantenimiento también es denominado “mantenimiento planificado”, tiene lugar antes de la posibilidad de que ocurra un fallo o avería, se efectúa bajo condiciones controladas sin la existencia de algún error en el sistema. Se realiza a razón de la experiencia y pericia del personal a cargo, los cuales son los encargados de determinar el momento necesario para llevar a cabo dicho procedimiento; también se puede estimar el momento de intervención gracias a estudios de fiabilidad y análisis de fallos. Presenta las siguientes características:

- Se realiza en un momento en que no se está produciendo/utilizando el sistema o equipo, por lo que no repercute en la disponibilidad del sistema.
- Se lleva a cabo siguiendo un programa previamente elaborado donde se detalla el procedimiento a seguir, y las actividades a realizar, a fin de tener las herramientas y repuestos necesarios disponibles, es decir, se sigue un plan de mantenimiento.
- Cuenta con una fecha programada, además de un tiempo de inicio y de terminación preestablecido y aprobado por la directiva de la empresa.
- Está destinado a un área en particular y a ciertos equipos específicamente.
- Permite elaborar un historial de todos los equipos, para poder ir actualizando datos y tiempos, así como la información técnica pertinente.
- Permite contar con un presupuesto aprobado por la directiva.

### - Mantenimiento Predictivo

Consiste en determinar en todo instante la condición técnica (mecánica y eléctrica) real del equipo monitorizado, mientras esta se encuentre en pleno funcionamiento. Para ello se hace uso de un programa sistemático de mediciones

de los parámetros más importantes del equipo. El sustento tecnológico de este mantenimiento consiste en la aplicaciones de algoritmos matemáticos agregados a las operaciones de diagnóstico, que juntos pueden brindar información referente a las condiciones del equipo. Tiene como objetivo disminuir las paradas por mantenimiento preventivo, y de esta manera minimizar el coste del mantenimiento, así como mejorar la disponibilidad del equipo. La implementación de este tipo de métodos requiere de inversión en equipos, en instrumentos, y en contratación de personal cualificado. En la siguiente tabla se muestran diferentes técnicas de análisis para diferentes equipos.

TECHNOLOGIES	APPLICATIONS										
	PUMPS	ELECTRIC MOTORS	DIESEL GENERATORS	CONDENSERS	HEAVY EQUIPMENT/CRANES	CIRCUIT BREAKERS	VALVES	HEAT EXCHANGERS	ELECTRICAL SYSTEMS	TRANSFORMERS	TANKS, PIPING
VIBRATION MONITORING/ ANALYSIS	●	●	●		●						
LUBRICANT, FUEL ANALYSIS	●	●	●		●					●	
WEAR PARTICLE ANALYSIS	●	●	●		●						
BEARING, TEMPERATURE ANALYSIS	●	●	●		●						
PERFORMANCE MONITORING	●	●	●	●				●		●	
ULTRASONIC NOISE DETECTION	●	●	●	●			●	●	●	●	
ULTRASONIC FLOW	●			●			●	●			
INFRARED THERMOGRAPHY	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
NON-DESTRUCTIVE TESTING (THICKNESS)				●				●			●
VISUAL INSPECTION	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
INSULATION RESISTANCE		●	●			●			●	●	
MOTOR CURRENT SIGNATURE ANALYSIS		●									
MOTOR CIRCUIT ANALYSIS		●				●			●		
POLARIZATION INDEX		●	●						●		
ELECTRICAL MONITORING									●	●	

Tabla A.3 – Tipos de Ensayos Predictivos Vs Equipos

- Mantenimiento Proactivo

Se trata del concepto más novedoso en cuanto a mantenimiento se refiere. Este tipo de mantenimiento consiste en una mejora continua del equipo o del mantenimiento del equipo, gracias a la obtención y monitorización de datos de una forma continuada. Sus características básicas son las siguientes:

- o Utilizar un “feedback” o realimentación para mejorar o cambiar el diseño del equipo.
- o Emplear una visión global de todo el ciclo de vida del producto sistema desde el punto de vista del mantenimiento.

- Buscar la causa del fallo, no solo corregir sus efectos.
- Proceso de mejora continua, tanto de procesos como de tiempos de intervención o intervalos entre inspecciones.
- Optimizar y buscar nuevas técnicas y tecnologías para el mantenimiento de cada sistema.
- Utilización de un plan de mantenimiento.
- Utilizar técnicas de predicción y búsqueda de fallos.
- Documentar correctamente.

En la siguiente imagen vemos una gráfica con los diferentes tipos de mantenimiento citados, así como algunas de las técnicas utilizadas, según el documento “Reliability Centered Maintenance guide for facilities and collateral equipment” de la N.A.S.A.

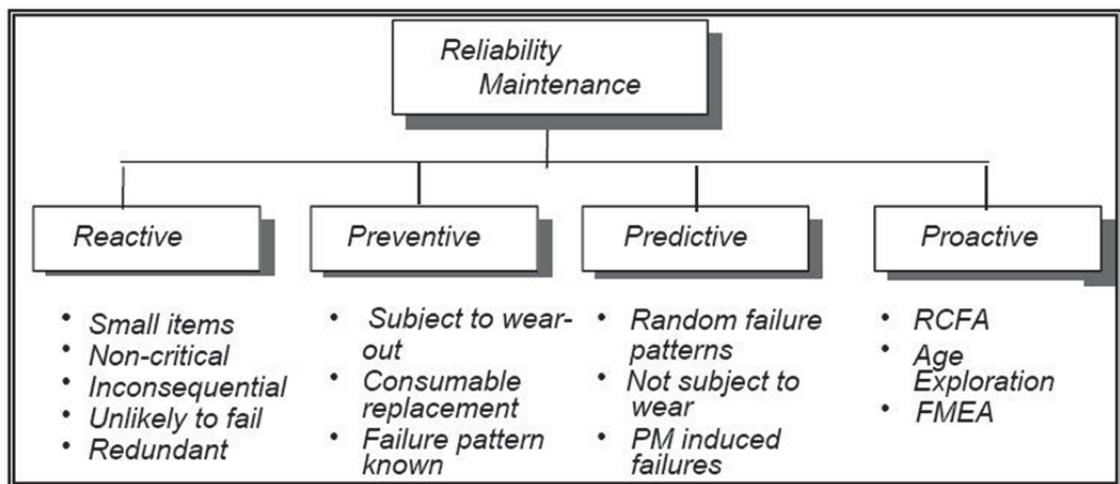


Figura A.1 – Tipos de Mantenimiento según N.A.S.A.

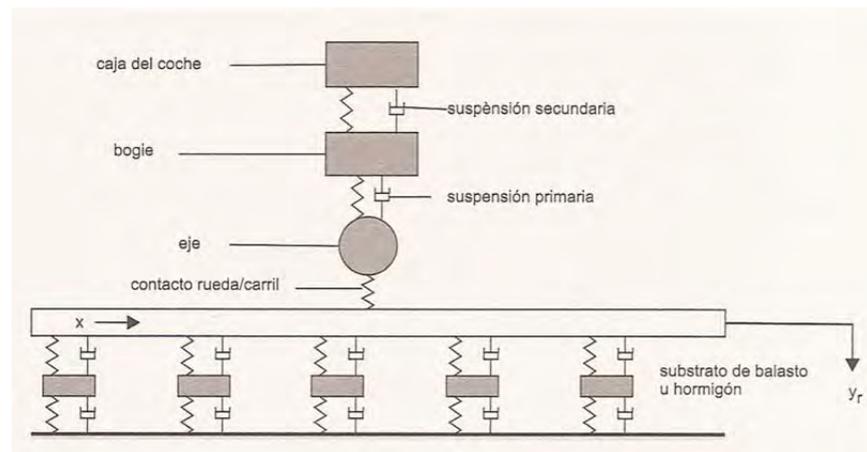
Según esto, y a raíz de la norma UNE-EN 50126, se opta por agrupar estos cuatro tipos de mantenimiento en sólo dos: mantenimiento correctivo y mantenimiento preventivo, ya que se puede considerar el mantenimiento preventivo y el mantenimiento proactivo como mantenimiento preventivo, ya que ambos son para “antes del fallo” del equipo o sistema.

- Equipos:
  - En primer lugar, se define equipo como “parte, componente, dispositivo, subsistema, unidad funcional o sistema que puede ser considerado individualmente”, según la norma IEC-60300-3-11. Se pueden diferenciar tres grandes grupos dentro del material móvil dividiéndolo según tipo de trabajo; mecánicos, eléctricos y de confort. En las siguientes páginas, se va a mostrar una breve introducción a cada uno de ellos.
    - Mecánicos
      - El sistema mecánico es el sistema más importante dentro de los embarcados en el material móvil. Esta importancia viene determinada por el importante desgaste al que están sometidos todos los elementos mecánicos.
      - Es importante destacar que en la actualidad, todavía podemos observar locomotoras que funcionan mediante motores de combustión interna. Esto significa que en la

siguiente enumeración se va a poder observar elementos propios de estos motores como podrían ser filtros de combustible.

- Suspensión

Dentro del mundo ferroviario las suspensiones tienen un papel importante en el confort y la seguridad de los viajeros o las cargas y por este motivo se han tomado medidas importantes en éstas. Existen dos niveles de suspensiones la suspensión primaria (entre rueda y bogie) y la secundaria (entre bogie y el coche ó vagón), como se muestra en la siguiente:



**Figura A.2 – Sistema de Suspensión**

Para hablar un poco más a fondo de cada tipo de suspensión se pueden comentar las características principales de cada una de ellas:

La suspensión primaria de los ferrocarriles suele ser aparentemente bastante simple, siendo crucial en su diseño tener en cuenta la fatiga del material elástico, que con el paso del tiempo reducirá su altura inicial. Ello implica las continuas y periódicas mediciones con el objetivo de incorporación de calas de suplemento para mantener la medida oportuna.

En el caso de la suspensión secundaria, puede ser también de muelles o mediante gomas o balones llenos de aire comprimido; sistema cada vez más utilizado por la comodidad que implica para el viajero. Lo que se consigue con este diseño, a parte de que conlleva un mínimo e incluso nulo mantenimiento, la facilidad de regulación mediante la incorporación de mayor o menor presión en el mismo según la carga de viajeros que soporta el coche ó la situación del tren en curva o recta.

Dentro del sistema de suspensiones se pueden distinguir varios elementos susceptibles de ser mantenidos, que a continuación se enumeran y se comentan.

### -Globo de la suspensión:

Como antes se ha nombrado, el globo o balón de la suspensión, situado en la parte secundaria de la suspensión, tiene un mantenimiento prácticamente nulo, ya que su regulación se lleva a cabo mediante la acción neumática.

En este elemento el mantenimiento se centrará en la inspección de los conductos de aire comprimido que permitirán la regulación de la suspensión.

### -Viga de la suspensión:

El sistema de suspensión ejerce unas fuerzas sobre los coches que se transmiten a través de una viga. Esta viga esta muy solicitada y por ello es necesario prestarle especial atención. El mantenimiento consistirá en al inspección, y cuando se vea algún desperfecto se informará al personal adecuado para su análisis o reparación.

### ▪ Frenos

Los frenos pueden ser de varios tipos: zapatas de metal, madera o compuesta (las modernas) que presionan contra la banda de rodamiento de las ruedas (accionadas por aire, hay dos sistemas, por presión de aire o por entrada de aire en el sistema que esta en vacío), frenos de disco en los ejes (además de zapatas), frenos electromagnéticos (que se "adhieren" magnéticamente al riel y detienen el tren, se utilizan mucho en vehículos de menor tamaño - tranvías y ferrobuses), frenos reostáticos y eléctricos utilizando los motores para reducir la velocidad y frenos de mano, que consisten en un dispositivo mecánico (generalmente un volante) que lo que hace es aplicar los frenos (zapatas) contra las ruedas y actualmente se utiliza para frenar los vagones en maniobras o para inmovilizar material que va a estar detenido por un periodo de tiempo mas o menos prolongado sin tener aire o vacío para mantener accionadas las zapatas.

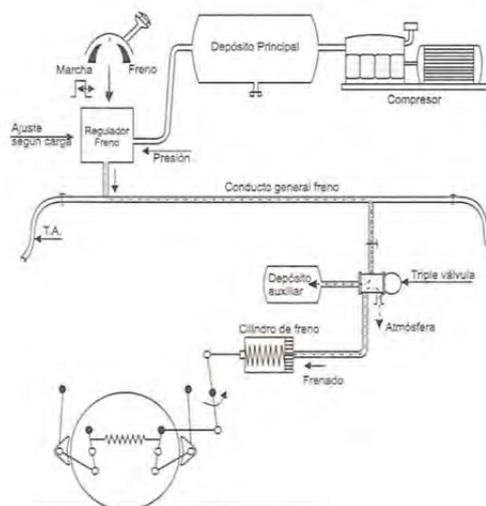


Figura A.3 – Sistema de Frenos

Los elementos susceptibles de mantenimiento referidos a los sistemas de freno son:

-Freno de emergencia o de auxilio:

Es el sistema de freno que se utiliza cuando el freno normal no funciona por el motivo que sea. Es muy importante que este en condiciones de funcionamiento por motivos sobradamente justificados.

-Disco de freno:

Son discos metálicos que sirven para el frenado, exactamente se utilizan para comprimirlos con las pastillas de freno y evitar su giro. Son elementos de desgaste y por este motivo es necesario inspeccionarlos y sustituirlos cuando sea necesario.

-Presión sistema de freno:

La presión en la línea de frenado ha de ser la correcta y hay que inspeccionarla periódicamente.

-Tuberías de presión de freno:

Hay que mantenerlas, ya que la presión que circula en su interior suele ser alta y se pueden dañar. Es un elemento fundamental para la seguridad del vehículo.

-Brazo de frenado:

Es el mecanismo que trasmite las fuerzas a los discos y debido a la fuerza que tiene que realizar se puede dañar, por este motivo debemos mantenerlo mediante reparaciones o sustituciones.

-Convertidor de freno hidráulico-neumático:

Como su propio nombre indica es un mecanismo que transforma la forma de ejercer la presión sobre el freno. Es un sistema muy sensible y es necesario de mantenimiento para la no aparición de problemas.

-Indicador de frenado:

El maquinista debe llevar un sistema de indicación de frenado para evitar circular con el freno activado. Estos indicadores también han de ser oportunamente inspeccionados.

- Acoplamientos

Las unidades de material móvil ferroviario autopropulsado de coches pueden ser compuestas y estas unidades deben estar comunicadas mediante elementos de acoplamiento tanto neumática, eléctrica y electrónica estos elementos suelen ser llamados enganches.

Los elementos susceptibles de mantenimiento referidos a los sistemas de acoplamiento son:

-Acoplamientos automáticos:

Son sistemas de acoplamiento que mediante elementos neumáticos, mecánicos y motores permiten al conductor tanto la desconexión mecánica como la transmisión eléctrica. Son sistemas que aúnan robustez mecánica, sistemas de amortiguamiento y absorción de impactos. Esto implica una complejidad importante y por este motivo hay muy pocos fabricantes en el mercado. Debido también a esta dificultad deberán ser mantenidos correctamente. En la siguiente imagen se especifican las partes de estos acoplamientos.

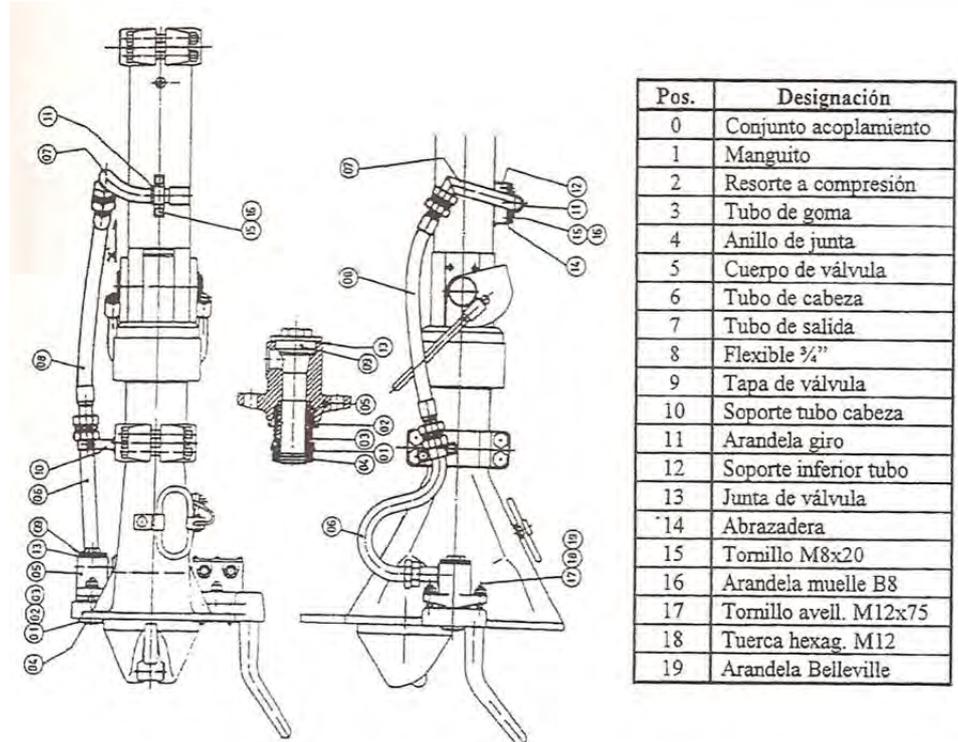


Figura A.4 - Acoplamiento automático

-Gomas de acoplamiento:

Los diferentes coches para pasajeros deben estar unidos para la libre circulación de los usuarios y esto implica una seguridad añadida en las conexiones entre los diferentes coches para que los usuarios no puedan caer a las vías ni hacia los lados. Pero al mismo tiempo debe ser un elemento de conexión flexible para que el tren no tenga problemas en los giros. Estos elementos son las gomas de acoplamiento que también han de ser mantenidas.



Figura A.5 - Sistemas de acoplamiento por gomas entre coches

-Absorbedor de choques:

Estos elementos están destinados a absorber los choques que se producen en los trenes en maniobras de taller o almacenes, se catalogan en tren tipos A, B ó C según la máxima carga que puedan almacenar.

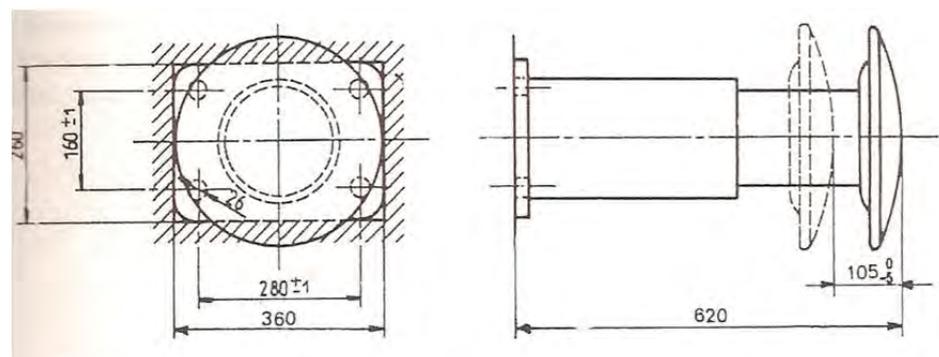
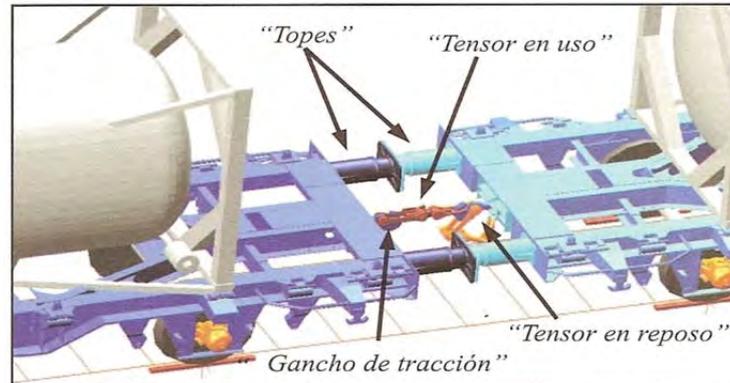


Figura A.6 - Sistemas de absorción de choques

- Motor de combustión  
Este apartado se va a centrar simplemente en la flota de coches sin contar con las locomotoras. Pero aun con todo hay que hablar de sistema de motor, o mejor dicho, de sistema de motores, ya que los conjuntos de vehículos ferroviarios poseen uno o varios coches en los que se presentan dos motores gemelos que son los encargados de proporcionar energía al conjunto en el momento en el que se encuentra sin locomotora, por la cual se suele transmitir energía eléctrica a los coches.

A continuación se enumeran los elementos susceptibles de ser mantenidos de los que consta este sistema.

-Aceite de motor:

Como en el caso de todos los motores, es necesaria la lubricación de los sistemas mecánicos para evitar desgaste excesivo y sobrecalentamiento que pueden originar la rotura del motor. Por este motivo, debemos mantener el aceite de motor sustituyéndolo cuando sea necesario, (normalmente según recomendaciones del fabricante).

-Culata:

Debido al propio desgaste del motor y a las elevadas presiones que en su interior se desarrollan es posible que a través de la culata se pueda perder algo de aceite, lo que se conoce como que el motor “suda”. Esto es un claro síntoma de que el motor está empezando a fallar y por eso es necesario llevar un control sobre el mismo, ya que puede desencadenar un fallo de mucha mayor importancia, llegando incluso a tener que cambiar el motor completo.

-Filtro aceite:

La inspección del filtro de aceite es una operación que se debe realizar de forma periódica y que normalmente se soluciona solamente con la limpieza del mismo.

-Bomba inyectora:

La bomba inyectora de combustible es un elemento muy importante en el funcionamiento óptimo de motor y por eso debe estar siempre en un correcto funcionamiento. En la imagen se puede observar un tipo de bomba inyectora lineal.

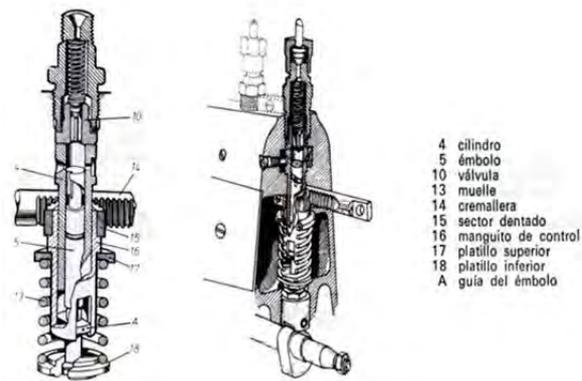


Figura A.7 – Bomba Inyectora

-Filtro combustible:

La inspección del filtro de combustible es una operación que se debe realizar de forma periódica y que normalmente se soluciona solamente con la limpieza del mismo.

-Filtro aire:

La inspección del filtro de aire es una operación que se debe realizar de forma periódica y que normalmente se soluciona solamente con la limpieza del mismo. Éste filtro es más peculiar que el resto ya que para evitar la entrada de partículas va mojado con un aceite que hace todavía más difícil la entrada de estas partículas.

-Líquido refrigerante:

El líquido refrigerante es uno de los consumibles más importantes dentro de cualquier motor, ya que es el responsable de evitar el calentamiento excesivo

del mismo y en consecuencia de evitar su desgaste excesivo y su rotura. Es muy importante que los niveles nunca desciendan del mínimo.

### -Radiador de motor:

El radiador es el elemento responsable de la refrigeración del líquido refrigerante ya que en el momento de salida del mismo del bloque motor, éste sale a una temperatura demasiado alta para la vuelta a su cometido. Este radiador funciona mediante la acción del aire o agua que circula a través de unas láminas de gran superficie y enfría al líquido refrigerante. Es muy importante que estas láminas estén limpias para que el aire pueda circular con libertad ó que el agua pueda enfriar correctamente.



**Figura A.8 – Radiador de motor**

### ▪ Pantógrafo

El pantógrafo, es el elemento encargado de tomar la corriente de alta tensión proveniente de la catenaria para el abastecimiento eléctrico de la totalidad del vehículo.

Consiste en un sistema articulado que sujeta un patín, presionándolo contra la catenaria, bajo la que se desliza.

Se sitúa en el techo de la unidad tractora y es regulable en altura de forma automática, para poder alcanzar la catenaria independientemente de la altura a la que se encuentre el hilo conductor aéreo.

Para evitar que el patín se desgaste en un sólo punto, la trayectoria de la catenaria se dispone en zigzag, de modo que va barriendo la mayor parte del patín provocando un desgaste uniforme en toda su superficie.

La elevación y el descenso del pantógrafo se realizan a través de un dispositivo de accionamiento compuesto básicamente por un motor eléctrico, encargado de la subida y bajada del pantógrafo, y un sistema de muelles, a través de los cuales se consigue la presión de contacto adecuada entre frotador y catenaria.

Las características principales del pantógrafo de semitijera son:

- Peso reducido.
- Construcción sencilla.

- Mantenimiento mínimo.
- Buen comportamiento de contacto.
- Máxima seguridad de funcionamiento.

Esto se consigue, entre otros motivos, por:

- Número reducido de piezas constructivas del pantógrafo.
- Técnica de rodamientos acreditada sin mantenimiento.
- Mesilla equipada con frotadores de suspensión individual.

En la siguiente figura se muestra el esquema de un pantógrafo de semitijera, que es el más utilizado.

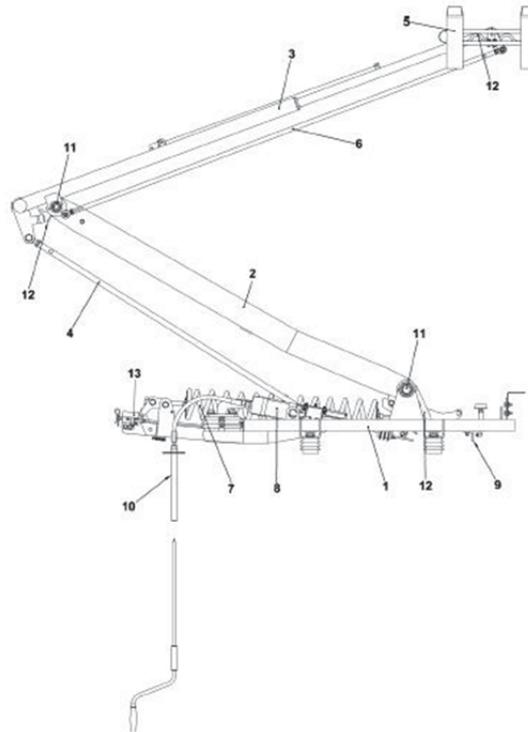


Figura A.9 – Esquema de un Pantógrafo de Semitijera

Nº	Descripción	Nº	Descripción
1	Bastidor-base	8	Dispositivo eléctrico de descenso
2	Tijera Inferior	9	Gatillo de sujeción
3	Tijera Superior	10	Eje Flexible
4	Barra de tracción	11	Palier del bastidor-base y de la tijera superior
5	Mesilla	12	Trecillas de corriente
6	Guía paralela	13	Gatillo de seguridad
7	Mecanismo de elevación		

Tabla A.4 – Componentes del Pantógrafo

En la siguiente fotografía se muestra un pantógrafo en funcionamiento



Figura A.10 – Fotografía de un pantógrafo

- Sistema neumático  
En la mayoría de unidades de tren se suelen introducir sistemas neumáticos sobre los que funcionan un número muy elevado de sistemas paralelos como: frenos, puertas, contactores, pantógrafos, etc. La concepción histórica de los sistemas neumáticos era de dos compresores: uno principal neumático y auxiliado por uno secundario alimentado por la batería del vehículo. Esta concepción ha sido desarrollada a lo largo del tiempo hasta llegar a un sistema neumático muy complejo que por esa característica se hace cada vez más importante en el funcionamiento del vehículo ferroviario y que deberemos mantener de forma precisa y, por tanto, con muchos elementos susceptibles de ser mantenidos.

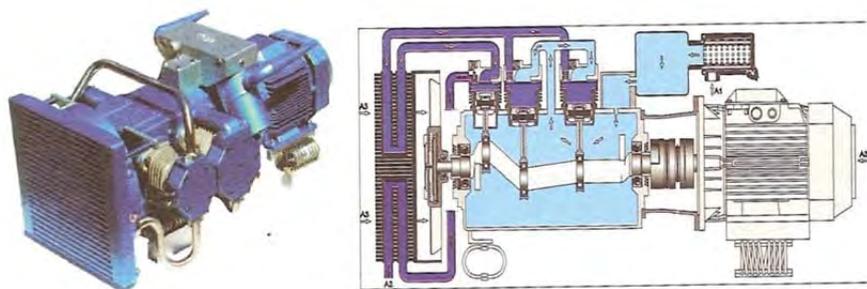


Figura A.11 - Compresor

Tras ésta imagen de la apariencia física y el esquema de funcionamiento de un compresor se va a enumerar y comentar los principales elementos de un compresor y en general de toda la línea neumática.

### -Filtro de aire:

En el sistema neumático de cualquier máquina será tremendamente importante que no sea posible la intrusión de partículas en la línea de reparto ya que esto puede dañar tanto las propias tuberías como los elementos finales sobre los que va a trabajar la presión (frenos, etc). Para ello se colocan unos filtros en la captación de aire para impedir la entrada a éstas partículas. Es muy importante mantener estos filtros limpios, ya que si se ciegan parcial ó totalmente podría incrementar la fuerza necesaria en el compresor para la captación de ese aire lo que se traduciría un aumento significativo del consumo e incluso podría llegar ha quemar el mismo.

### -Válvula de seguridad:

En el sistema neumático, es de clara importancia la tenencia de posibilidad de liberar de presión la línea en un momento dado. Para ello la válvula de seguridad debe ser regulada a no más de un 10% por encima de la presión de trabajo y deberá poder descargar el total del caudal generado por el compresor. Deberá contar además con un dispositivo de accionamiento manual para poder probar periódicamente su funcionamiento.

### -Secador de aire:

El excesivo desgaste de las tuberías de presión debido a la humedad del aire fue corregido mediante un secador de aire que impide la entrada de humedad en la línea. Este elemento tiene vital importancia en el tiempo de vida de las tuberías y por eso es importante prestarle importancia en tema de mantenimiento. Existen diferentes sistemas para el secado de aire; secado por absorción, secado por adsorción, y secado por enfriamiento.

### -Líneas de reparto:

Las líneas de reparto son sin duda uno de los elementos más importantes del sistema y debido a eso se deben inspeccionar en busca de fallos como fugas o abolladuras importantes que pueden entorpecer el funcionamiento del mismo. A continuación se muestra un esquema simple de la distribución de las líneas de reparto del sistema neumático.

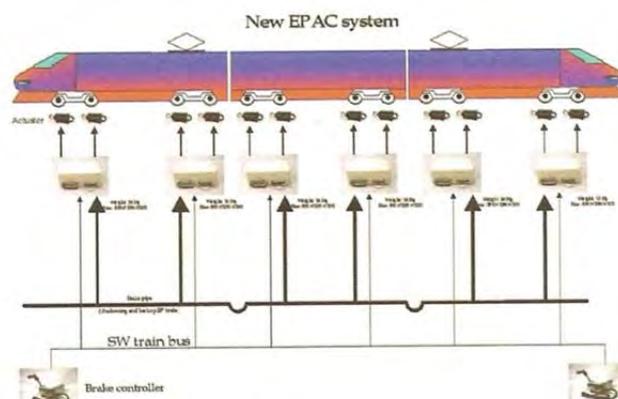


Figura A.12 - Sistema de distribución de presión

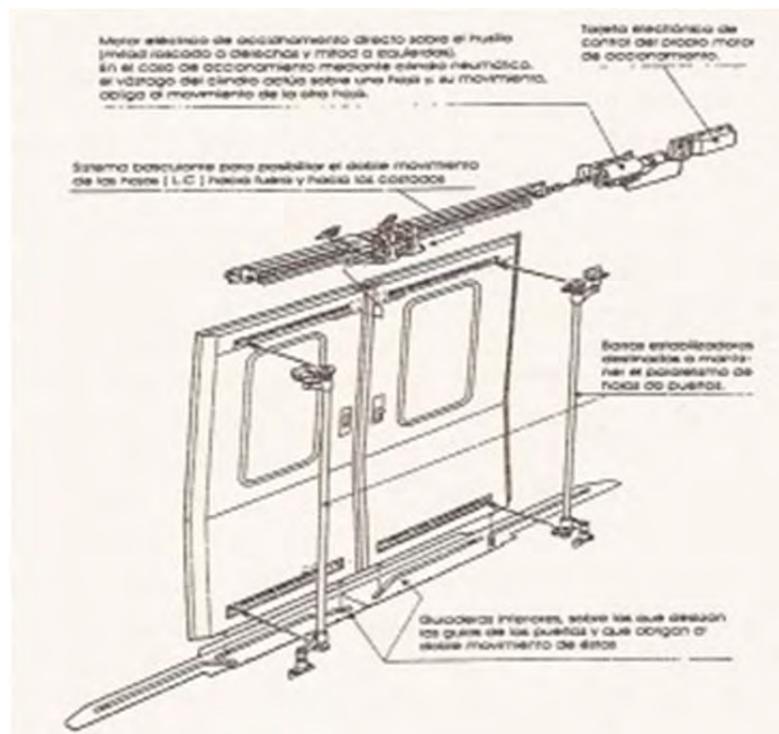
### ■ Puertas

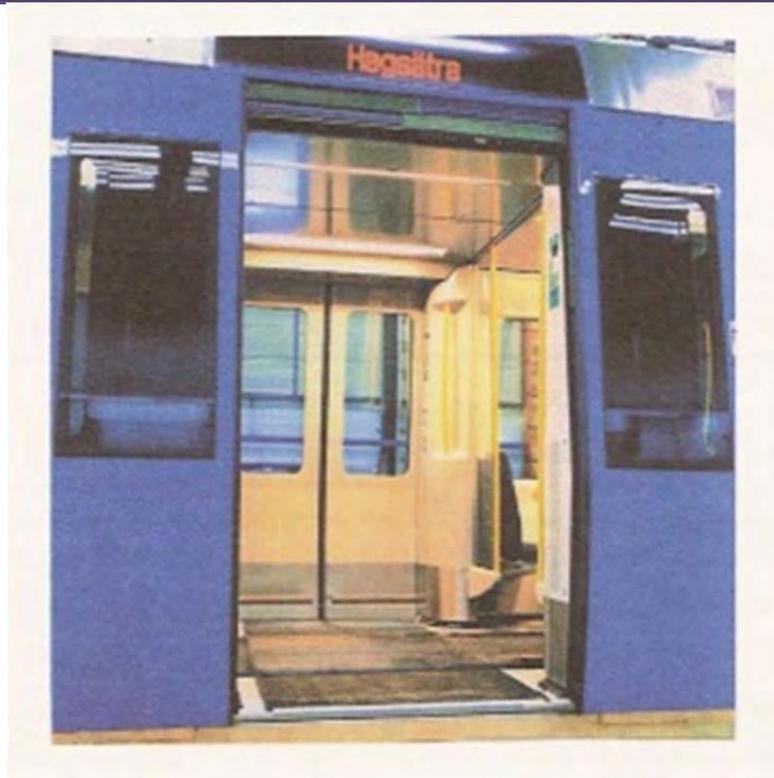
Desde un punto de vista profano y exterior puede parecer que el sistema de puertas es un sistema simple y de fácil mantenimiento, pero nada más lejos de la realidad. Se trata de un sistema complejo y problemático que se puede achacar a la importante cantidad de puertas que hay que poner en cada unidad de tren para que la entrada y salida de viajeros sea rápida y tenga la menor repercusión en la velocidad comercial.

El número de puertas dependerá del tipo de explotación aunque una medida correcta sería cada 4m una puerta de 1.5-2m de apertura libre en caso de tráfico denso de viajeros.

Las puertas suelen diseñarse atendiendo a tres criterios básicos en cuanto a su cinemática: mediante corredera (que se abren sobre el paramento exterior de la caja), 'de petaca' (que se escamotean al abrirse entre el decorado interior y el costado exterior) y las de doble movimiento (que se desplazan como las anteriores. Es el funcionamiento más complejo cinemáticamente pero da un buen aprovechamiento interior y exterior).

En las siguientes figuras se incluyen un conjunto de puerta del sistema más complejo, el de doble movimiento, en la primera se pueden observar los principales elementos de la puerta, y en la segunda una fotografía de una de estas puertas en funcionamiento.





**Figura A.13 - Sistema puertas de doble movimiento**

En el caso del interiorismo es muy difícil explicar unos sistemas generales, ya que deberá intervenir el interiorismo propio de la compañía ferroviaria. Asimismo, es posible decir que el diseño de los suelos, asientos y techos se cuidan extremadamente tanto para conseguir niveles altos de confortabilidad como de aislamiento acústico como además de protección ante el fuego.

En cuanto a los elementos susceptibles de mantenimiento no es posible establecer sub-elementos en sistemas de puertas ni en interiorismo, ya que se tratan como un todo que deberemos mantener a la vez.

- **Estructura**

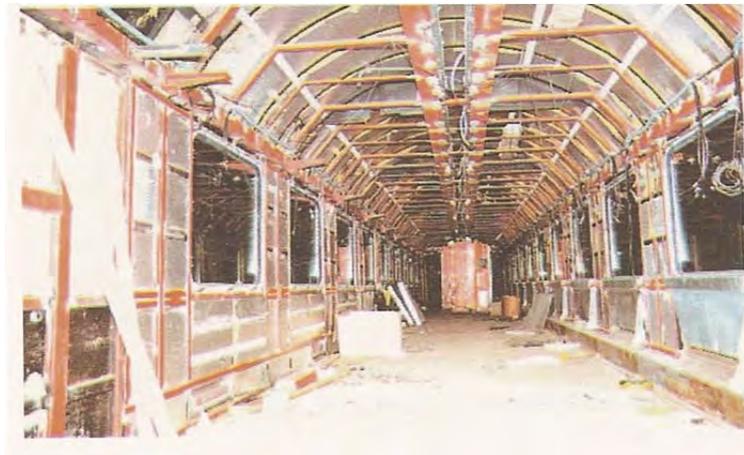
En este bloque, se tratará todo lo referido a la construcción de los coches utilizados en el sistema ferroviario, dejando más de lado los vagones que simplemente transportan carga, y que son particulares de cada mercancía.

Al principio el transporte se realizaba mediante berlinas y diligencias que se situaban sobre plataformas con ruedas. Pero más tarde, comenzaron a construirse los coches propiamente dichos, formados por una carrocería y un chasis, con muelles de ballesta y provistos de parachoques y enganches. La carrocería y el chasis solía ser de madera. En 1865 se comenzaron a construir chasis de hierro y al mismo tiempo, se instalaron asientos mullidos y un pasillo a lo largo de todo el coche, servicios higiénicos, etc. Finalmente, a

partir de 1920 se afirmó la construcción de carrocerías totalmente metálicas. Hoy en día se está impulsando el chasis de aluminio, por su ligereza.

La iluminación de los coches, obtenida al principio con velas y más tarde con lámparas de aceite, hasta terminar con lámparas eléctricas y el sistema de calefacción que comenzó con una circulación de vapor de la locomotora por los coches hasta que en nuestros días se utilizan calefacciones eléctricas a baja tensión, han sido los cambios más significativos que se han producido en la vida de los transportes ferroviarios.

A continuación, de muestra una imagen de la estructura de un coche en el momento de su construcción, en la que se pueden observar los elementos ventanas y la placa inferior de recubrimiento.



**Figura A.14 - Estructura de un coche en construcción**

Tras ésta breve introducción, se va a enumerar las diferentes partes dentro del sistema de estructura de los coches que sus susceptibles de ser mantenidas.

-Placa más baja de recubrimiento:

Es muy importante inspeccionar la placa más baja del recubrimiento, ya que es la base sobre la que básicamente está todo construido y por tanto una rotura de esta podría ser fatal para el coche.

-Ventanas:

Las ventanas son un elemento importante en el aspecto físico de los vehículos de tren y se deben mantener, en el sentido de limpieza, de forma más frecuente aunque se habrá de llevar también un mantenimiento correctivo en el momento de rotura de la misma. Existen unos tipos de ventanas, como son las ventanas de emergencia que requieren un mayor control ya que en el momento de emergencia son las principales zonas de salida de las personas.

-Agujeros de drenaje:

Los agujeros de drenaje, como su propio nombre indica, son unos agujeros que se sitúan cerca de las puertas y que son muy importantes de cara a la evacuación del agua sobrante en el interior del tren. El mantenimiento de estos agujeros estará enfocado a mantenerlos operativos, eliminando posibles partículas u hojas, por ejemplo, de su interior que impidan la actuación correcta de estos.

- Rodadura

Se denomina sistema de rodadura a todos los elementos que se encuentran entre el contacto de rueda-carril y el punto en el que el eje queda unido a las suspensiones.

El sistema de rodadura del material ferroviario es sin duda el sistema que más desgaste sufre por motivos obvios, y por tanto es el sistema que más mantenimiento y de mayor importancia llevará consigo.

La idea y concepción del eje del ferrocarril con dos ruedas cónicas unidas por un eje, tiene como finalidad la de compensar de forma natural la diferencia de camino recorrido entre carril interior y exterior en una curva sin deslizamiento. Asimismo, favorece el autocentrado del eje sobre la vía.

Las ruedas ferroviarias suelen tener diámetros comprendidos entre los 600mm y los 900mm según el servicio que vayan a prestar; con diámetros menores para el caso de servicios tranviarios y mayores para transportes de trenes puros. Las ruedas caladas a alta presión (del orden de 40Tn de presión de calado) están a su vez sometidas a importantes esfuerzos por el continuo ataque rueda-carril y el efecto de guiado. Los perfiles de las llantas de estas ruedas normalizados según UIC, utilizándose en estos casos perfiles UIC 45 y UIC 54, correspondientes a carriles de 45 Kg por metro y 54 Kg por metro respectivamente.

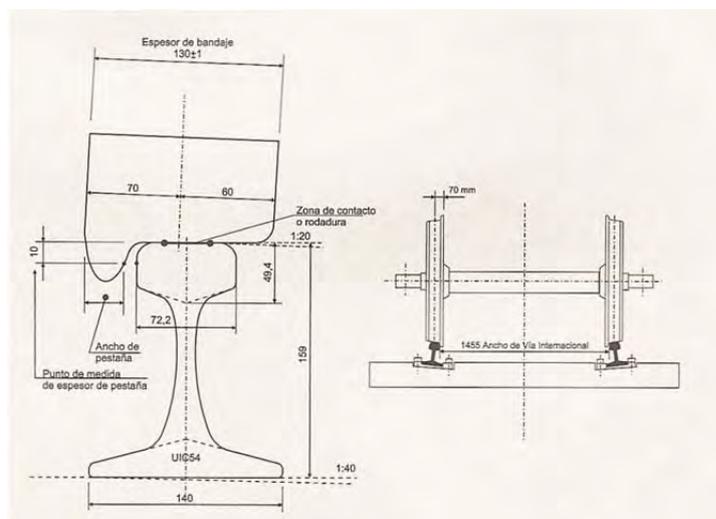


Figura A.15 - Sistema de rodadura

En los servicios ferroviarios metropolitanos en los que, normalmente, los radios de curvatura de sus trazados son mucho más reducidos que en los ferrocarriles de servicios regionales o de largo recorrido, es muy importante la vigilancia y mantenimiento del estado de su perfil, agravado con efectos de huellas, afilamientos de pestaña, etc. Cuando no existen sistemas de engrase rueda-carril, el engrase puede ser basado en equipos fijos instalados en la vía y que proyectan pequeñas cantidades de grasa al paso del tren mediante sensores de proximidad ó de vibración.

El ataque rueda-carril, además del lógico desgaste, implica problemas de ruido generado, ruido muy difícil de minimizar, y que sitúa en frecuencias de 400 a 4000Hz.

En el mercado hay diversas soluciones para reducir éste efecto, mediante la incorporación de absorbedores atornillados ó soluciones basadas en vulcanizar un polímero viscoelástico en la propia rueda.

Dada la agresiva situación a que se someten las ruedas de los metros, tranvías y trenes, se hacen precisas operaciones de reperfilado de dichas ruedas, con el objetivo de mantener la altura mínima aceptada para la pestaña, ya que dicha pestaña es un elemento de mucha importancia para la seguridad contra el descarrilamiento. Esta operación se realiza mediante tornos, que pueden ser de tipo convencional o los llamados “de foso” que evitan desmontajes innecesarios.

Como es lógico, la fabricación de ruedas ferroviarias debe estar sujeta a exigentes requisitos. Y a continuación, se presentan los principales requerimientos de las mismas.

a.- DIMENSIONES DE LAS RUEDAS. En figuras anteriores ya se han expuesto parámetros, formas y cotas principales de las ruedas ferroviarias. No existe de momento ninguna norma sobre tolerancias y valores de rugosidad, siendo cada país ó fabricante el que especifica estos aspectos.

b.- NORMAS DE FABRICACIÓN. Las normas más comúnmente utilizadas en Europa son la UIC 812-3 e ISO 1005, que aluden a un gran número de Normas específicas ISO y DIN para aspectos concretos de su desarrollo.

c.- CARACTERÍSTICAS DE ACERO. Si bien no se va a abordar el desarrollo detallado de los tipos de acero utilizados en la fabricación de ruedas, sí conviene indicar que se catalogan en los tipos R1, R2, R3, R6, R7, R8, R9. Distinguiéndose entre ellos por sus características metalúrgicas: No tratadas y normalizadas. Símbolo (N) para R1, R2, R3 y tratadas superficialmente, Símbolo (T) para templadas por inmersión y revenidas, Símbolo (E) para las categorías, Símbolo (N) para R6, R7, R8, R9. La

normalización (N) se entiende por el proceso del calentamiento de las ruedas a alrededor de 540°C y dejar enfriar al aire calmado hasta 25°C, dejándolas así un cierto tiempo.

D.- PRESCRIPCIONES DE EXAMEN Y ENSAYOS. La gran parte de las características dimensionales y metalográficas de ruedas son verificables mediante las siguientes pruebas.

- 1.-Exámenes micrográficos de la estructura, así como macroscópicos y micrográficos mediante ataque (método Baumann).
- 2.-Exámenes por ultrasonidos tanto mediante sondaje como axial como radial.

○ Eléctricos

Dentro de los sistemas embarcados en un vehículo ferroviario, uno de los más importantes es el sistema eléctrico, del cual dependen muchísimos elementos tanto de confort como funcionales.

A continuación se muestran diferentes elementos del sistema eléctrico que son susceptibles de ser mantenidos.

▪ Cafetera

La cafetera es un elemento de sobrada importancia en el servicio de los viajeros de cara al confort de los mismos y, por lo tanto, es necesario mantenerla adecuadamente para evitar incomodidades de viajeros y penalizaciones establecidas por contrato.

▪ Video. Audio. Comunicaciones

Otro elemento muy importante tanto para el confort como para el servicio de los viajeros serán los sistemas de audio y video que serán indispensables en desplazamiento sobre todo de larga distancia.

▪ Refrigerador

Otro elemento importante es el refrigerador, que no puede faltar en el sistema de servicios de trenes de larga distancia y que cada vez es más demandado en el sector.

▪ Motor eléctrico

En este apartado, cuando se menciona motores eléctricos, se refiere a motores eléctricos tractores, es decir, que dan la tracción al material rodante. Hoy en día, la ubicación de los motores ya no corresponde solamente a la locomotora, estando ubicados en diferentes vehículos, dependiendo de la necesidad. Se sitúan en los llamados bogies motores y suelen ser dobles.

Son motores trifásicos, asíncronos, y autoventilados.

En la siguiente fotografía se muestra uno de estos bogies:

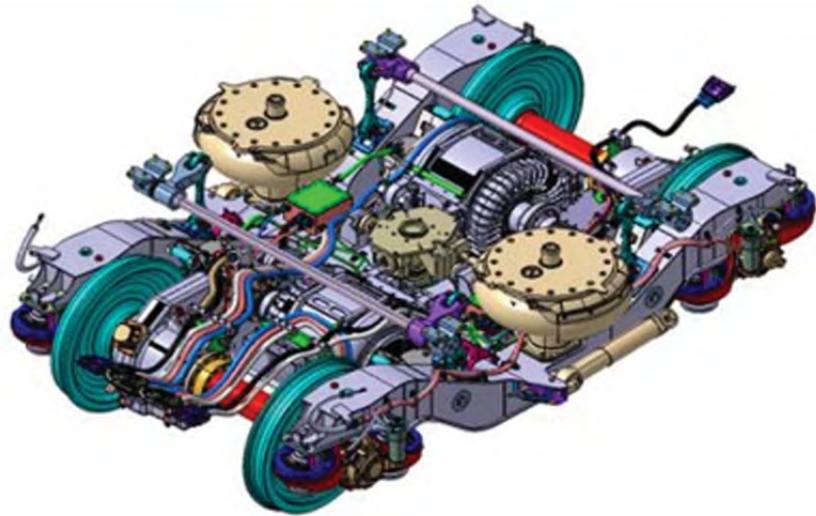


Figura A.16 – Bogie motor

Cada motor incluye un sensor de velocidad que permite al control de la tracción (TCU) conocer la velocidad de giro del motor.

La transmisión del par motor entre cada motor simple y cada reductor se realiza a través de una brida de acoplamiento elástico para cada engranaje.

Los principales componentes de este tipo de motores son:

- Rotor
  - Estator
  - Caja de conexiones
  - Rodamientos
  - Sistema de refrigeración.
- Convertidor de tracción
- El convertidor de tracción es el encargado de proporcionar la tensión alterna trifásica necesaria para alimentar a los motores de tracción asíncronos, debido a que la tensión de catenaria suele ser continua.
- Para el control de los motores de tracción se aplica un control de tensión y frecuencia variable.



Figura A.17 – Convertidor de Traccion TrainElec

En la siguiente imagen, se muestra como sería el esquema del convertidor de tracción, junto con la alimentación a los motores trifásicos. Se trata del esquema de un tranvía, obtenido de la página de Trainelec.

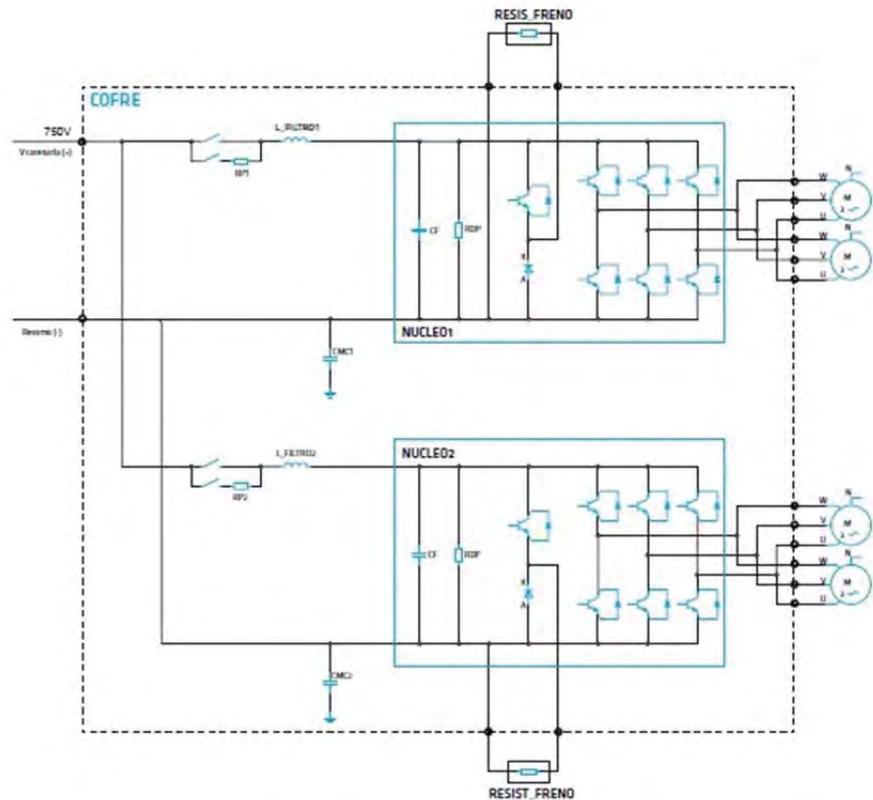


Figura A.18 – Esquema de un Convertidor según TrainElec

- Sistema de Climatización

El sistema de climatización suele estar diferenciado en dos, la climatización de sala y la climatización de cabina, siendo este último un sistema similar al primero, pero con menores dimensiones y menos potencia. Se da en transporte de viajeros.

En este apartado se expondrán las características del sistema de climatización de sala.

El sistema de climatización para acondicionar las salas de viajeros dispone de los elementos necesarios para realizar las funciones de ventilación, calefacción, refrigeración y deshumidificación de estos módulos. Lo más habitual es que este todo el sistema en lo que se conoce como equipo compacto. En la siguiente imagen se muestra como es uno de estos equipos.



Figura A.19 – Fotografía de un Sistema de Climatización

Este equipo se instala en techo de los coches, no en todos, sino según necesidades del conjunto.

Un sistema de conductos, acoplado a la descarga de aire de los equipos compactos, distribuye el aire para acondicionar los coches asignados.

Físicamente, el equipo compacto se divide en el compartimiento condensador, donde se produce la condensación del refrigerante mediante el aire ambiente; y el compartimiento evaporador desde el que se realiza la descarga de aire tratado al interior de la sala a acondicionar.

Lo más habitual es que con un control electrónico con microprocesador se realicen las funciones de regulación de temperatura, diagnóstico, control de modos de funcionamiento y envío de información referente a la diagnosis a un PC mediante una red Ethernet.

Los principales equipos interiores de los que dispone un sistema de climatización, entre otros, son el compresor, evaporador, condensador, filtros, resistencias de calefacción, válvulas y sensores de control.

Es muy importante que todo este en correctamente funcionando para garantizar en confort dentro del vehículo.

Se muestra otra imagen de este tipo de sistemas:



Figura A.20 – Imagen de un sistema de Climatización

- **Baterías**

La batería tiene como misión principal la puesta en marcha del tranvía hasta que la cadena de pantógrafo/convertidor auxiliar/cargador de batería entra en funcionamiento. Durante el funcionamiento normal, las cargas de baja tensión del tranvía se alimentan desde los cargadores de batería.

En condiciones de emergencia, es decir, cuando no hay alta tensión o se produce un fallo en los cargadores de batería, la batería se encarga de alimentar, con limitaciones, los circuitos de baja tensión del vehículo durante un tiempo determinado. En esta situación la batería comienza a descargarse.

En los puestos de conducción, se dispone de un indicador analógico que muestra la tensión de la batería.

Un relé de mínima tensión, se encarga de desconectar la batería antes de llegar a la descarga total.



**Figura A.21 – Sistema de Baterías**

Las baterías suelen ir dentro de un cofre para protegerlas de agente externos, como suciedad, polvo o la lluvia.

- **Disyuntor**

El disyuntor permite la protección del circuito de AT de fallos de cortocircuito. Además, permite la apertura y cierre remoto para la conexión y desconexión del ferrocarril.

Se muestra una imagen de un disyuntor sin la caja protectora:

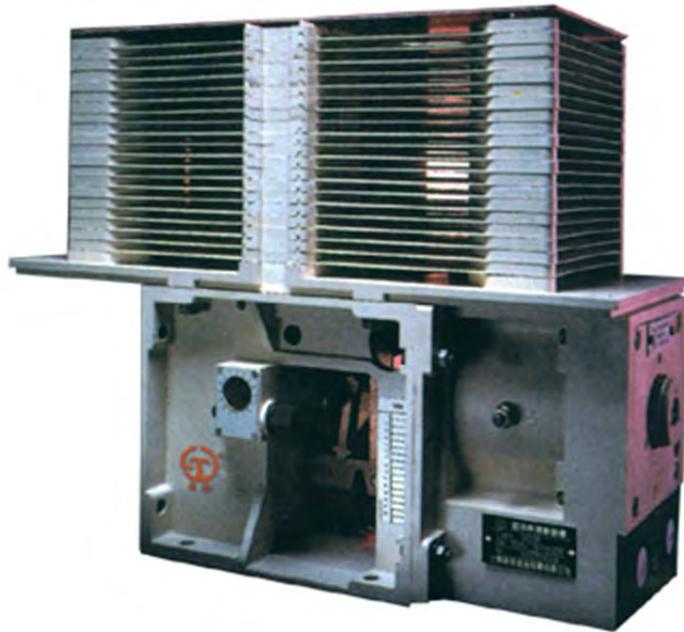


Figura A.22 – Interior de un Disyuntor

Las partes principales serían:

- Caja protectora que consta de una caja en material aislante autoextintor sostenida en una armazón de metal:
  - Circuito principal, que consta de un terminal de conexión inferior, un contacto móvil, un terminal de conexión superior, un contacto fijo con cuerno y otro cuerno.
  - Apertura por sobreintensidad.
  - Cámara de soplado.
  - Dispositivo de cierre y horquilla.
  - Conjunto de contactos auxiliares.
- Pararrayos
- La función del pararrayos es absorber las sobretensiones dañinas procedentes de la línea, protegiendo cada una de las partes del sistema de propulsión. El pararrayos se compone de una serie de resistencias de óxido metálico unidas mediante abrazaderas de fibra de vidrio y cubiertas de una carcasa moldeada de silicona que lo protege de las influencias medioambientales. Las resistencias de óxido metálico son de naturaleza no-lineal. Con la máxima tensión de funcionamiento solo una pequeña corriente capacitiva atraviesa el pararrayos. Con el incremento de la tensión, las resistencias entran en un estado de alta conductividad instantáneamente. De esta manera cualquier aumento de la tensión se limita a los valores de tensión residual especificados. Cuando la tensión desaparece, el pararrayos vuelve al estado de no-conductor.
- El pararrayos convierte el exceso de tensión en calor, que a su vez, es disipado al entorno.

En la siguiente imagen se muestra uno de estos pararrayos:



Figura A.23 – Sistemas de Pararrayos

- **Sensores**  
Como se ha mencionado en apartados anteriores, una serie de sensores tanto para control como para servicio, son necesarios, por lo que habrá que disponer de ellos siempre en correcto funcionamiento.
  
- **Convertidor auxiliar**  
Los convertidores de auxiliares están conectados a los buses de AT de los inversores y se encargan de transformar la tensión que proviene de la catenaria en tensión de alterna trifásica, para la alimentación de los sistemas auxiliares del tranvía y para la alimentación del cargador de baterías.  
El convertidor dispone de protecciones eléctricas que protegen el equipo ante las siguientes situaciones:
  - Sobretensión de entrada.
  - Sobrecorriente de entrada.
  - Sobrecorriente de salida.
  - Protección de cortocircuitos.
  - Protección diferencial.

El convertidor de auxiliares consta de los siguientes conjuntos funcionales:

### - Contactor de línea y circuito de precarga:

El convertidor de auxiliares está conectado en el bus del equipo de tracción, compartiendo su circuito de precarga. El circuito limita la corriente de carga del condensador del circuito intermedio e impide que sobreoscile la tensión del circuito intermedio. La unidad de control regula la carga del condensador del circuito intermedio mediante el contactor de precarga y la resistencia de precarga hasta que la tensión alcanza un valor predefinido. Sólo después se cierra el contactor de línea.

### - Filtro de red:

La inductancia que forma parte del filtro de red está compartida por el equipo de tracción y el convertidor de auxiliares. Además, los condensadores de cada uno de los subconjuntos del convertidor integrado forman parte del filtro. El filtro de red minimiza la carga de la red por corrientes de oscilaciones armónicas y protege los equipos contra condiciones transitorias de la red.

### - Circuito intermedio de tensión continua:

Tanto los inversores de tracción como el convertidor de auxiliares disponen de circuito intermedio de tensión continua, el cual consta del condensador de bus y del acondicionador para medida de la tensión del circuito intermedio. El condensador de bus estabiliza la tensión del circuito intermedio y proporciona la potencia activa y reactiva para los inversores.

### - Sensorización de tensiones, corrientes y temperaturas:

El equipo contiene una serie de sensores de tensión y de intensidad mediante los cuales se miden las tensiones DC de catenaria y la de los circuitos intermedios.

### - Inversor trifásico:

Es el encargado de transformar la tensión del circuito intermedio en un sistema de corriente trifásica para alimentar las cargas AC.

### - Sistema de refrigeración:

Es el encargado de evacuar el calor producido por las pérdidas de los semiconductores y elementos de potencia.

### - Unidad de control:

Se encarga de la gestión de todos los elementos que conforman el sistema.



Figura A.24 – Convertidor de Auxiliares

### ■ Iluminación

El alumbrado interior de sala se suele realizar a través de luminarias, dispuestas longitudinalmente a lo largo del vehículo en dos bandas.

Se distinguen tres tipos de alumbrado:

- Alumbrado de emergencia: Proporciona en todos los módulos una iluminación permanente a partir del momento en el que se conecta la batería (tranvía encendido), no necesita de una demanda por parte del conductor.
- Alumbrado normal: Se enciende a partir de una demanda del conductor, generalmente desde un pulsador en el pupitre de conducción.
- Alumbrado de limpieza: Coincide con el alumbrado de emergencia, aunque se alimenta directamente desde batería permitiendo su encendido con el tranvía apagado.



Figura A.25 – Iluminación Interior de un tren

En cuanto a la iluminación exterior, los vehículos suelen estar dotados de los siguientes sistemas:

- Luces de cruce, posición, galibo, antiniebla traseras y freno que están alimentadas a través del cargador de batería.
- Luces de intermitencia que se alimentan directamente de la batería para permitir su activación con el tranvía apagado.



Figura A.26 – Iluminación Exterior de un tranvía

- Limpieza

Los elementos susceptibles de limpieza son evidentes en un vehículo ferroviario pero no debemos descuidarlos por ello. A continuación se muestran los sistemas más importantes que necesitan de limpieza, así como la limpieza exigida por la organización nacional de ferrocarriles que en el caso de España es RENFE.

- Desinfección RENFE:

- RENFE obliga a una limpieza que consiste en una desinfección y limpieza cada 3 meses mediante una máquina que pulveriza un producto químico con propiedades desinfectantes.

- Asientos

- Los asientos tienen un mantenimiento mecánico y otro de limpieza ya que como es lógico son unos elementos de uso habitual en contacto con personas, y tienden a la acumulación de suciedad progresivamente.



Figura A.27 - Asientos vehículo ferroviario

- Suelos

- Se puede decir que el suelo es el elemento más propenso a ensuciarse, y por higiene, comodidad y estética visual ha de estar limpio. Puede ser tanto de moqueta, por lo que habría que utilizar aspiradores, o por el contrario, suelo con acabado liso o, como se le suele llamar, pavimentado.



Figura A.28 – Imagen de suelo de un tren (pavimento)

- **Maleteros**  
Los maleteros sufren una menor exposición a suciedad que los coches de viajeros y lógicamente con menor importancia para el confort de los viajeros y por ello deberán ser limpiados con mayor frecuencia.
- **Fuelles**  
Los fuelles están localizados entre los diferentes coches, y, entre sus funciones, cabe destacar dar seguridad a la hora del paso entre coches, así como aislar el interior del vehículo de las condiciones ambientales. Son de un material especial y por tanto, debe estar mantenido para que no se rompa antes de tiempo.  
El mantenimiento es sencillo, ya que suele bastar con limpiarlo, exteriormente gracias al paso por el túnel de lavado, e interiormente, para garantizar una salubridad e higiene dentro del coche.



Figura A.29 – Fuelle de un tranvía

- **Pasamanos**  
Estos elementos no se dan en todos los vehículos ferroviarios, estando más bien destinados a tranvías, metros y cercanías, que es donde los pasajeros suelen ir de pie.  
Se consideran tanto las “barras” de material metálico como las agarraderas que cuelgan de ellas, generalmente de materiales plásticos.  
Son elementos que han de estar limpios, por salud, higiene y confort.



Figura A.30 – Pasamanos de un tren

- Instalaciones

Las instalaciones para el mantenimiento ferroviario son muy importantes para el buen desarrollo del mismo y como consecuencia de los diferentes problemas que se pueden dar en el ámbito ferroviario, se han llevado a fin diferentes tipos de talleres ferroviarios, en los cuales se procederán a reparar problemas de diferente importancia, siendo lógico que los talleres centrales se encontraran en los finales de línea y serán los lugares en los que se realizarán las reparaciones más importantes y los desmontajes completos para las revisiones periódicas.

Desde la creación en 1941, RENFE contaba con unas infraestructuras de talleres sobre la cual se ha apoyado para el desarrollo del sector ferroviario en nuestro país. Los talleres ferroviarios vieron su época de esplendor durante las décadas de los setenta y ochenta, con innumerables instalaciones repartidas por la geografía española, en las que vagones, coches y locomotoras eran reparados, revisados y en muchas ocasiones custodiados.

A principios de los noventa, y con la necesidad de crear un ferrocarril de calidad con el objetivo de rentabilizar los recursos de los que disponían las resentidas administraciones ferroviarias europeas. Una década más tarde un consejo de ministros en Marzo de 2003 se dictaminó la privatización de RENFE en un periodo de tres años, que supuso el acceso a la red nacional a cualquier institución privada que se dedicara al transporte internacional de mercancías.

El conjunto de los talleres se vio también involucrado en éste cambio y supuso la nueva orientación hacia la calidad como objetivo primordial. Y así nació MIT (mantenimiento integral de trenes), que en 2006 con la creación de RENFE operadora pasó a llamarse "Integria".

Bajo el nombre de taller ferroviario se engloban las instalaciones normalmente cerradas, en donde de repara, se mantiene y se revisa el material móvil.

Se pueden clasificar los talleres ferroviarios en cuatro categorías diferentes, atendiendo a diversos aspectos; función gestora, capacidad de intervención, material intervenido y movilidad. La forma de clasificación principal es en base al material con el que se trabaja, mientras que la función gestora es un concepto nuevo y de momento poco utilizado.

No existe en España ningún criterio de diferenciación entre talleres por categoría o rango.

Se va a establecer una diferenciación que puede resultar interesante, en primer caso los talleres centrales de reparación son los encargados de grandes levantes en los que se revisa y repara si son necesarios los elementos dañados. También se dedican a modificaciones en series concretas de vehículos. En segundo lugar se encuentran los talleres de pequeña o mediana intervención, que se dedican a la mayoría de las intervenciones que se efectúan en cualquier elemento ferroviario, ya sean de intervenciones correctivas, preventivas ó predictivas. En tercer y último caso, los puestos fijos son dependencias de taller de escasa capacidad de actuación que habitualmente se encuentran circunscritos en dependencias de mayor envergadura como un taller de mediana intervención.

En la figura siguiente se muestran la distribución de talleres en el territorio español a fecha de Enero de 2006. Como puede observarse los puestos fijos no aparecen porque son elementos adscritos a un taller de mayor envergadura. Cabe destacar que el taller de Zaragoza y en definitiva todos los talleres ferroviarios importantes de RENFE están bajo la certificación de la norma ISO-9001 ó ISO-9002.



**Figura A.31 - Reparto de talleres en la geografía Española**

Tras esta introducción a los talleres ferroviarios se va a estudiar más a fondo los elementos que son necesarios en ellos para el desarrollo del trabajo, dividiendo éste en tres grandes grupos; flota mecánica, flota eléctrica y flota de limpieza (tanto interior como exterior).

- Para mantenimiento mecánico  
La flota de instalaciones para mantenimiento mecánico es la más compleja de las tres ya que lógicamente es éste sistema el que más desgaste sufre con el desplazamiento del material móvil.

El mantenimiento de una gran parte de instalaciones mecánicas ferroviarias, así como el caso de las escaleras mecánicas y ascensores, se encuentra tipificado en la normativa y reglamentos de cada administración local o autónoma que, a su vez han extrapolado directivas de la Comunidad Europea o normativas especiales.

Para comenzar con los elementos necesarios para el dicho mantenimiento, debemos fijarnos en la máquina que probablemente sea la más importante dentro de un taller de mantenimiento ferroviario, el torno de foso. Se trata como su propio nombre indica de un torno que se encuentra en un foso y que se utiliza para reperfilear las ruedas del vehículo ferroviario sin necesidad de desmontar ejes, y que permite torneear simultáneamente las dos ruedas de un eje. Ésta es sin duda una de las operaciones más importantes dentro del mantenimiento mecánico, ya que como se indicó

anteriormente el perfil de la rueda debe tener una altura mínima para la seguridad de los ocupantes, y con el desgaste esa altura queda insuficiente.



Figura A.32 - Fotografía torno de foso

A partir de esta máquina tan importante y especial para el mantenimiento ferroviario mecánico, los demás elementos necesarios serán los normalmente utilizados en cualquier taller de reparación mecánica, haciendo especial hincapié en elementos de sobrada importancia como por ejemplo, un puente grúa, que debido al elevado peso de los elementos a elevar en el ámbito ferroviario será imprescindible.

- Para mantenimiento eléctrico

El mantenimiento eléctrico es mucho más simple que el mecánico y por lo tanto, los elementos que utilizaremos será de menor importancia, y por tanto no específicos del ámbito ferroviario.

Los problemas eléctricos se podrán identificar mediante simples medidores de intensidades, tensiones y resistencias. Y para la consiguiente reparación bastará con las herramientas típicas de un taller normal además de repuestos de los que hablaremos más adelante.

Cabe destacar que en el tema de iluminación, que sin duda se encuentra dentro del mantenimiento eléctrico, se deberá contar con un medidor de intensidad luminaria, sobre todo para la iluminación exterior.

- Para limpieza

La limpieza del material móvil es de evidente importancia tanto interior (confort de los viajeros), como exterior (aspecto general exterior). Los elementos utilizados para la limpieza de vehículo se diferencian entre limpieza exterior e interior.

- Elementos para mantenimiento de limpieza interior:

Para la limpieza interior se suele utilizar productos de limpieza habituales en cualquier zona de trasiego de personas, como podrían ser productos de limpieza tales como limpia cristales ó productos para el suelo. Éste tipo de limpieza se viene realizando con mano de obra y sin ayuda de máquinas.

En los últimos tiempos y como consecuencia de la creciente importancia de economizar tiempos se han ideado sistemas de limpieza que permiten la limpieza del suelo interior sin necesidad de tanta mano de obra y mediante una máquina. Éste sistema tiene su comienzo en la construcción de los coches, ya que se construyen de forma que los asientos se aseguran a las paredes de los coches en lugar de hacerlo al suelo como se hacía habitualmente. De esta forma es posible hacer pasar una máquina a lo largo de todo el coche sin necesidad de tener que ir esquivando las patas de los asientos.

A continuación se muestran unas máquinas de limpieza de suelos comunes que sin duda servirían para éste cometido.



**Figura A.33 - Máquinas de limpieza de suelos**

A parte de éstas limpiezas que podrían parecer lógicas, existen normativas nacionales en al menos todos los países desarrollados que exigen la pulverización interior de productos desinfectantes como ya se comentó anteriormente.



Cabe también destacar que dentro de un taller ferroviario debe encontrarse también un almacén de repuestos del que todavía no hemos hablado. La gestión de este apartado estará a cargo de la dirección del taller que a su vez tendrá un presupuesto al que ajustarse.

- Gestión del Mantenimiento asistido por ordenador (GMAO)

El GMAO tiene como principal objetivo la gestión y organización industrial, para conseguir un modo de trabajo mucho más eficaz y económico sobre unas unidades de fabricación. Los impedimentos que surgen en una empresa son enemigos de la producción y de ofrecer al cliente un trabajo con la máxima calidad posible. Mediante una persona que sea conocedora del mundo del mantenimiento y ayudándose de un software puede llegar a controlar y resolver los problemas ó impedimentos de forma económica y eficaz.

Hoy en día los problemas relacionados con mantenimiento son muy cuantiosos y costosos, lo que se traduce en un incremento del interés en el mismo, con el objetivo de no desajustar en exceso los presupuestos.

Es importante señalar que el mantenimiento comienza en el momento en el que una máquina se pone en marcha, pero esto no significa que cualquier problema que pueda ocurrir en una unidad de fabricación sea responsabilidad absoluta del mantenimiento. Es necesario dotar al departamento de mantenimiento de un buen GMAO que va a ayudar en la resolución de los problemas y que también debe resultar de fácil manejo de cara al personal no informático.

A la hora de elegir un GMAO habrá dos grandes posibilidades:

- Elegir un programa estándar del mercado y adaptarlo a nuestra empresa.
- Definir y crear nuestro propio software de gestión de mantenimiento.

Cabe destacar que la creación de nuestro propio software es una tarea ardua y que requiere tiempo y dedicación.

- Gestión de mantenimiento en función del tipo de empresa.

Para poder tener una referencia de las exigencias en cuanto a gestión de mantenimiento de cada uno de los sectores más importantes, vamos a observar la siguiente figura en la que quedan meridianamente claros los valores en porcentajes en las que se mueven en cada sector.

	CORRECTIVO	PREVENTIVO	PREDICTIVO
FABRICACIÓN	60-70%	20-40%	0-5%
OBRAS PÚBLICAS	20-30%	70-80%	0%
TRANSFORMACIÓN	25-40%	40-60%	0-20%
ALIMENTICIA	10-20%	40-50%	0-40%
PEQUEÑA EMPRESA	90-95%	0-10%	0%

**Tabla A.5 - Los sectores y su mantenimiento**

Las empresas de fabricación necesitan un software de control del mantenimiento correctivo muy exigente para poder controlar los costes, evaluar la fiabilidad y tomar decisiones importantes para el futuro. Mientras que se conforman con un módulo sencillo de gestión del preventivo. Suelen querer un software de gestión de almacenes y pedidos.

Las empresas de obras públicas, sin embargo, quieren un módulo mucho más potente en cuanto a preventivo. Puede ser necesario incluir un módulo de mantenimiento predictivo.

La pequeña empresa busca lo mínimo posible para poder gestionar el mantenimiento, obtener costes y disponibilidad globales. Junto con una simplicidad máxima en el manejo y rapidez en la introducción de datos.

En el caso de las empresas de transformación necesitan módulos tanto de predictivo como de preventivo, y el tratamiento de estos datos permitirá establecer informes y avisos precisos y su tratamiento posterior.

Mientras, las empresas del sector de la alimentación precisan un control semejante al de las empresas de transformación, aunque sus necesidades suelen ser menores. Conviene que tenga en cuenta aspectos como seguridad e higiene.

- Comparación de softwares de gestión de mantenimiento.

Dentro del mundo de los softwares de mantenimiento existe un gran número de programas que desarrollan tareas para diferentes presupuestos y tamaños de empresas.

A continuación, se muestra una tabla detallada de las diferentes herramientas de las que consta un cada programa. Lógicamente los programas que más puntos tienen son los más completos y por tanto los más caros.

MODELO DE ANÁLISIS DE PLANES DE MANTENIMIENTO DE MATERIAL RODANTE FERROVIARIO

	D-MANT	GIM	MAXIMO	Max & Maint	micro-MANT	MP2 para Windows	P-MANT	PRIMA II	ROSMIMAN	WinMaint
Aplicación del TMR	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Gestión gráfica y documental	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Códigos de barras	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Correo electrónico	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Terminales móviles	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Escáner	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
<b>FUNCIONES DE LA ADMINISTRACIÓN DEL SISTEMA</b>										
Seguridad respecto a la acceso al sistema	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Seguridad respecto a la utilización del sistema	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Borrado de información del disco duro	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Copias de seguridad	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

	D-MANT	GIM	MAXIMO	Max & Maint	micro-MANT	MP2 para Windows	P-MANT	PRIMA II	ROSMIMAN	WinMaint	
EMPRESA	DISC informática	TCMAN	PSDI	SIM	NORMATEC	GHESA	PRAUTINSA	SISTEPLANT	Ingeniería de Aplicaciones	EUSTEN	
C P U	Servidor	PC 486 a 66 Mhz, 8 MB de RAM	PC 486 a 66 Mhz, 8 MB de RAM	Pentium a 300 Mhz, 128 MB RAM	Pentium II a 200 Mhz, 64 MB de RAM	Pentium a 133 Mhz, 16 MB de RAM	Pentium a 200 Mhz, 64 MB de RAM	PC 486 a 40 Mhz, 8 MB de RAM	Pentium II a 233 Mhz, 64 MB de RAM	Pentium a 166 Mhz, 64 MB de RAM	Pentium a 133 Mhz, 16 MB de RAM
	Puesto	PC 486 a 66 Mhz, 8 MB de RAM	PC 486 a 66 Mhz, 8 MB de RAM	Pentium a 200 Mhz, 64 MB de RAM	Pentium a 166 Mhz, 32 MB de RAM	Pentium a 133 Mhz, 16 MB de RAM	Pentium a 133 Mhz, 32 MB de RAM	PC 486 a 40 Mhz, 8 MB de RAM	Pentium a 166 Mhz, 32 MB de RAM	PC 486 a 66 Mhz, 16 MB de RAM	Pentium a 133 Mhz, 16 MB de RAM
SISTEMA OPERATIVO	Windows 95 / 98 / NT	Windows 3.xx / 95 / 98 / NT, Novell, LAN Manager, LANtastic, WFW 3.11	Windows 95 / 98 / NT, Novell, UNIX	Windows 95 / 98 / NT	Windows 3.11 / 95 / 98	Windows 3.11 / 95 / 98 / NT	Windows 3.11 / 95 / 98 / NT	Windows 95 / 98 / NT, Novell, UNIX	Windows 3.11 / 95 / 98 / NT, Novell, UNIX, OS/2, Windows Trabajo en grupo	Windows 95 / 98 / NT, Novell LAN Manager, LAN Server, Banyan Vines, LANtastic, UNIX, Windows Trabajo en grupo	
BASE DATOS	dBASE	dBASE, MDB, ORACLE, Informix, SyBase, SQL Server	ORACLE, SQL Base, SyBase, SQL Server	ORACLE, Informix, SyBase, SQL Base, SQL Server	Paradox	ORACLE, Access, SQL Server	Access	ORACLE, SQL Base, SQL Server	ORACLE, SQL Base, SQL Server	FoxPro	

<b>EQUIPOS E INSTALACIONES</b>										
Estructura Jerarquizada	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Información de carácter económico	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Control de garantías	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Control de útiles para el mantenimiento	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Control de repuestos	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

<b>ÓRDENES DE TRABAJO</b>										
Planificación	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Presupuestos	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Medidas de seguridad	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

<b>MANTENIMIENTO PREVENTIVO</b>										
Programación de tareas	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Games de preventivo asociadas a una principal	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Estudio de la rentabilidad de la acción preventiva	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Tratamiento de riesgos de fallo	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Lanzamiento de OT's en función del porcentaje de MTBF transcurrido	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

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

	D-MANT	GIM	MAXIMO	Max & Maint	micro-MANT	MP2 para Windows	P-MANT	PRIMA II	ROSMIMAN	WinMaint
<b>MANTENIMIENTO CORRECTIVO</b>										
Generación de OT's correctivas	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Diagnóstico de averías		*	*	*		*	*	*	*	*
Codificación de síntomas/causas/solución	*		*	*		*		*	*	*
<b>MANTENIMIENTO PREDICTIVO</b>										
Introducción manual de valores de variables			*	*		*		*	*	*
Monitorización			*	*		*		*	*	*
Análisis de las lecturas			*	*		*		*	*	*
<b>INVENTARIO</b>										
Información sobre cada artículo	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Funciones de control de inventario especializadas	*		*	*		*		*	*	*
Asistencia en el ajuste del inventario	*	*	*	*	*	*		*	*	*
Impresión de etiquetas para cada artículo			*	*		*		*	*	*
Reserva de existencias para OT's		*	*	*		*		*	*	*
<b>COMPRAS</b>										
Información sobre proveedores	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Control de artículos con stock por debajo del requerido	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Gestión del albaranes	*	*	*	*		*		*	*	*
Peticiones de precios a los proveedores			*	*		*		*	*	*
Envío de órdenes de compra por fax		*	*	*		*		*	*	*
Gestión a través de Internet		*	*	*		*		*	*	*
Tipos de cambio			*	*		*		*	*	*
<b>MANO DE OBRA</b>										
Control de personal	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Tratamiento de contratos		*	*	*		*		*	*	*
<b>ANÁLISIS</b>										
Informes	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Gráficos		*	*	*	*	*	*	*	*	*
Indicadores		*	*	*	*	*	*	*	*	*
Funciones de auditoría			*	*		*		*	*	*
<b>OTRAS FUNCIONES</b>										

Figura A.37 - Comparativa de softwares de gestión de mantenimiento

- Conclusiones GMAO.

En el apartado anterior se ha presentado el estudio de comparación de todos los softwares de mantenimiento y en este apartado se va a deducir y analizar las siguientes frases:

- El 70% de los paquetes contienen una información completa de los equipos e instalaciones.
- La generación de órdenes de trabajo, planificación y medida de costes, es completa en un 95% de los casos.
- El mantenimiento preventivo se gestiona en un 60% de los paquetes.
- El mantenimiento correctivo se gestiona en un 90% de los paquetes.
- Solo se tiene en cuenta en un 50% de los paquetes el mantenimiento predictivo.
- El 80% de los paquetes tienen un control completo sobre el inventario y las compras.

- La gestión de la mano de obra es contemplada por un 85% de los paquetes.
- El análisis y control de las funciones realizadas para gestionar el mantenimiento se realizará en un 85% de los softwares.

La expansión de la información de la importancia del mantenimiento ha sido incrementada en gran importancia en los últimos tiempos, y se denota una considerable falta de orientación y preparación de los usuarios, previos a la implantación de los programas GMAO. Esto significa que desde el punto de vista de la organización y gestión es necesario optimizar el mantenimiento mediante programas GMAO, tanto de compra de programa estándar como de creación propia.

Es importante señalar que será necesario un mayor desarrollo de informes de gestión, como consecuencia de las cada vez mayores exigencias de la dirección hacia el enfoque económico de la función de mantenimiento. Estos informes serán un elemento clave para viabilizar todo el círculo de gestión de activos y su integración.

## **ANEXO B: INGENIERÍA DE LA FIABILIDAD**

---

La fiabilidad es una parte primordial en el desarrollo de este PFC, y para una mejor comprensión, en este anexo se pretende exponer, de una manera sencilla, todo lo que conlleva este concepto.

Al final de este documento, se expondrán una serie de software existente para el cálculo de la fiabilidad, con los cuales se ha trabajado y que pueden resultar de gran utilidad al lector.

- Definiciones previas

En este primer apartado se van a dar una serie de definiciones básicas, para poder entender mejor los apartados siguientes.

- Causa de fallo: las circunstancias que, durante el diseño, la fabricación o la utilización han llevado a un fallo.
- Criticidad del fallo: combinación de la severidad de un efecto y la frecuencia de su ocurrencia u otros atributos de un fallo como una medida de la necesidad de tratarlo y atenuarlo.
- Disponibilidad: la capacidad que tiene un producto de hallarse en situación de realizar una función requerida en condiciones determinadas en un momento dado o durante un intervalo de tiempo señalado, suponiendo que se faciliten los recursos externos requeridos.
- Elemento: cualquier parte, componente, dispositivo, subsistema, unidad funcional, equipo o sistema que pueda considerarse individualmente.
- Fallo: finalización de la capacidad de un elemento para realizar una función requerida.
- Fiabilidad: la probabilidad de que un elemento pueda realizar una función requerida en condiciones determinadas durante un intervalo de tiempo determinado.
- Mantenibilidad: la probabilidad de que una acción dada de mantenimiento activo, correspondiente a un elemento en unas condiciones de utilización dadas, pueda ser llevada a cabo en un intervalo establecido de tiempo cuando el mantenimiento se realiza en condiciones establecidas y se utilizan procedimientos y recursos establecidos.
- Modo de defecto: uno de los posibles estados de un producto defectuoso para una determinada función requerida.
- Modo de fallo: los resultados predichos u observados de una causa de un fallo en un elemento especificado con relación a las condiciones de funcionamiento en el momento del fallo.

MODELO DE ANÁLISIS DE PLANES DE MANTENIMIENTO DE MATERIAL RODANTE FERROVIARIO

- **RAMS**: siglas que significan una combinación de Fiabilidad, Disponibilidad, Mantenibilidad y Seguridad. Se muestra una imagen, según la norma UNE EN 50126, de lo que representa la RAMS ferroviaria.

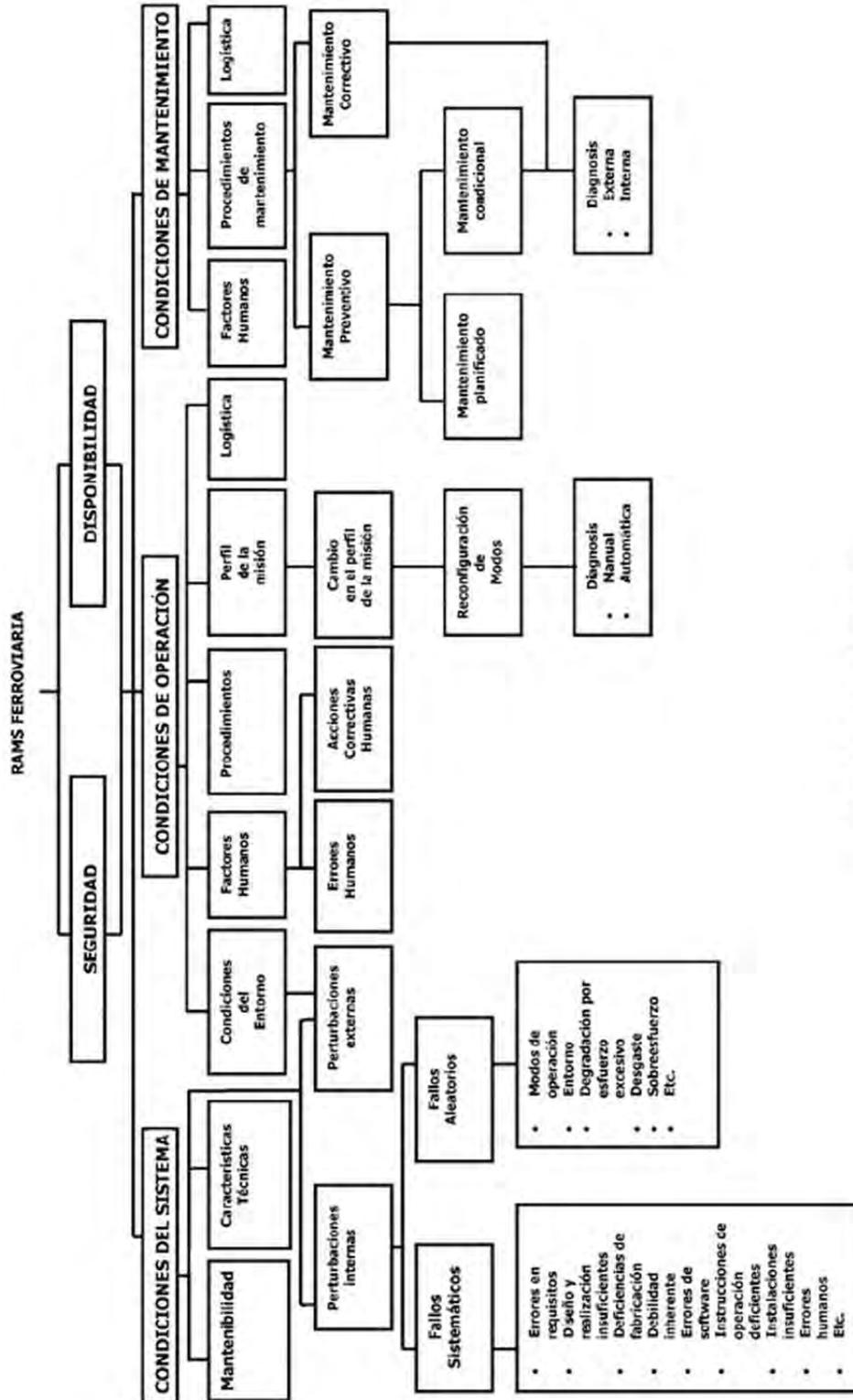


Figura B.1 - RAMS Ferroviaria

- Riesgo: la tasa probable de ocurrencia de un peligro que ocasione daño, y el grado de severidad de dicho daño.
- Seguridad: ausencia de riesgo inaceptable de daño.
- Tasa de fallo: el límite, si es que existe, de la fracción de la probabilidad condicional de que en un instante de tiempo, T, el fallo de un producto, suceda dentro de un determinado intervalo de tiempo (t, t+Δ) y de la duración de ese intervalo, Δt, cuando Δt tiende a cero, supuesto que el elemento se halle en estado de funcionamiento al principio del intervalo de tiempo

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}$$

- Distribuciones de la densidad de probabilidad de fallo

Antes de exponer brevemente cómo es cada uno de los principales tipos de distribuciones de la densidad de probabilidad de fallo, se va a recordar la expresión general de la fiabilidad, así como la explicación de sus componentes:

$$R(t) = e^{(-\int_0^t \lambda(x) dx)} = \int_t^{\infty} f(x) dx$$

Donde

- $\lambda(x)$  es la intensidad instantánea de fallo del elemento.
- $f(x)$  es la función de densidad de probabilidad del tiempo hasta el fallo del elemento, es decir,  $f(x)\Delta x$  es aproximadamente la probabilidad de que el fallo del elemento ocurra durante  $(x, x + \Delta x)$ .

La probabilidad de que el elemento falle en el intervalo de tiempo dado  $(t_1, t_2)$ ,  $0 \leq t_1 \leq t_2$  está dada por:

$$R(t_1) - R(t_2) = \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt$$

Para finalizar, la probabilidad condicional,  $R(t, t+x|t)$ , que se define como la probabilidad condicional de que el elemento pueda realizar la función solicitada para un intervalo de tiempo dado  $(t, t+x)$ , suponiendo que el elemento esté en un estado de disponibilidad al comienzo del intervalo de tiempo, tiene la expresión:

$$R(t, t+x|t) = e^{(-\int_t^{t+x} \lambda(t) dt)} = \frac{R(t+x)}{R(t)}$$

Una vez que se ha recordado las diferentes expresiones de la fiabilidad, se van a exponer las diferentes distribuciones:

○ Distribución Exponencial

Esta distribución, se puede catalogar como sencilla a la vez que funcional, ya que simplifica los cálculos pero a la vez da valores muy precisos. Es la distribución que se puede utilizar para casi todo tipo de componentes, lo que la convierte en la función más utilizada por los diferentes autores.

Su principal característica es considerar una tasa instantánea de fallo,  $\lambda(t)$ , constante a lo largo del tiempo. Tal y como se expone en la memoria, esta suposición sale de la “curva de la bañera”.

Con esta suposición, la expresión de  $f(t)$  queda:

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

Los resultados se pueden representar en la siguiente gráfica:

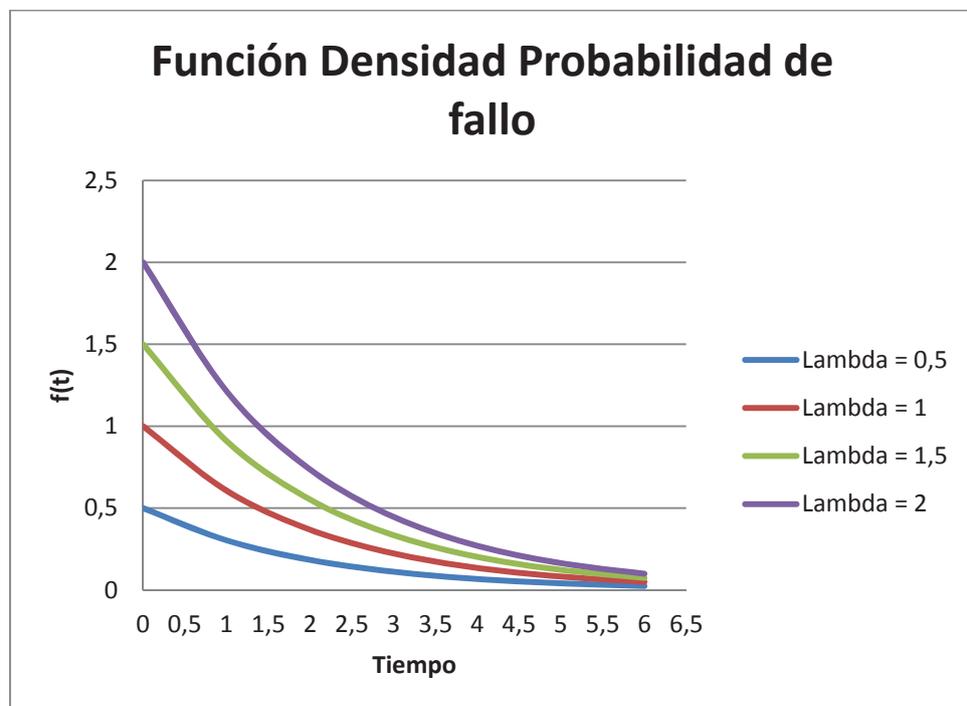


Figura B.2 – Función Densidad de Probabilidad (Exponencial) Vs Tiempo

○ Distribución Weibull

Esta distribución es otra de las más utilizadas, si bien es cierto que resulta de mayor dificultad de cálculo, así como de la necesidad de mayor número de datos para obtenerla. Se muestra a continuación las expresiones de la función de distribución de la densidad de probabilidad de fallo y de la tasa instantánea de fallos, según Weibull:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - t_0}{\eta} \right)^{\beta - 1} e^{-\left( \frac{t - t_0}{\eta} \right)^\beta}$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - t_0}{\eta} \right)^{\beta-1}$$

Donde:

- $t_0$  es el parámetro de posición (unidad de tiempos) 0 vida mínima y define el punto de partida u origen de la distribución.
- $\eta$  es el parámetro de escala, extensión de la distribución a lo largo del eje de tiempos.
- $\beta$  es el parámetro de forma y representa la pendiente de la recta describiendo el grado de variación de la tasa de fallos.

Las constantes anteriores, tal y como se puede apreciar, tienen una interpretación física. Las expresiones anteriores son válidas si  $(t - t_0)$  es mayor o igual que 0.

A continuación, se mostrará gráficamente la distribución de la densidad de probabilidad de fallo (FDP) en función de la variación de cada uno de esos parámetros:

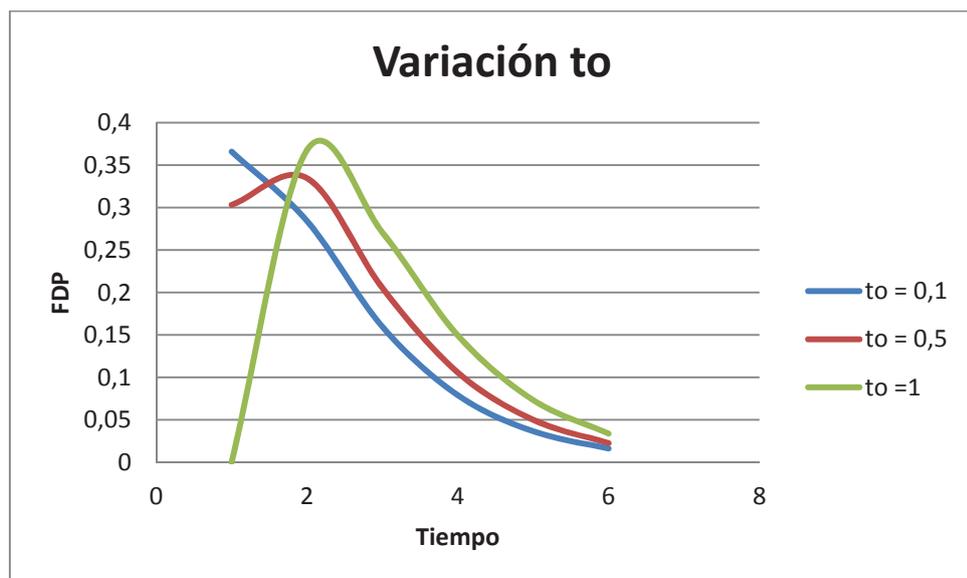


Figura B.3 – Variación FDP (Weibull)  $f(t_0)$  Vs Tiempo

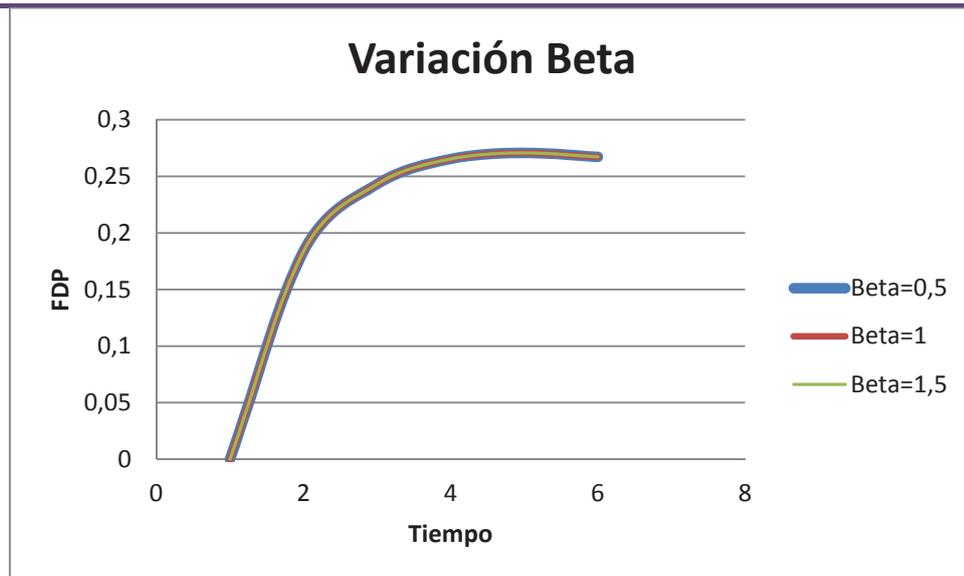


Figura B.4 - Variación FDP (Weibull)  $f(\beta)$  Vs Tiempo

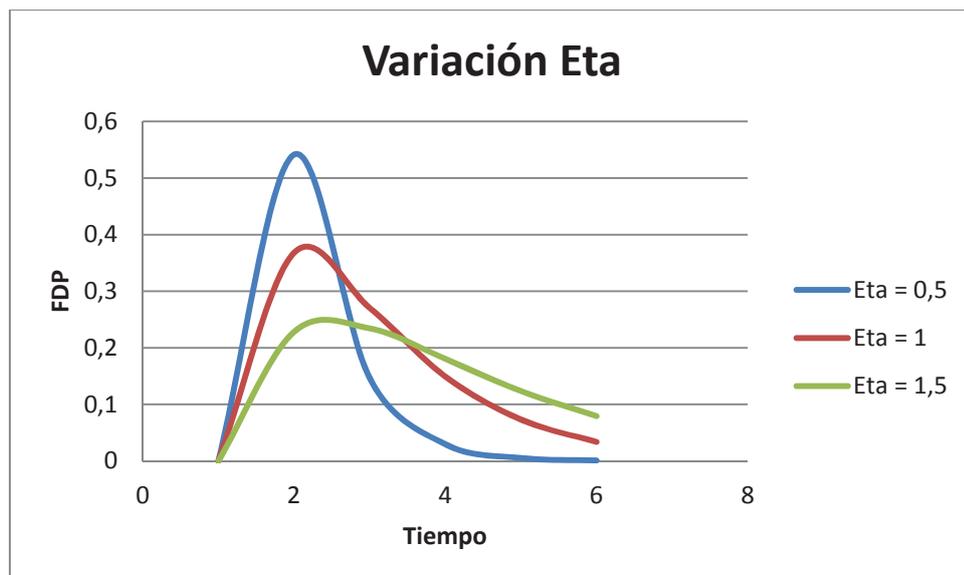


Figura B.5 - Variación FDP (Weibull)  $f(\eta)$  Vs Tiempo

Como se puede apreciar, la variación del parámetro de forma no implica una variación en la FDP.

Si se quiere conocer más sobre esta distribución, se recomienda la lectura de la norma "IEC 61649 Weibull Distribution".

- Distribución Normal

La distribución normal, también conocida como distribución de Gauss, es otra de las posibles distribuciones de densidad de fallo que se pueden encontrar. Su expresión viene determinada por:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2}$$

Siendo:

- $\sigma$  la desviación estándar
- $\mu$  la media

Esta distribución resulta una de las más conocidas, por su amplia aplicación en la modelación de fenómenos naturales, sociales y psicológicos.

Para el estudio de los fallos, siempre se considerarán los valores positivos obviamente.

En la siguiente figura, se muestra una gráfica con este tipo de distribución.

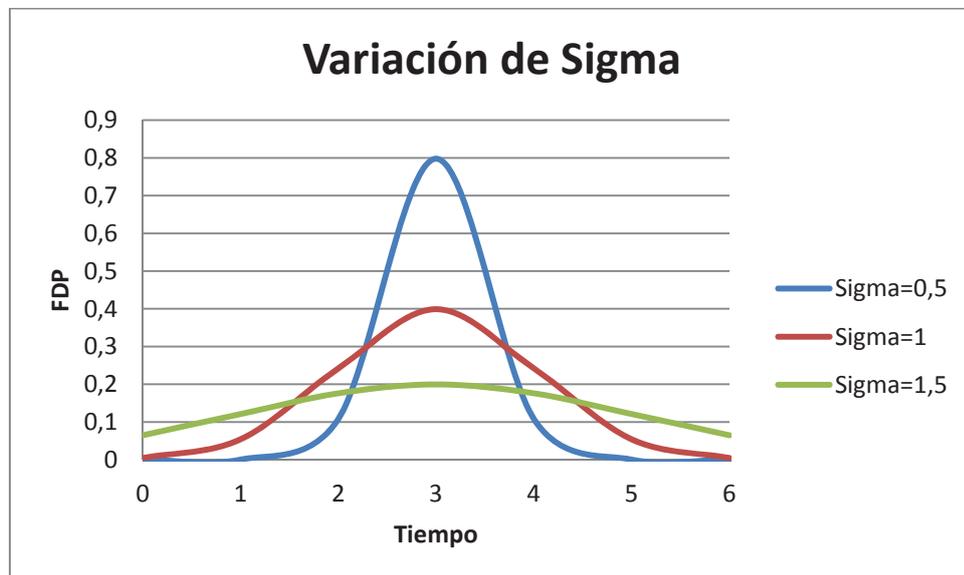


Figura B.6 - Variación FDP (Normal)  $f(\sigma)$  Vs Tiempo

La variación de  $\mu$  conlleva un desplazamiento hacia la derecha o izquierda de la curva.

- Distribución Log-Normal

La distribución Log-Normal está empezando a utilizarse en los últimos años para determinar la tasa de fallo de ciertos componentes electrónicos. La distribución de la probabilidad de densidad de fallo puede expresarse como:

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x \cdot \sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}}$$

Siendo, igual que en el caso anterior:

- $\mu$  la media

- $\sigma$  la desviación estándar
- Distribución Binomial

Es una distribución de probabilidad discreta que mide el número de éxitos en una secuencia de  $n$  ensayos de Bernoulli independientes entre sí, con una probabilidad fija  $p$  de ocurrencia del éxito entre los ensayos. Apenas se han encontrado casos de esta probabilidad, pero aun así se considera necesaria su explicación.

Su expresión es:

$$f(x) = \binom{n}{x} \cdot p^x \cdot (1 - p)^{n-x}$$

Donde:

- $x = \{0,1,2,\dots,n\}$
- $p$  es la probabilidad de ocurrencia

Si representamos está función gráficamente, con  $n=35$ , se obtiene:

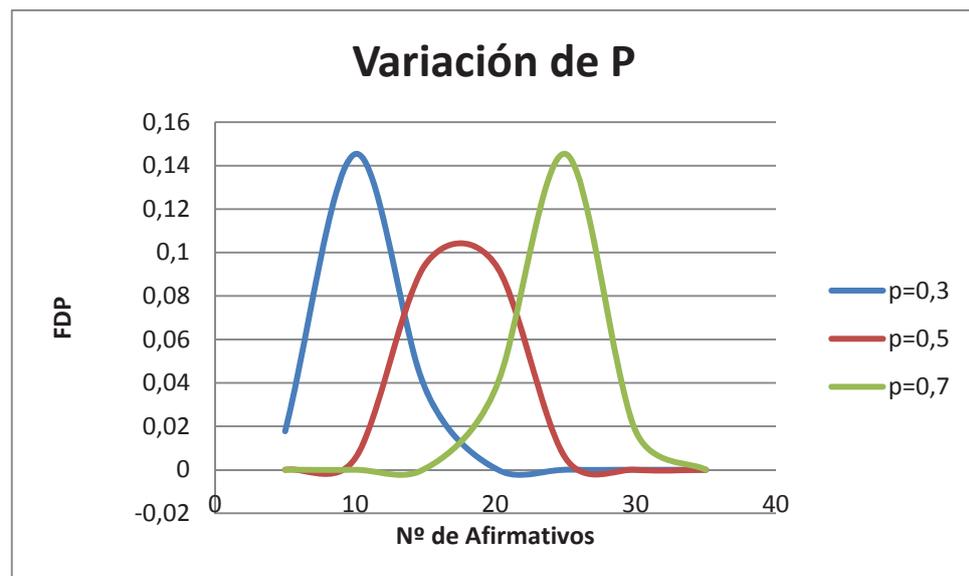


Figura B.7 - Variación FDP (Binomial)  $f(p)$  Vs  $n$

- Distribución de Poisson

La distribución de Poisson es una distribución de probabilidad discreta que expresa, a partir de una frecuencia de ocurrencia media, la probabilidad que ocurra un determinado número de eventos durante cierto periodo de tiempo.

Esta también es utilizada en componentes electrónicos.

Su expresión es la siguiente:

$$f(k; \lambda) = \frac{e^{-\lambda} \cdot \lambda^k}{k!}$$

Donde

- k es el número de ocurrencias del evento o fenómeno (la función nos da la probabilidad de que el evento suceda precisamente k veces).
- λ es un parámetro positivo que representa el número de veces que se espera que ocurra el fenómeno durante un intervalo dado. Por ejemplo, si el suceso estudiado tiene lugar en promedio 4 veces por minuto y estamos interesados en la probabilidad de que ocurra k veces dentro de un intervalo de 10 minutos, usaremos un modelo de distribución de Poisson con  $\lambda = 10 \times 4 = 40$ .

Tras esta breve explicación, se puede mostrar como es su variación en la siguiente gráfica:

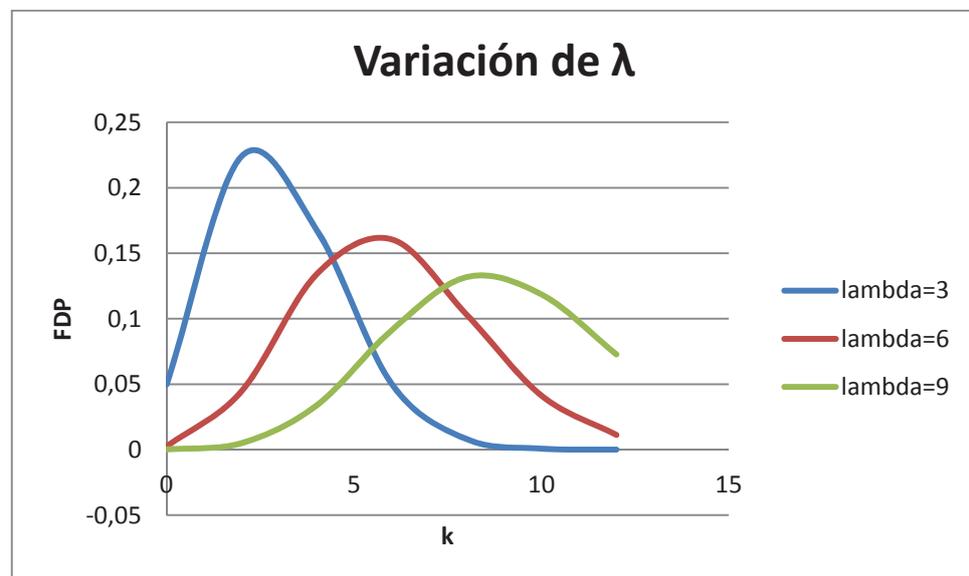


Figura B.8 - Variación FDP (Poisson) f(λ) Vs k

Tras esta breve explicación de cada una de ellas, es importante mencionar que las más utilizadas son Weibull y la exponencial. Durante el desarrollo del presente PFC se ha optado por la distribución exponencial, por su sencillez de cálculo y validez para la mayoría de componentes, tal y como está explicado durante el desarrollo de la memoria. Además, dadas las formas de las expresiones de la distribución de Weibull y de la distribución exponencial, se puede decir que la exponencial es una simplificación de la primera.

- Análisis de los fallos.

La definición de fallo, expuesta anteriormente, lleva a definir diferentes tipologías de fallo y cómo se puede analizar para uno de estos fallos, para así saber cuáles pueden ser sus consecuencias y hasta qué punto se está dispuesto a asumir el riesgo de lo que conlleva.

Los fallos, los podemos considerar, a modo general, en tres fases temporales:

- JUVENTUD: fallos precoces.
  - Puesta en servicio
  - Periodo de rodaje.
  - Preselección de componentes.
- MADUREZ: Periodo de vida útil y fallos aleatorios.
  - Periodo de rendimiento óptimo del material.
  - Tasa de fallo constante.
  - Los fallos aparecen sin degradaciones previas visibles.
- OBSOLESCENCIA: Vejez, desgaste.
  - Una forma de fallo predominante da lugar a una degradación acelerada.
  - A cierto nivel de fiabilidad, el material está “muerto”. Entonces es descalificado o desechado.

En la siguiente imagen, según la norma IEC 60300-3-11, se puede observar las diferentes tipologías de comportamiento de los equipos en función del tiempo.

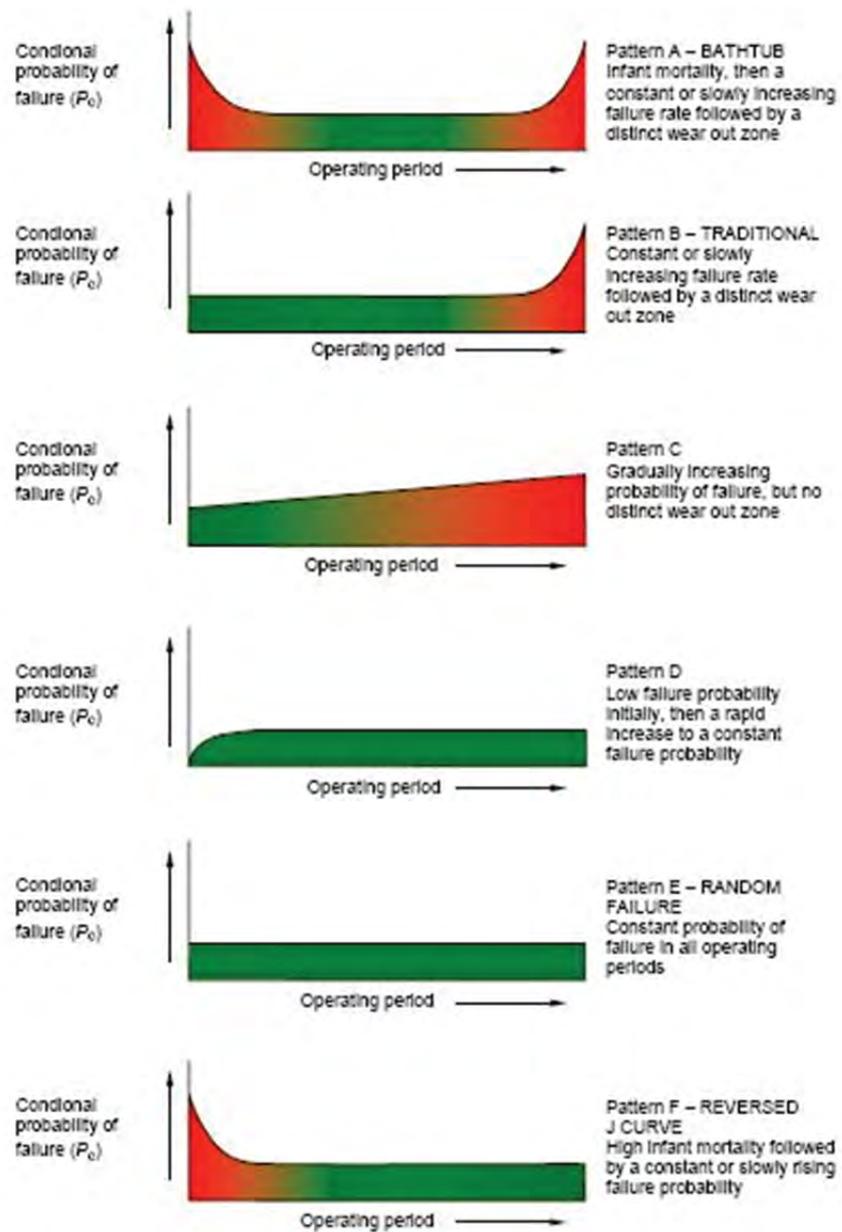


Figura B.9 – Comportamiento de los fallos en función del tiempo

En función de la velocidad de aparición del fallo podemos diferenciar entre dos tipos de fallos:

- De degradación o progresivo, son los que de alguna manera u otra hacen prever su aparición. Figura inferior: ejemplo de fallo progresivo.

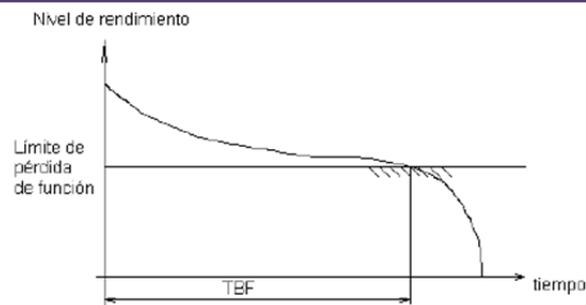


Figura B.10 – Fallo por degradación

- Cataléctico o repentino, son los que corresponden a una función aleatoria y suelen depender de que coincidan con una serie de factores difíciles de predecir. Figura inferior: ejemplo de fallo repentino.

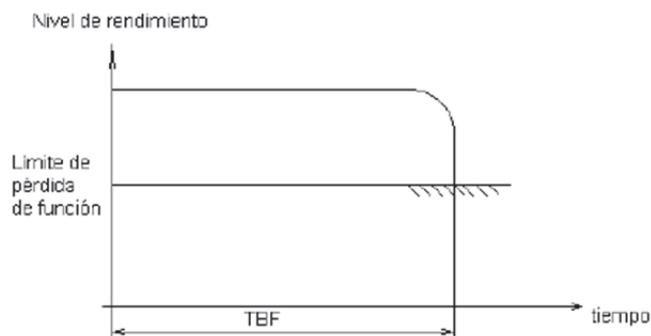


Figura B.11 – Fallo repentino

El fallo sufre un proceso evolutivo; cada forma de fallo degrada un órgano de una forma específica, sin embargo es frecuente que varias formas encadenen según el siguiente esquema:

INICIACIÓN---→PROPAGACIÓN---→RUPTURA (Evolución rápida final)

- Iniciación: a menudo se presenta como un defecto de “salud-material”, un defecto de concepción, de fabricación y/o una causa de extrínseca (golpe, sobrecarga...).
- Propagación: Se produce a menudo por formas de fallo de funcionamiento (fatiga, desgaste...).
- Pérdida de buen funcionamiento: Generalmente aparece de forma acelerada como consecuencia de propagación en el tiempo, o de manera repentina.

Otra clasificación de los fallos puede ser en función del origen de la avería:

1. Mal diseño o errores de cálculo del equipo, generalmente por: no conocer exactamente las condiciones en que trabajará. (Se le atribuirán del orden del 12% de los fallos).

2. Defectos durante la fabricación del equipo: se descuidan los controles de calidad con lo que tiene fallos potenciales que aparecerán. (Representan el 10,45% de los fallos).
3. Mal uso de la instalación, generalmente por desconocimiento de su manejo, por emplearlo en aplicaciones para las que no está diseñado. (Se le atribuyen el 40% de los fallos. Es el más numeroso).
4. Desgaste natural o envejecimiento. (Suponen el 10,45%).
5. Fenómenos naturales y otras causas: meteorológicas y otras causas exteriores al equipo. (Suponen el 27%).

Una vez expuesto lo anterior, se va a analizar los principales métodos de análisis de fallos: Matriz de criticidad, AMFE y AAF. Se analizarán de una forma general, mediante la explicación de sus características más importantes, no sirviendo este documento como guía de aplicación, ya que no es la finalidad del mismo, existiendo para ello normativa aplicable, la cuál está citada en uno de los puntos siguientes de este anexo.

- Matriz de criticidad:

La matriz de criticidad mezcla la frecuencia de aparición de un fallo con las consecuencias que puede presentar su aparición. Es un método para decidir a partir de qué valores se puede aceptar un riesgo.

Para ello hay que categorizar tanto la frecuencia de aparición, como las consecuencias del mismo. Las categorías de severidad de las consecuencias, como las frecuencias de aparición de los fallos, puede definir las la misma empresa o ser condiciones generales del pliego de condiciones de compra de vehículo, equipo o material

Por ejemplo, para la severidad de las consecuencias podría ser:

- Categoría 1: Catastrófica (por ejemplo la muerte de una persona)
- Categoría 2: Mayor (daños físicos graves, pérdida completa del producto...)
- Categoría 3: Normal (daños físicos leves, pérdida temporal de la capacidad de funcionamiento...)
- Categoría 4: Menor (daño físico muy leve, parada parcial de un equipo...)

Un ejemplo para categorizar las frecuencias podría ser:

- Categoría A: Frecuente
- Categoría B: Habitual
- Categoría C: Ocasional
- Categoría D: Rara vez

- Categoría E: Remoto.

No se les ha dado una probabilidad de aparición, ya que eso es algo propio de cada equipo, y se trata de que quede claro y sea general.

Para esta clasificación expuesta anteriormente, la matriz de criticidad queda de la siguiente forma:

Frecuencia	Categoría	Consecuencia			
		Catastrófica	Mayor	Normal	Menor
		1	2	3	4
Frecuente	A	1	1	2	2
Habitual	B	1	2	2	3
Ocasional	C	2	2	3	3
Rara vez	D	2	3	3	3
Remoto	E	3	3	3	3

Tabla B.1 – Matriz de Criticidad

Significando en la matriz:

- 1: No deseable → Intentar eliminarlo
- 2: Aceptable → Intentar minimizarlos
- 3: Menor → Riesgo asumible.

Este sería un ejemplo para la aplicación de este método.

- AMFE (Análisis de los Modos de Fallo y sus Efectos)

Es un procedimiento sistemático de análisis de un sistema para identificar los modos de fallo potenciales, sus causas y sus efectos en el funcionamiento del conjunto al cual pertenece dicho sistema.

Para realizarlo de una forma exitosa se tiene que realizar durante las fases de desarrollo del mismo, para que la eliminación o atenuación de los fallos sea más rentable.

También se puede hablar de AMFEC, Análisis de los Modos de Fallo, Efectos y Criticidad, el cual es una extensión del AMFE al cual se le añade el análisis que produce una matriz de criticidad.

El proceso para la aplicación del AMFE, según la norma UNE EN 60812, será el siguiente:

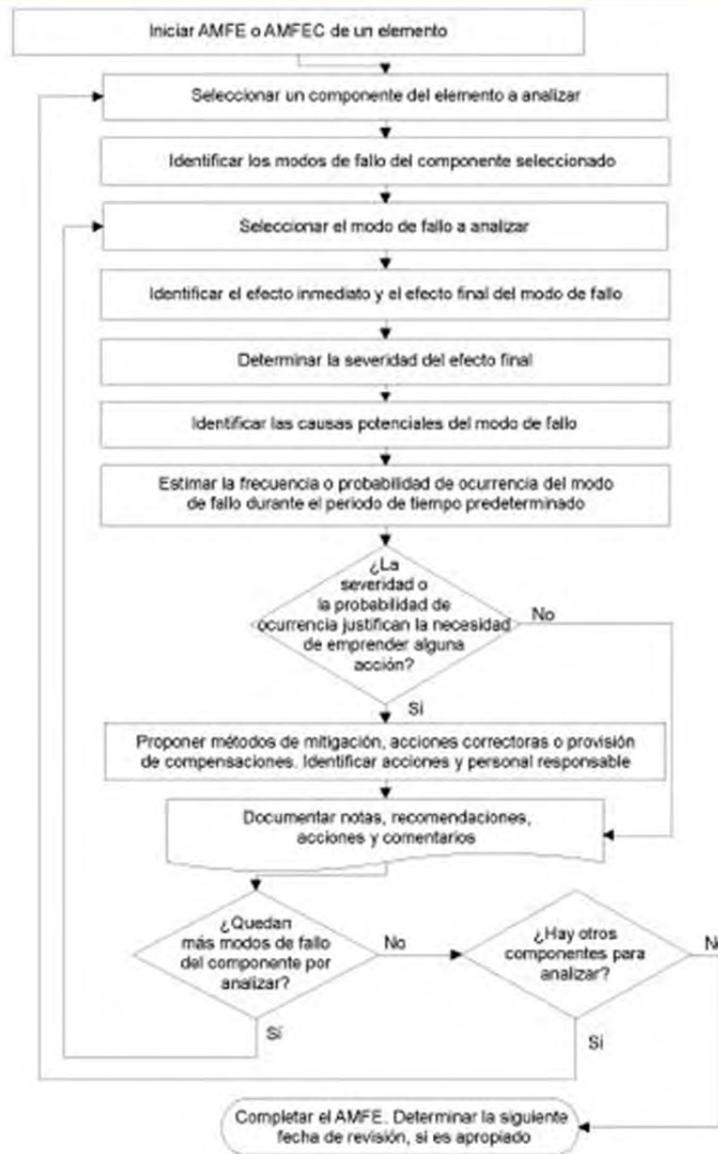


Figura B.12 – Proceso de Creación de un AMFE

Para finalizar, se muestra una hoja tipo de un AMFE.

Elemento	Subelemento	Operación	Modo de fallo	Efectos de fallo	Gravedad del fallo	S: Gravedad del fallo	G: Crítico?	Causas del fallo	D: Probabilidad de que ocurra el fallo	Controles Actuales	D: Probabilidad de no detección de fallo	NPR: Número de Prioridad de Riesgo	Acción Correctora	Responsables	Acciones Implantadas	Valoración			
																S	O	D	NPR

Tabla B.2 – Ejemplo de formato de un AMFE

Siendo:

- S: número no dimensional que simboliza la severidad, es decir, una estimación de la incidencia de los efectos del fallo sobre un sistema o el usuario.
- O: la probabilidad de ocurrencia de un modo de fallo durante un periodo de tiempo predeterminado o establecido, aunque puede definirse también como un rango numérico más que como la probabilidad de ocurrencia real
- D: indica detección, es decir, es una estimación de la posibilidad de identificar y eliminar el fallo antes de que afecte al sistema o al cliente. Este número normalmente se ordena en orden inverso a la severidad u ocurrencia

Se tiene que mencionar que los valores de S, O y D, se dan según criterios del realizador del AMFE, siendo por ejemplo valores del 1 al 10, significando 1 el valor mínimo y 10 el valor máximo.

El NPR, o Número de Prioridad de Riesgo, puede usarse para priorizar el tratamiento de la mitigación de los modos de fallo. Se calcula como:

$$\text{NPR} = S \times O \times D$$

No sólo hay que fijarse en este valor para priorizar, ya que para valores similares de NPR, la criticidad suele utilizar para “desempatar”.

- AAF (Análisis por Árbol de Fallos)

Un árbol de fallo es una representación gráfica organizada de las condiciones y otros factores que originan o contribuyen a la aparición de un resultado en el elemento superior.

Se trata de un método de análisis deductivo (arriba-abajo) dirigido a determinar las causas o combinaciones de causas que pueden conducir a un suceso en un elemento superior definido. El análisis, puede ser cualitativo o cuantitativo.

A continuación, una imagen de lo que es un árbol de fallos, con la explicación de cada uno de sus integrantes:

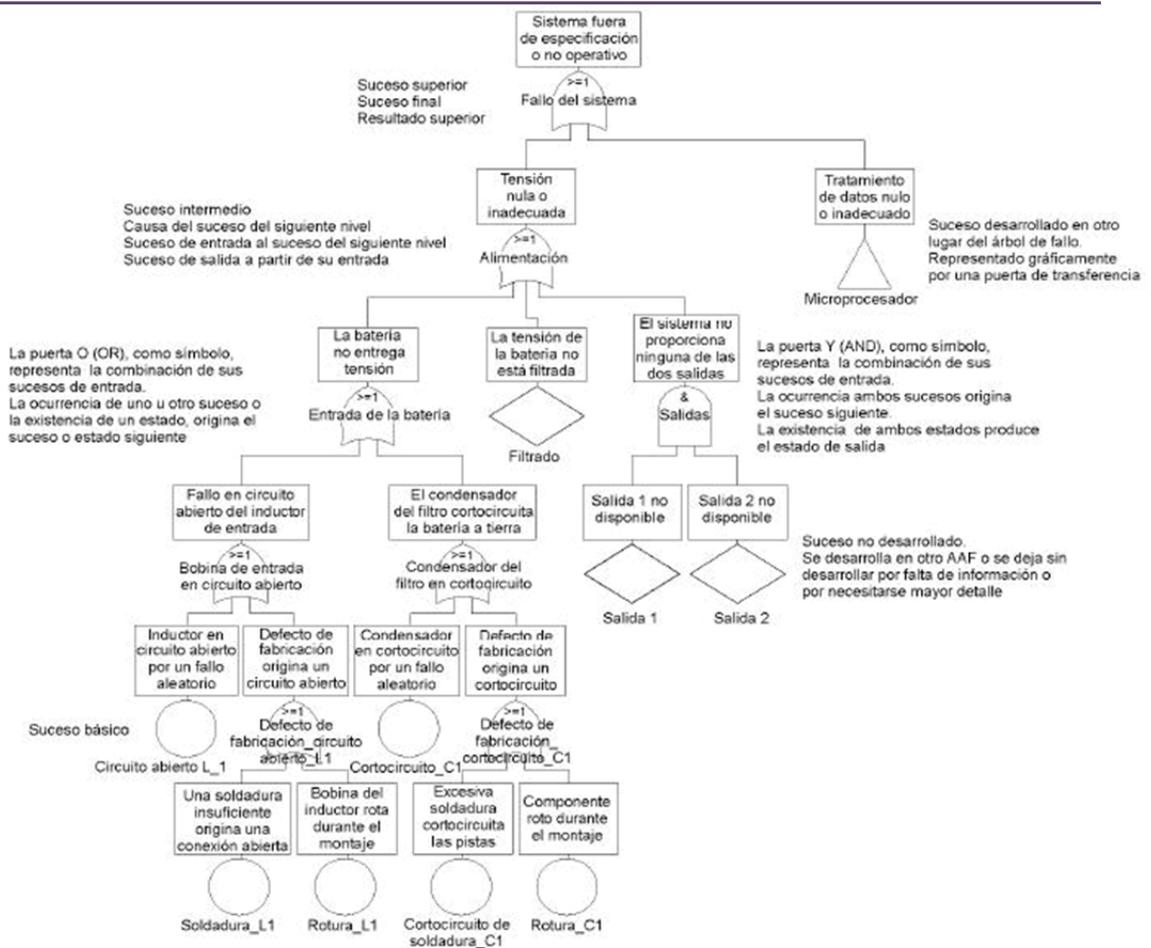


Figura B.13 – Ejemplo de AAF

Existen multitud de símbolos para representar el árbol, como pueden ser puertas Y, puertas O, Indican serie, indican paralelo...

Se va a exponer como sería en paralelo y en serie, pero si se desea conocer más, la norma UNE EN 61025, trata sobre el AAF.

En serie, el árbol queda dibujado según la imagen siguiente:

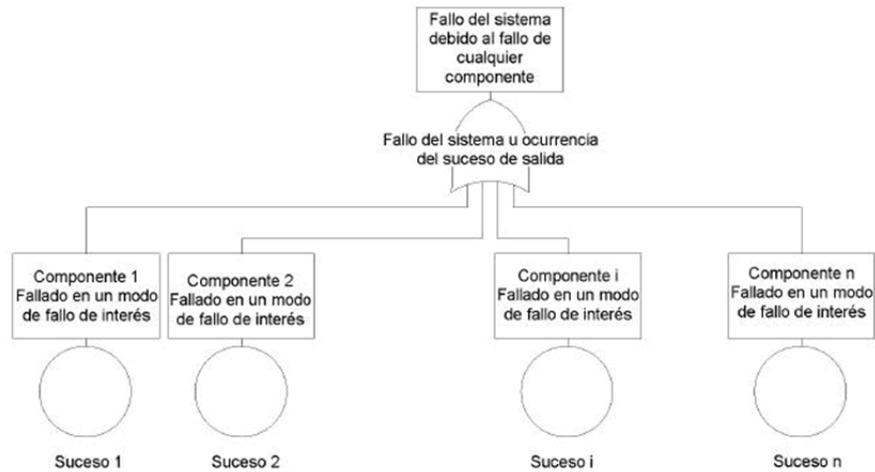


Figura B.14 – Ejemplo de AAF en serie

La probabilidad de resultado desfavorable que se obtiene de este diagrama es:

$$F_S(t) = 1 - [1 - F_1(t)] \cdot [1 - F_2(t)] \cdot \dots \cdot [1 - F_i(t)] \cdot \dots \cdot [1 - F_n(t)]$$

En paralelo, el árbol es como se muestra a continuación:

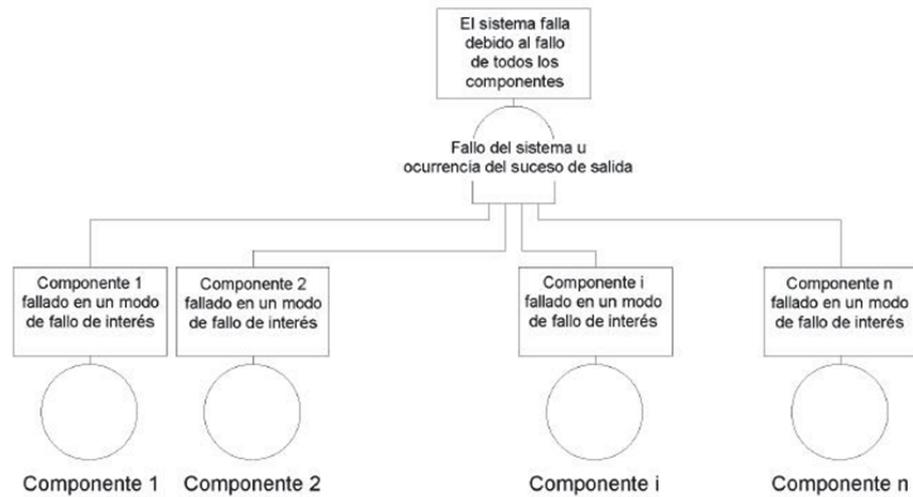


Figura B.15 – Ejemplo de AAF en paralelo

En este caso, la probabilidad de fallo se calculará según la siguiente expresión:

$$F_S(t) = \prod_{i=1}^n [F_i(t)]$$

- Análisis de la fiabilidad

Para seguir con el análisis de la fiabilidad, en este apartado se expone como se calcula la fiabilidad en equipos complejos, mediante la realización de “árboles de fiabilidad” o “diagramas de fiabilidad”. Estos pueden llegar a ser tan complejos como los de la siguiente imagen:

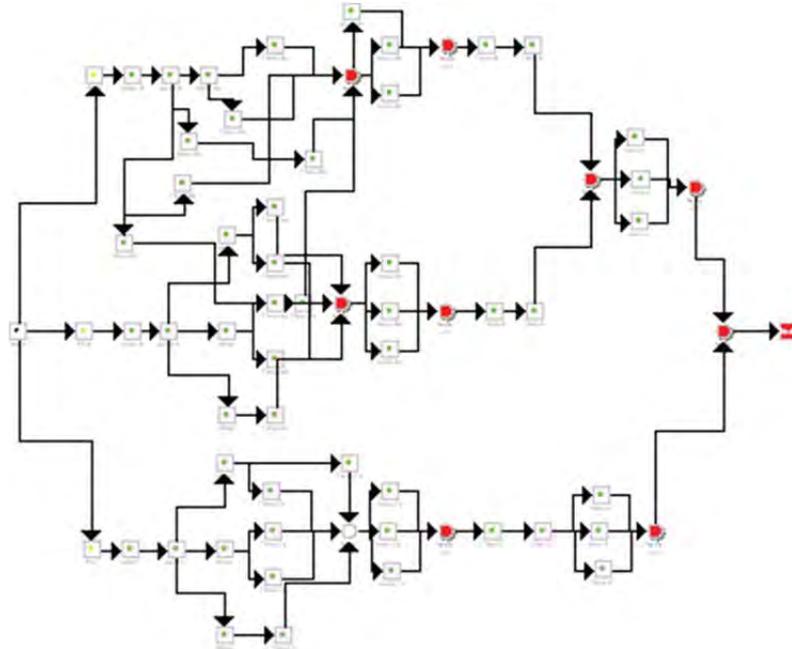


Figura B.16 – Ejemplo de Diagrama de Fiabilidad

Si bien es cierto que para resolver esta clase de diagramas es necesario o recomendable el uso de software para tal fin, se expone a continuación como se combina la fiabilidad en los casos más sencillos, para dejar constancia de cómo se resolvería un árbol completo:

- Serie:

Cuando hay varios elementos en serie, se calcula como el producto de las fiabilidades parciales de cada elemento.

$$R = \prod_{i=A}^n R_i$$

Por ejemplo, si tenemos tres componentes en serie (A, B, C), la fiabilidad total del equipo será:

$$R_T = R_A \cdot R_B \cdot R_C$$

- Paralelo:

En estos casos, existe cierta redundancia, por lo que se calcula de la siguiente forma:

- Para dos componentes en paralelo:

$$R_T = R_A + R_B - R_A \cdot R_B$$

- Para tres componentes en paralelo:

$$R_T = 1 - (1 - R_A) \cdot (1 - R_B) \cdot (1 - R_C)$$

- Para n componentes en paralelo:

$$R_T = 1 - \prod_{i=A}^n (1 - R_i)$$

Para finalizar, se muestra una imagen resumen:

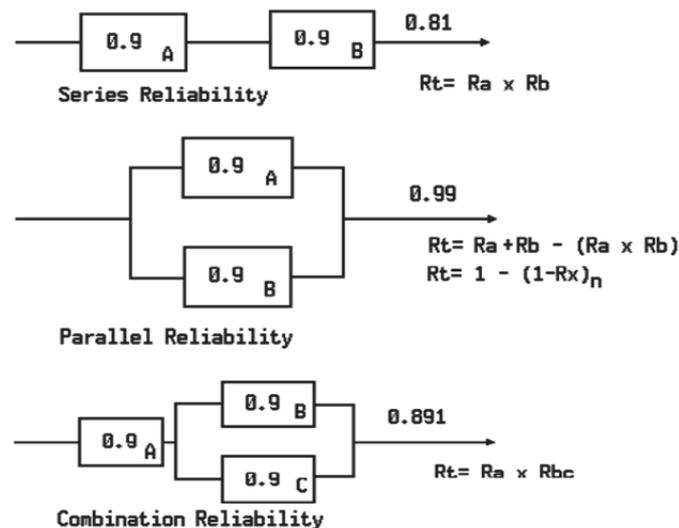


Figura B.17 – Resumen Cálculo por Diagrama de Fiabilidad

- RCM

Sus siglas (RCM) significan “Reliability Centered Maintenance”, es decir, Mantenimiento Centrado en Fiabilidad. La definición, según la norma IEC 60300-3-11, es “método para identificar y seleccionar la política de administración de los fallos de forma efectiva y eficiente para conseguir alcanzar nuestros objetivos de seguridad, de disponibilidad y económicos.”

Los objetivos de este tipo de mantenimiento se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Establecer las tareas de mantenimiento óptimas para cada equipo.
- Identificar las oportunidades de mejorar el diseño.
- Evaluar dónde el mantenimiento es inefectivo, ineficiente o inapropiado.

- Mejorar las relaciones entre los diferentes equipos.
- Minimizar costes

El proceso de implantación de un RCM se puede exponer gracias a la siguiente imagen:

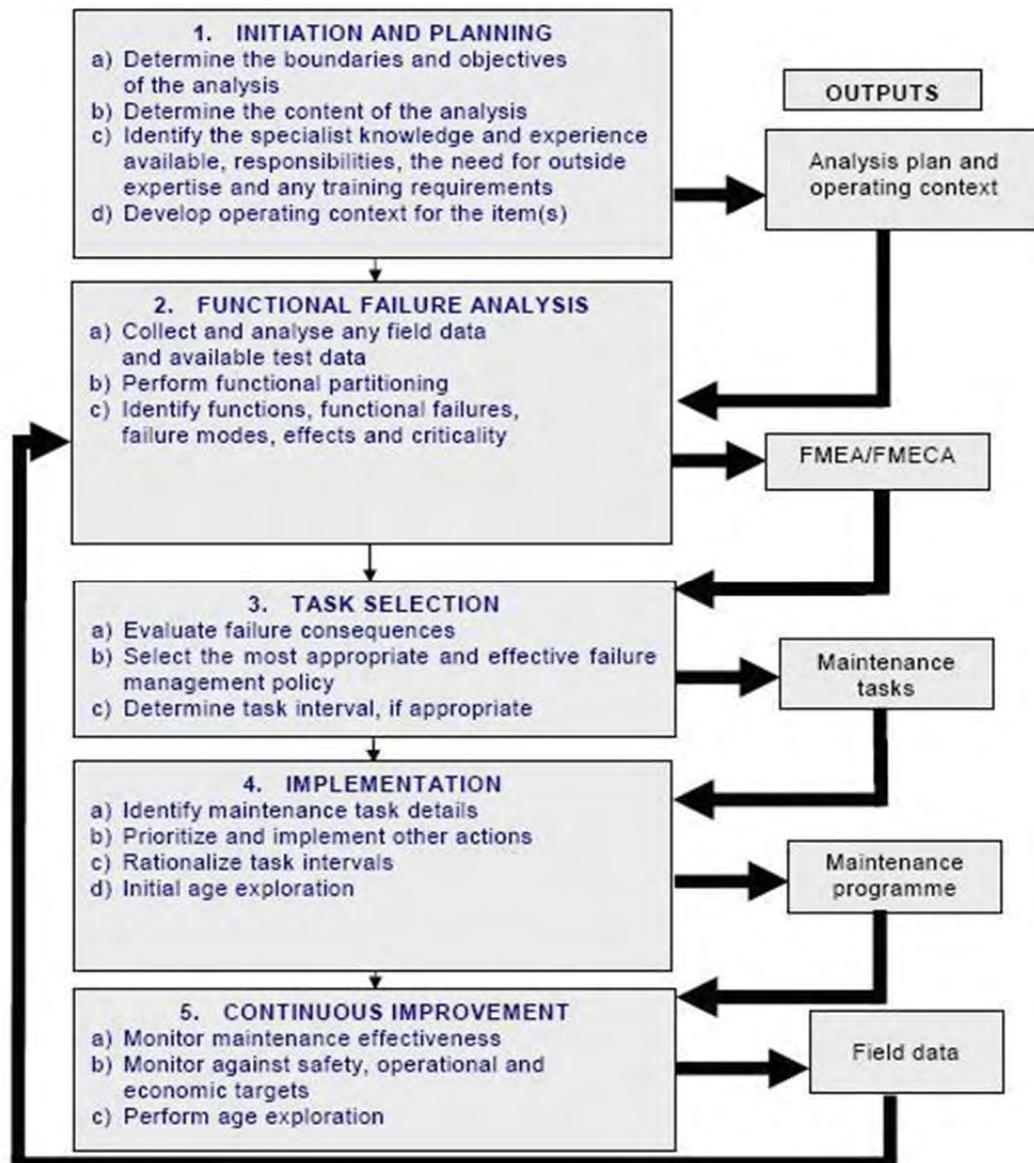


Figura B.18 – Proceso de Implantación de RCM

Como se puede observar en la imagen, se trata de un proceso iterativo y con una realimentación continua, lo que nos lleva a que gracias a la implantación de un RCM, se lleva a cabo un proceso de mejora continua de nuestro plan de mantenimiento, así como de la fiabilidad y la disponibilidad de los equipos que integran el sistema.

La siguiente imagen muestra como se produce ese proceso de mejora continua:

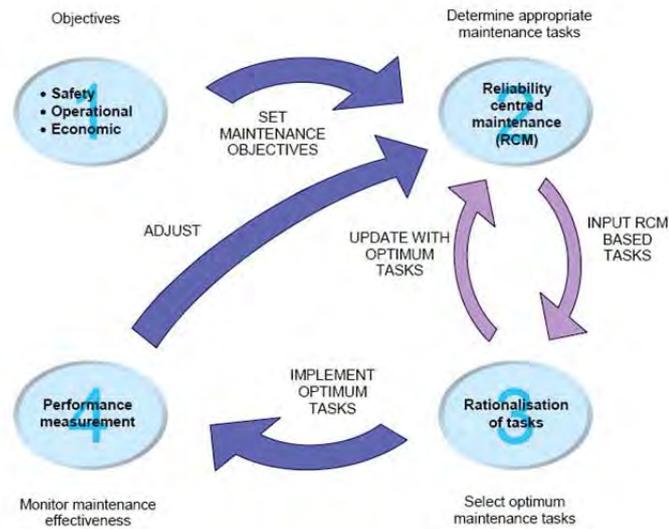


Figura B.19 – Mejora Continua del RCM

Para finalizar, se exponen brevemente cuales son las ventajas de aplicar un RCM:

- Mayor fiabilidad y disponibilidad de los equipos.
- Reducción coste del mantenimiento
- Mayor cumplimiento de normas de seguridad y medio ambiente.
- Mejor relación entre mantenimiento y operación.
- Normativa

En la siguiente tabla, se expone la normativa relacionada con los conceptos descritos anteriormente y que por tanto es de utilidad para la realización de este PFC.

NOMBRE DE LA NORMA	AÑO	DESCRIPCIÓN DE LA NORMA
UNE 20608 – 2	1999	Pruebas de fiabilidad de equipos Parte 2: Diseño de los ciclos de prueba
UNE 20608 – 3 – 5	2002	Pruebas de fiabilidad de equipos Parte 3: Condiciones de ensayo preferente Sección 5: Ciclo de ensayo 5: Equipos móviles terrestres. Bajo grado de simulación
UNE 20608 – 7	1983	Planes de prueba para confirmar la tasa de fallos y el tiempo medio entre fallos, supuesta una tasa de fallos constantes
UNE 20609	1980	Pruebas de fiabilidad para equipos basadas en la distribución exponencial
UNE 20932	1999	Ensayos de fiabilidad. Planes de ensayo de conformidad con una proporción de

		éxitos.
<b>UNE 200001 – 3 – 11</b>	2003	Gestión de la confiabilidad Parte 3-11: Guía de Aplicación Mantenimiento centrado en la fiabilidad
<b>UNE – EN 50126</b>	2006	Aplicaciones ferroviarias Especificación y demostración de la fiabilidad, la disponibilidad, la mantenibilidad y la seguridad (RAMS)
<b>IEC – 60300 – 11</b>	2009	Dependability Management Part 3-11: Application Guide Reliability Centred Maintenance
<b>IEC – 61649</b>	2008	Weibull Analysis

**Tabla B.3 – Normativa de Interés**

- Software actual

Para finalizar este anexo, se van a exponer algunos de los softwares que se han estudiado y analizado sobre la fiabilidad y temas relacionados con este concepto.

- Weibull++

El software Weibull++ es el estándar para análisis de datos de vida utilizado por miles de compañías en todo el mundo. Este software realiza el análisis de datos de vida utilizando más de 13 distribuciones estadísticas, con énfasis para todas las formas de la distribución Weibull.

- Características del Software

El Weibull++ ofrece un conjunto completo de herramientas para el análisis de datos de vida (análisis de confiabilidad), que permite diversos tipos de cálculos, gráficos e informes. El software soporta varias distribuciones incluyendo Weibull, Weibull Mixta, Exponencial, Lognormal, Normal, Gamma Generalizada, Gamma, Loglogistic, Gumbel y Weibull-Bayesian). El software también incluye otras herramientas para análisis relacionados a la confiabilidad, que incluye análisis de datos garantía, análisis de degradación, análisis de datos no paramétricos y análisis de eventos recurrentes.

- Algunas de sus aplicaciones son:

- Analizar la confiabilidad de productos, sistemas y procesos
- Determinar el período ideal de garantía
- Realizar previsiones de presupuesto para piezas de repuesto
- Prever los retornos de garantía (forecast)
- Determinar períodos para mantenimiento preventivo
- Analizar cuantitativamente los riesgos
- Comparar la confiabilidad entre fabricantes y/o proyectos.



Figura B.20 – Logo Weibull ++

○ XFMEA

El software Xfmea de ReliaSoft ayuda en el desarrollo de FMEA y de FMECA facilitando el estudio, la gestión de las informaciones y la confección de los informes para los análisis de FMEA o FMECA. El software tiene configuraciones predefinidas, entre las que se incluyen las principales normas de la industria (tales como AIAG FMEA-3 o FMEA-4, SAE J1739 y MIL-STD-1629A) y también ofrece opciones para extender y personalizar sus análisis e informes de acuerdo con sus necesidades.

▪ Características del Software

Xfmea ofrece herramientas flexibles que ayudarán al usuario a:

- Registrar y gestionar los datos para el análisis de los modos y efectos de falla;
- Encontrar y reutilizar informaciones importantes de FMEAs ya existentes;
- Evaluar el riesgo por medio del NPR o de análisis de criticidad;
- Rastrear y concluir las acciones recomendadas;
- Presentar los datos de la FMEA por medio de informes, investigaciones y gráficos;
- Integrar la FMEA con análisis relacionados (entre los que se incluyen Diagrama de Flujo de Proceso, Planes de Control y Planes de Prueba).
- El software está disponible en dos versiones: La versión Xfmea Standard archiva los datos individuales de Microsoft Access® y está indicada para uso individual o departamentos pequeños. La versión Xfmea Enterprise centraliza los datos en una única base de datos en SQL Server® u Oracle® y está indicada para grandes departamentos y organizaciones.

▪ Algunas de sus aplicaciones prácticas

- Desarrollar DFMEA / PFMEA / SFMEA / MFMEA;
- Dirigir la toma de decisión priorizando los riesgos potenciales de falla en proyectos, procesos y sistemas;

- Crear una biblioteca de palabras clave, tales como "modos de falla", "funciones", "efectos", "causas", etc. Ello contribuirá a futuros esfuerzos en el desarrollo, la prueba y el control del análisis de nuevos proyectos, procesos, equipamientos y sistemas;
- Con la utilización del software es posible localizar y utilizar informaciones de análisis ya existentes o de bibliotecas predefinidas;
- Proceso consistente para organización de las FMEAs, que facilita que otros usuarios colaboren con los análisis;
- Utilizar el apoyo de gráficos, informes, e-mails automáticos y otros recursos para certificarse de que las acciones serán ejecutadas y de que las informaciones pertinentes apoyarán la toma de decisión estratégica.



Figura B.21 – Logo XFMEA

○  $\lambda$  Predict

Cuando los datos de confiabilidad no están disponibles, las normas de predicción de la confiabilidad pueden ayudar a definir y comparar proyectos alternativos, identificar fallas potenciales, factores que influyen en la utilización del sistema y rastrear la mejora de la confiabilidad.

Lambda Predict soporta predicciones de la tasa de falla y el tiempo promedio entre falla (MTBF) basados en las principales normas de predicción de la confiabilidad (MIL-HDBK-217, Bellcore/Telcordia y NSWC).

▪ Características del Software

Lambda Predict tiene cálculos rápidos, y ofrece gráficos e informes que pueden ser personalizados. El Software ofrece un conjunto completo de herramientas de apoyo, entre las que se incluyen el recurso "Reliability Allocation", análisis adicionales y capacidad de transferir datos por medio del recurso "import/export".

▪ Algunas de las aplicaciones posibles son:

Lambda Predict tiene una plataforma detallada para la construcción de sistemas de análisis de acuerdo con las normas de predicción de la confiabilidad publicadas.

- Ofrecer las tasas de falla de componentes eléctricos, electrónicos y mecánicos;
- Estimar la confiabilidad (MTBF) de nuevos proyectos;

- Estimar la tasa de falla en función del ambiente operacional y de las características técnicas (factores Pi);
- Obtenga una indicación inicial de si el proyecto tendrá condiciones de alcanzar los objetivos de confiabilidad e identificar áreas de problemas potenciales aún en las fases iniciales de desarrollo;
- Comparar proyectos alternativos;
- Considerar factores ambientales y otros estreses que puedan generar impacto significativo en la performance del sistema o que incluso puedan estar siendo omitidos.



Figura B.22 – Logo λpredict

### o BlockSim

El software BlockSim provee una plataforma para el análisis de la confiabilidad, mantenimiento y disponibilidad de sistemas, que utiliza el abordaje de diagrama de bloques de confiabilidad (RBD) y análisis de árbol de falla (FTA). El BlockSim también permite simulaciones de sistemas reparables.

#### ▪ Características del Software

El BlockSim ofrece una sofisticada interfaz gráfica que permite la modelación desde sistemas sencillos hasta lo más complejo al utilizar la metodología de Diagrama de Bloques de Confiabilidad (RBDs) y Árbol de Fallas (FTA). El software calcula la confiabilidad del sistema y la asignación óptima de la confiabilidad por medio de cálculos algébricos. El BlockSim también provee un sofisticado simulador de eventos discretos para analizar la confiabilidad, mantenimiento, disponibilidad, capacidad máxima (throughput), costo del ciclo de vida (life cycle cost) y otros análisis relacionados.

#### ▪ Entre sus aplicaciones prácticas destacar:

- Identificar componentes o modos de fallas críticos para aumentar el desempeño de los sistemas a través de mejoras en el proyecto y planes de mantenimiento.
- Reducir riesgos a partir de la identificación de vulnerabilidades en un sistema.
- Realizar la simulación de sistemas para estimar:
  - o Disponibilidad promedio
  - o Tiempo promedio entre fallas
  - o Número de fallas esperadas

- Costos (pieza/mano-de-obra)
- Producción



Figura B.23 – Logo BlockSim

El software citado anteriormente es de un fabricante denominado “Reliasoft”, a continuación se enumerarán otros fabricantes con las posibilidades que ofrecen:

- IsoGraph:

Este fabricante posee diferentes módulos, los cuales se comentan brevemente los más interesantes a continuación:

- Availability Workbench

Este paquete de software incluye herramientas para el cálculo y optimización del mantenimiento, así como unos módulos para predecir la disponibilidad del sistema y estimar el coste del ciclo de vida de un producto o equipo. Además incluye una apartado para realizar AMFE, diagramas de fiabilidad y análisis por árbol de fallos.

- Reliability Workbench incorporating FaultTree+

Este paquete calcula la tasa de fallo y la mantenibilidad, además de poder realizar análisis de AMFE, diagramas de fiabilidad, árboles de fallos y análisis de Markov.

Para el cálculo de la tasa de fallos Telecordia, MIL-HDBK-217, 217 Plus y la norma IEC TR 62380 para equipos electrónicos, mientras que para las partes mecánicas utiliza el NSWC-98/LE1 “Handbook for mechanical parts”.

- Hazop+

Este modulo de software sirve para realizar análisis de seguridad, muy solicitados en los últimos años.

- Item Software:

Es otro fabricante relacionado con software sobre fiabilidad y análisis de riesgos. Sus principales módulos se comentan a continuación:

- Reliability Analysis Software - ITEM ToolKit

Es un software que integra análisis de fiabilidad, mantenibilidad, seguridad y riesgo de los diferentes componentes del sistema. Tiene introducidas una serie de funciones críticas, tasa de fallo... lo que ayuda al análisis de la fiabilidad.



Figura B.24 – Logo Isograph

- ITEM QRAS Software

Es un software para analizar, de una forma cuantitativa, los riesgos de un equipo o sistema. Quantitative Risk Assessment System

- ITEM QT Software

Es un software que complete al primero de los nombrados de este fabricante. Posee la capacidad de utilizar y/o resolver, entre otras cosas,;

- 5 Estándars de predicción de fiabilidad, tanto electrónicos como mecánicos.
- AAF
- Análisis de Markov
- Diagramas de bloques de fiabilidad
- FMECA / FMEDA
- Maintainability



Figura B.25 – Logo Item Software

## **ANEXO C: EL LCC FERROVIARIO**

---

El término LCC viene del inglés “Life Cycle Cost” o en castellano, coste del ciclo de vida, se entiende de un bien, producto o servicio.

La utilidad de este anexo es para la mejor comprensión de lo que significa LCC, así como la realización de una comparativa del diferente software existente, para justificar la necesidad de una nueva herramienta informática para la optimización del mantenimiento.

- Qué es el Ciclo de Vida

El ciclo de vida de un sistema es una secuencia de fases, cada una de las cuales contiene tareas que abarcan la vida completa del sistema, desde su concepto inicial hasta la retirada del servicio y la eliminación.

La figura siguiente muestra las principales tareas del ciclo de vida desde el punto de vista RAMS.

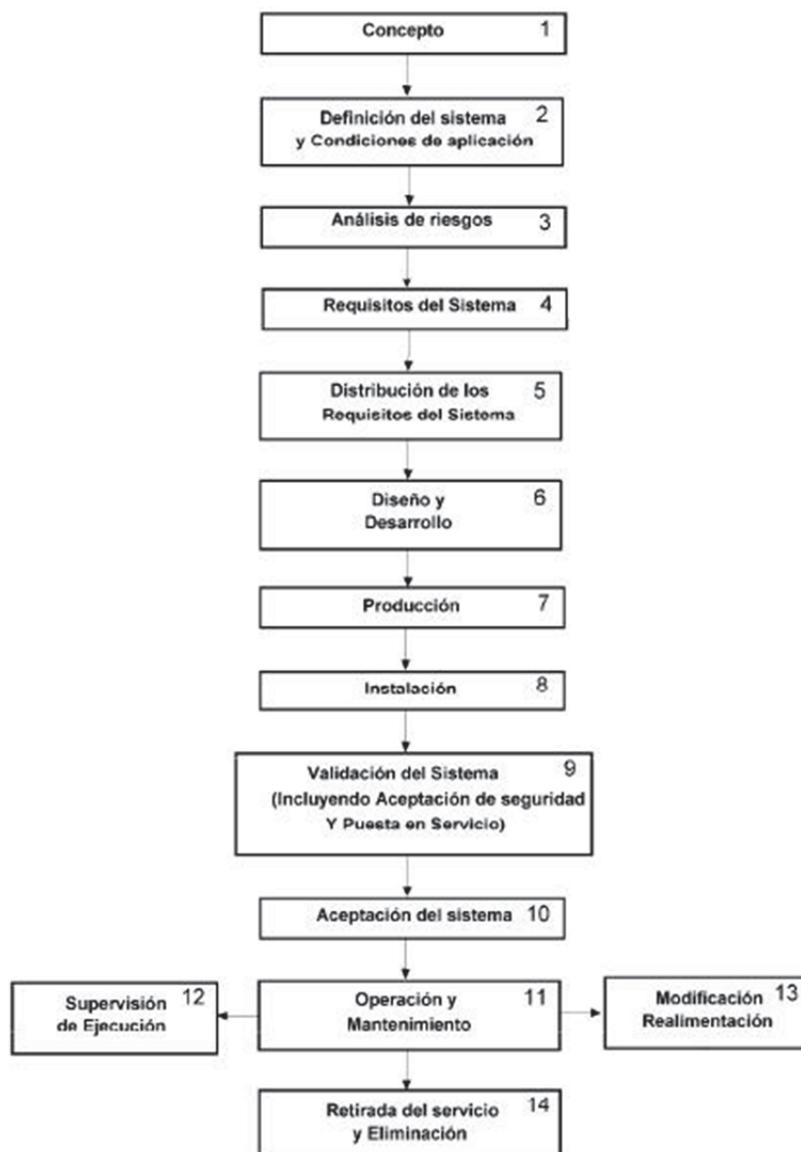


Figura C.1 – Ciclo de vida RAMS

Para un análisis más detallado de cada una de las fases, ver la figura 9 de la norma UNE – EN 50126.

- Qué es el LCC

El LCC o “Life Cycle Cost” es el coste acumulado durante todo el ciclo de vida de un producto, equipo, instalación...

Los objetivos del cálculo del LCC son:

- Proporcionar criterios para la toma de decisiones en cualquiera o en todas las fases del ciclo de vida de un producto.
- Identificación de los costes que tienen mayor influencia
- Identificación de los elementos con costes irrelevantes

A continuación se exponen las decisiones más comunes en las cuales el LCC influye de una forma significativa:

- Evaluación y comparación de enfoques alternativos de diseño y opciones tecnológicas de eliminación.
- 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... del producto
- Evaluación y comparación de los diferentes enfoques para la sustitución, rehabilitación/extensión de vida o retirada de los equipos envejecidos.
- Valoración de los criterios de garantía del producto mediante pruebas de verificación y sus compromisos.
- Planificación de la financiación a largo plazo.

Para que resulte más cómodo el cálculo del LCC, las fases del ciclo de vida se resumen en seis:

- Concepción y definición
- Diseño y desarrollo
- Fabricación
- Instalación
- Operación y mantenimiento
- Eliminación

Generalizando aún más, el LCC se puede calcular:

$$LCC = \text{Coste}_{\text{de adquisición}} + \text{Coste}_{\text{de propiedad}} + \text{Coste}_{\text{de eliminación}}$$

Los costes de adquisición son generalmente evidentes, y pueden evaluarse fácilmente antes de que se tome la decisión de adquisición y pueden incluir o no los costes de instalación.

Los costes de propiedad, que con frecuencia son el componente mayor del LCC exceden, en muchos casos, a los costes de adquisición y no son tan evidentes. Estos costes son difíciles de predecir y pueden incluir también costes asociados con la instalación.

Los costes de eliminación pueden representar una proporción significativa del total del LCC. La legislación puede requerir actividades durante la fase de eliminación para proyectos importantes, por ejemplo, para las centrales nucleares representa un desembolso significativo.

A continuación, se muestra una imagen con las diferentes fases del ciclo de vida y lo que puede suponer para el LCC:

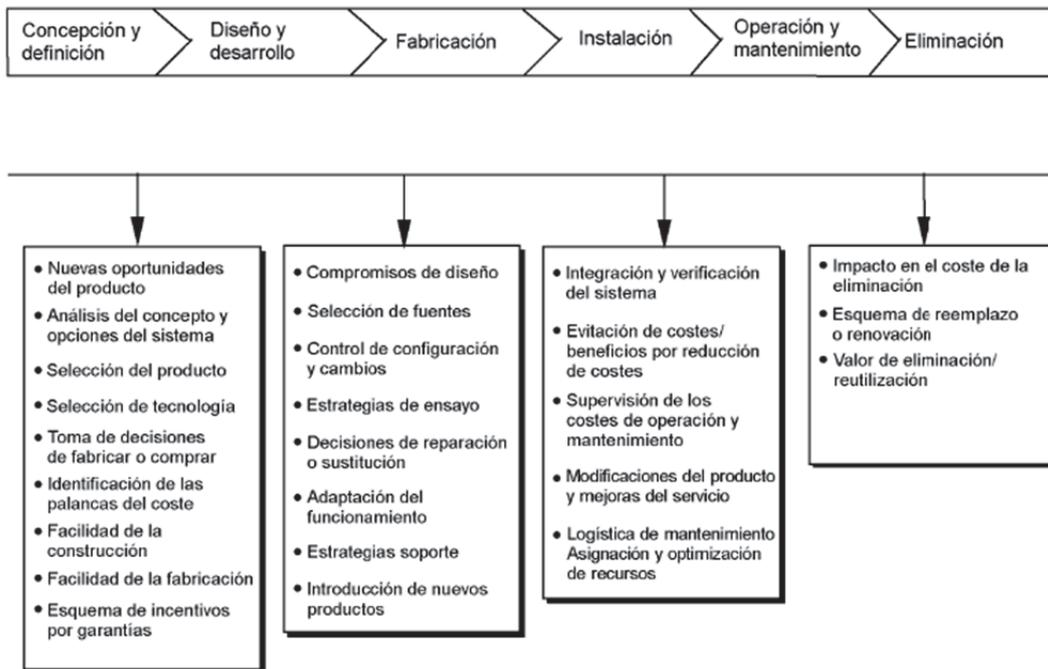


Figura C.2 – Fases Ciclo de Vida Vs LCC

En el presente proyecto, como su propio nombre indica es sobre mantenimiento, así que con la figura inferior, se pretende mostrar la relación entre el LCC y el mantenimiento:

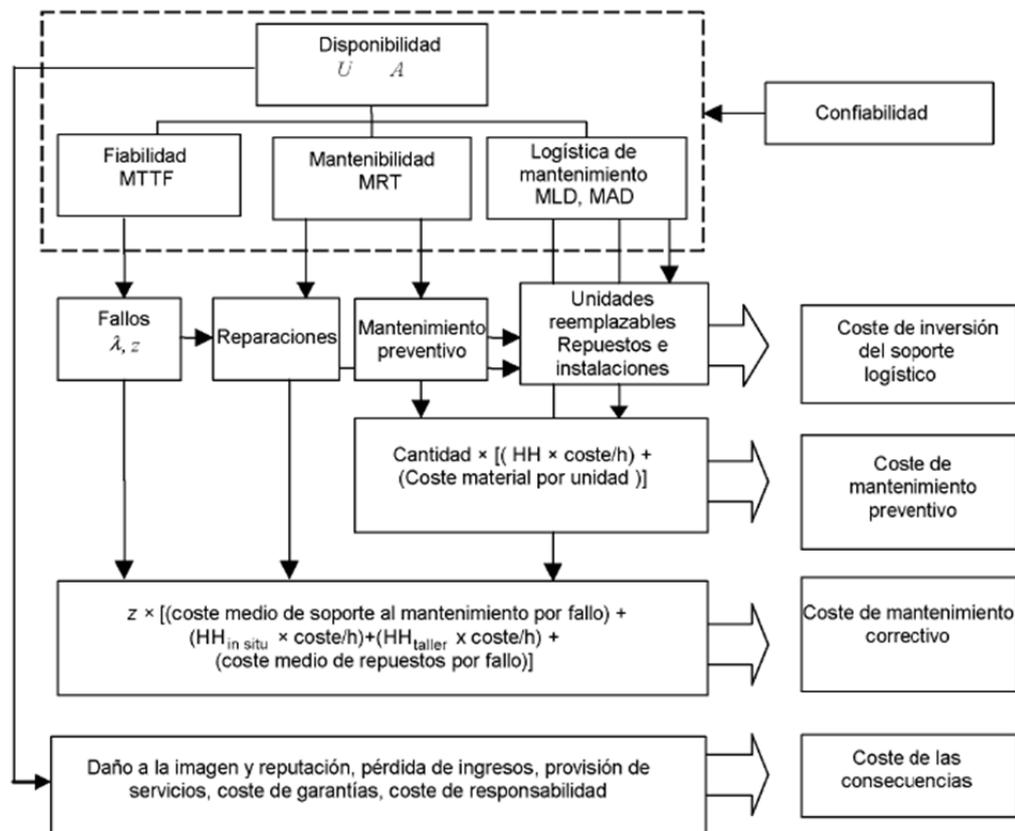


Figura C.3 – Mantenimiento Vs LCC

El modelado del LCC es complejo, y para la estimación del coste existen diferentes metodologías:

- Método de coste de ingeniería

Con este método se estiman directamente los atributos de coste de los elementos particulares de coste, examinando el producto componente a componente o pieza a pieza. A menudo se emplean factores de coste, por ejemplo, para la mano de obra.

- Método de coste por analogía

Se usa la estimación de costes basada en la experiencia de productos o tecnologías similares. Se utilizan datos históricos, actualizados para reflejar el escalado de costes, los efectos de avances tecnológicos... Ésta técnica puede ser una de las menos complejas y que menos tiempo conllevan.

- Método de coste paramétrico

En este método se usan parámetros y variables para desarrollar relaciones para la estimación de costes. Las relaciones normalmente tienen forma de ecuaciones

A continuación se muestra una figura en la que se puede apreciar gráficamente las diferentes partes de un proceso de modelado de coste de ciclo de vida.

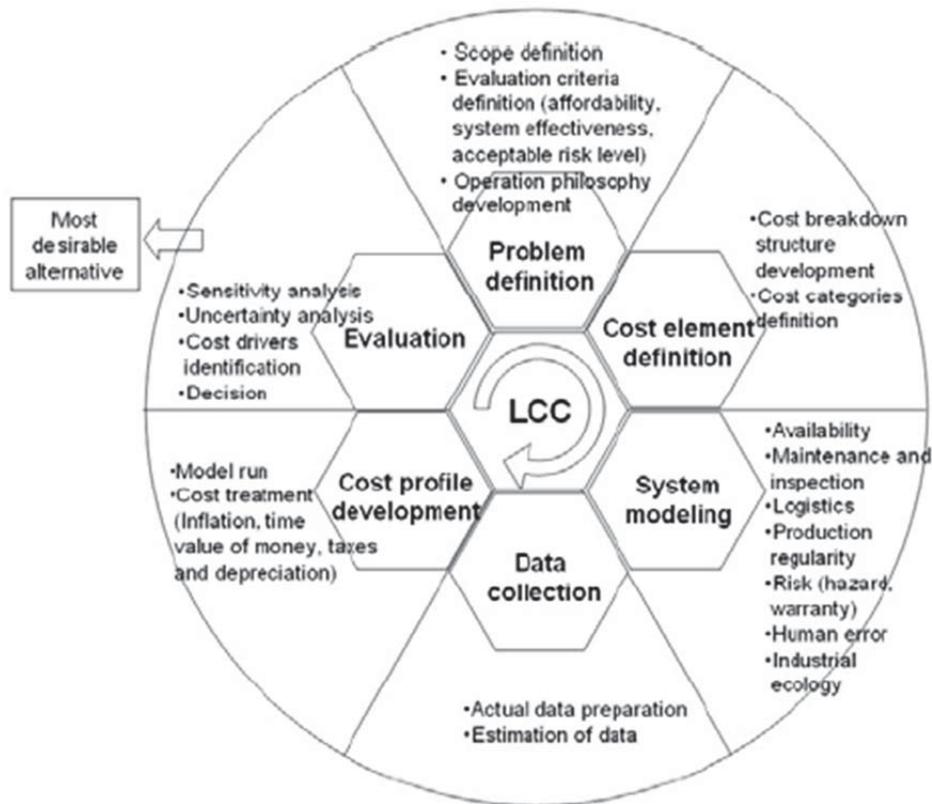


Figura C.4 - Gráfica intuitiva del proceso de modela LCC

Es importante señalar que para realizar éste cálculo debemos extraer el precio que tendría cada coste en el momento de la compra del mismo teniendo en cuenta que el precio del dinero oscila libremente. Así pues, la definición exacta sería, el valor presente de los gastos anticipados durante la vida del sistema.

Para realizar éste cálculo necesitamos de la ayuda de fórmulas matemáticas que nos ayuden a establecer el precio en un momento dado de cualquier coste efectuado en el futuro, teniendo en cuenta la oscilación del coste del dinero. La definición formal sería, un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión, llamado VAN (valor actual neto). La fórmula es la siguiente.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_F}{(1+k)^t} - I_0$$

Siendo:

- $V_f$ , valores flujo de caja.
- $I_0$ , valor de desembolso inicial de la inversión.
- $n$ , número de periodos considerado.
- $k$ , tipo de interés.

Es importante señalar que cuando en VAN toma un valor de '0' el valor 'K' pasa a llamarte 'TIR' (tasa interna de retorno), rentabilidad que está proporcionando el proyecto.

Si se desea saber más sobre el cálculo LCC, se recomienda la lectura de la norma UNE EN 60300-3-3, así como los artículos citados en el estado del arte del presente PFC.

- Comparativa del Software LCC

En el mercado existen varias herramientas comerciales de cálculo de LCC para vehículos ferroviarios pero en este apartado vamos a analizar cinco de ellos: RELEX lcc, LCCWare, D-LCC, CATLOC y UNIFE-UNILIFE.

Con el objetivo de facilitar el proceso de comparación entre ellos vamos a definir unos campos en los que dividir esta comparación. Por ejemplo:

- Características generales.
- Principales estructuras.
- Ínter cambiabilidad de datos y resultados con otros software.
- Exactitud de los datos obtenidos.
- Características de contabilidad.

-Características generales.

Tal y como se puede apreciar en la figura inferior, todos los softwares de LCC procuran tener un buen interfaces. Por ello, todos poseen acciones como copiar y pegar, que sin duda son muy útiles para el intercambio rápido de datos.

MODELO DE ANÁLISIS DE PLANES DE MANTENIMIENTO DE MATERIAL RODANTE FERROVIARIO

General features	Relex LCC	LCCWare	D-LCC	CATLOC	UNIFE-UNILIFE
User friendly interface?	✓	✓	✓	✓	✓
Allows copy/paste functions?	✓	✓	✓	✓	✓
Allows undo/redo functions? Multiple undo?	✓	✓	✗	✓	✓
Can manage different projects at the same time?	✗	✗	✗	✓	✗
Can you compare different alternatives within one single project?	✓	✓	✓	✗	--

Tabla C.1 - Tabla de características generales.

-Principales estructuras.

En este apartado, la la estructura del coste de ciclo de vida es analizada con el objetivo de adaptarla de acuerdo a la necesidad de fabricación y a los datos disponibles.

La mayoría de los softwares estudian la flexibilidad y facilidad de adaptar cada necesidad de proyecto. Además, la gran parte de estos softwares proporcionan representaciones gráficas del coste de los elementos con altos niveles de detalle.

Main structures (CBS/PBS)	Relex LCC	LCCWare	D-LCC	CATLOC	UNIFE-UNILIFE
Is your program spreadsheet-like, flexible and easy to modify cost models for each CBS element?	✓	✓	✓	✓	✗
Does it allow drag-and-drop and cut-paste for copying and editing of CBS/PBS elements?	✓	✓	✓	✓	✓
Does it allow graphical representation of CBS providing convenient and fast data input and search?	✓	✓	✓	✓	✗
Is able to perform comparisons with pre-existing LCC models to recognise the elementary cost elements?	✗	✗	✗	✗	✗
Is it possible to create user subroutines for specialised calculations?	✓	✓	✗	✓	✓
Can variables be stochastic?	✗	✗	✗	✗	✗
Is able to perform interactions between cost elements?	✗	✗	✗	✗	✓
Is it possible to define cost functions that change over time?	✗	✗	✗	✓	✗

MODELO DE ANÁLISIS DE PLANES DE MANTENIMIENTO DE MATERIAL RODANTE FERROVIARIO

Main structures (CBS/PBS)	Relex LCC	LCCWare	D-LCC	CATLOC	UNIFE-UNILIFE
Is it possible to trace the path of each parameter in the CBS?	✓	✗	✓	✓	✗
Is it possible to estimate a parameter's intervention degree in each CBS element?	✗	✗	✗	✓	✗
Is your software able to perform comparisons between its inputs/outputs and historical data or reference values?	✓	✗	✗	✓	✗
Is it possible to compute element's life cycle costs using different operators?	✗	✗	✓	✗	✓
Is your program able to compute life cycle using variables with different weights?	✗	✗	✓	✗	✗
Is your program able to limit the computation time?	✓	✓	✓	✓	✗

Tabla C.2 - Tabla de comparación estructuras

A continuación, se muestran unas cuantas capturas de pantallas que se han obtenido de los diferentes softwares que se han estudiado.

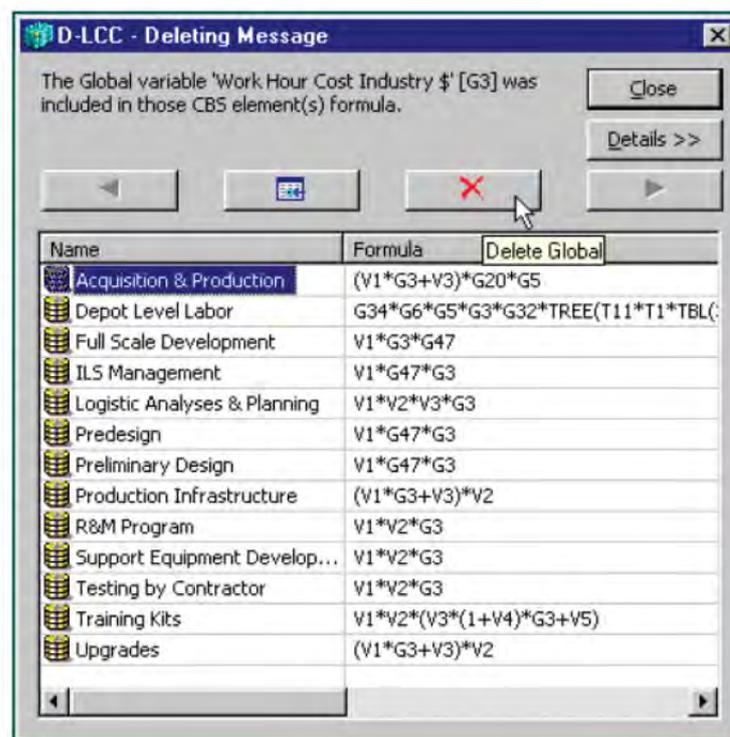


Figura C.5 - Apariencia de D-LCC (Cálculo de costes mediante variables)

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

Se puede observar en ésta imagen como están definidas las fórmulas para el cálculo de costes mediante variables dentro de la apariencia del software D-LCC.

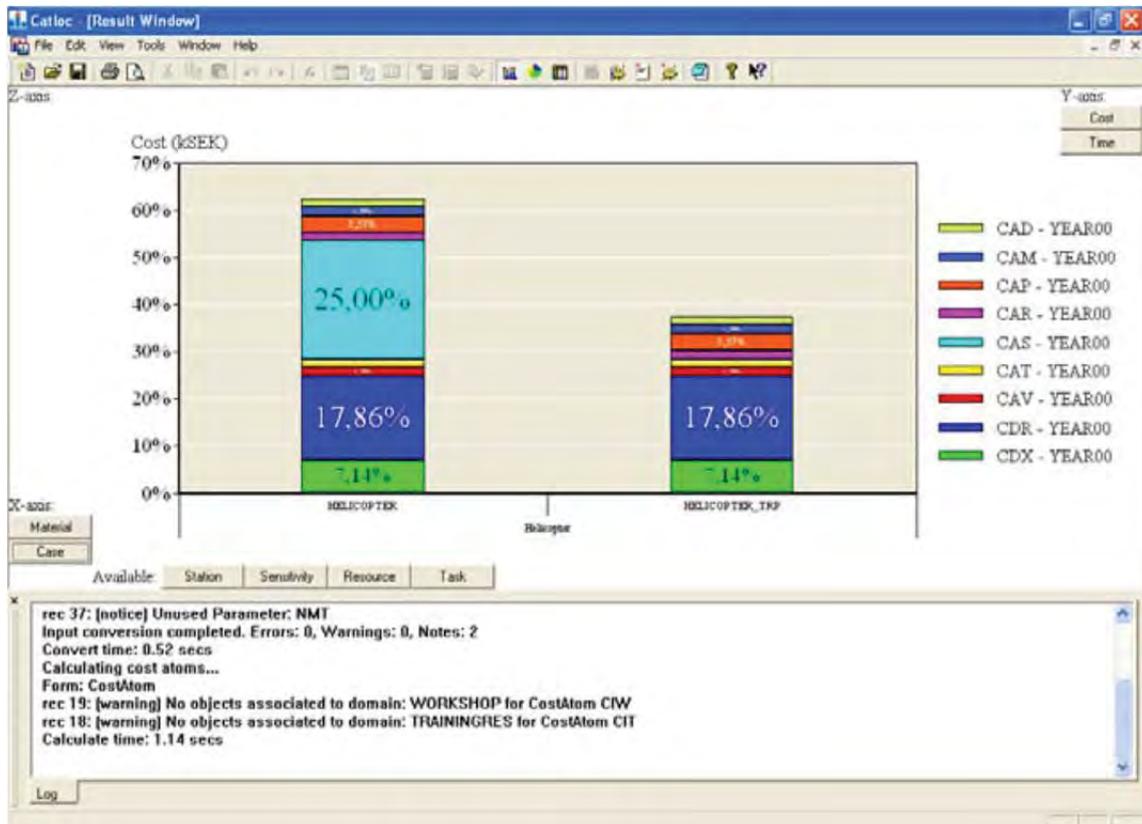


Figura C.6 - Ejemplo de visión gráficos en el entorno CATALOG

En la anterior imagen se observa, como antes se ha mencionado, el gran detalle de los gráficos en los que se puede observar el porcentaje del costo de ciclo de vida destinado a cada gasto, como por ejemplo, mantenimiento, conste inicial...

-Ínter-cambiabilidad de datos y resultados con otros softwares.

La ínter-cambiabilidad de datos con otro software, como hojas de cálculo, es fundamental en cualquier tipo de software. Debido a este apartado y como se observa en la gráfica podemos concretar que no es una buena opción la adquisición de CATALOG ya que presenta altas dificultades tanto para exportar como para importar datos.

MODELO DE ANÁLISIS DE PLANES DE MANTENIMIENTO DE MATERIAL RODANTE FERROVIARIO

Data/Results interaction with other software	Relex LCC	LCCWare	D-LCC	CATLOC	UNIFE-UNILIFE
Import data from					
MS Excel	✓	✓	✓	✓	✓
MS Access	✓	✓	✓	✓	✓
Export data from					
MS Excel	✓	✓	✓	✗	✓
MS Access	✓	✓	✓	✗	✓
Can the imported data be updated automatically?	✓	✗	✗	✗	✗

Tabla C.3 - Comparación de intercambiabilidad de datos

-Precisión de resultados.

La precisión en los resultados es lógicamente fundamental a la hora de decidirse por la adquisición de uno de estos programas. En este apartado la mayoría de los programas son capaces de realizar un análisis sensible para la obtención de parámetros fiables. Pero por otro lado, existe la excepción, que en este caso es UNIFE-UNILIFE. Por lo tanto, mediante la utilización del programa de UNIFE se corre un riesgo importante, ya que puede dar lugar a datos incorrectos o poco fiables para sucesivos cálculos.

A continuación se muestra la tabla comparativa.

Data/Results accuracy	Relex LCC	LCCWare	D-LCC	CATLOC	UNIFE-UNILIFE
Is your program able to track errors in input data?	✓	✗	✗	✓	✓
Is your program able to track errors in CBS equations?	✓	✓	✓	✓	✗

MODELO DE ANÁLISIS DE PLANES DE MANTENIMIENTO DE MATERIAL RODANTE FERROVIARIO

Data/Results accuracy	Relex LCC	LCCWare	D-LCC	CATLOC	UNIFE-UNILIFE
Is your program able to perform a standard sensitivity analysis?	✓	✓	✓	✓	✗
Is your program able to perform a risk analysis to LCC parameters?	✗	✗	✗	✗	✗
Is your program able to notify the user if the alternatives in study have or have not the same level of detail and boundary conditions?	✗	✗	✗	✗	✗
Is your program able to identify the cost drivers with conclusively reports with different modes of presentation?	✓	✓	✓	✓	✗
Does it provide reports for both total and detailed costs for any combination of Product Tree items and CBS elements?	✓	✓	✓	✓	✗

Tabla C.4 - Comparación de precisión de resultados

-Características de contabilidad.

Como se puede observar en la siguiente figura, ningún software proporciona una herramienta para realizar un análisis del alcance del coste. Es decir, no permite al usuario mejorar el proceso considerando alternativas de diseño.

Accounting features	Relex LCC	LCCWare	D-LCC	CATLOC	UNIFE-UNILIFE
Does the tool allow target costing?	✗	✗	✗	✗	✗

Tabla C.5 - Tabla de características de contabilidad

- UNIFE-UNILIFE

Tal y como se ha mencionado en uno de los apartados anteriores, el LCC es uno de las mejores herramientas de comparación (benchmarking) entre diferentes máquinas a la hora de decidirse a la compra de una de ellas. En él se pueden contemplar todos los gastos que necesitará la máquina a lo largo de su ciclo de vida como por ejemplo; coste inicial de la máquina, coste de consumo de energía..., pero lo que verdaderamente ocupa a este PFC es el coste en mantenimiento, que en la mayoría de las ocasiones es el más elevado de todos, y en el mundo ferroviario sin ninguna duda.

Dentro del LCC, el punto principal de este PFC es el coste del mantenimiento en el ciclo de vida de conjunto de vehículo ferroviario, y para ello puede basarse en el método general para el cálculo de costes de mantenimiento de esta clase de material rodante proporcionado por UNIFE, la unión de fabricantes de vehículos ferroviarios Europea.

UNIFE ha unificado metodologías con el objetivo de crear sistemas de datos comparables unos con otros para la mejor comparación de flotas de diferentes fabricantes.

Pero en el caso de la unificación de criterios de cálculo de LCC por UNIFE no ha sido todo lo profunda que se podría haber esperado, ya que al ser una unión de fabricantes de vehículos ferroviarios, no ha interesado dar información sobre costes de diseño, fabricación y desarrollo, por lo que se suponen todos éstos costes como costes de adquisición del vehículo.

Una vez presentado lo anterior, se debe centrar el estudio en el software UNILIFE creado por UNIFE, tal y como se ha mencionado anteriormente, una de las uniones más importantes, si no la más, en el ámbito ferroviario mundial. Éste software consiste en dos libros de trabajo bajo la plataforma de Microsoft EXCEL, UNILIFE y UNIDATA. Ambos contienen hojas de balances que fueron diseñadas para coleccionar datos necesarios para el análisis del LCC. Para el mejor conocimiento del mismo se muestra la siguiente figura en la que se observa un buen esquema de lo que debe ser UNILIFE.

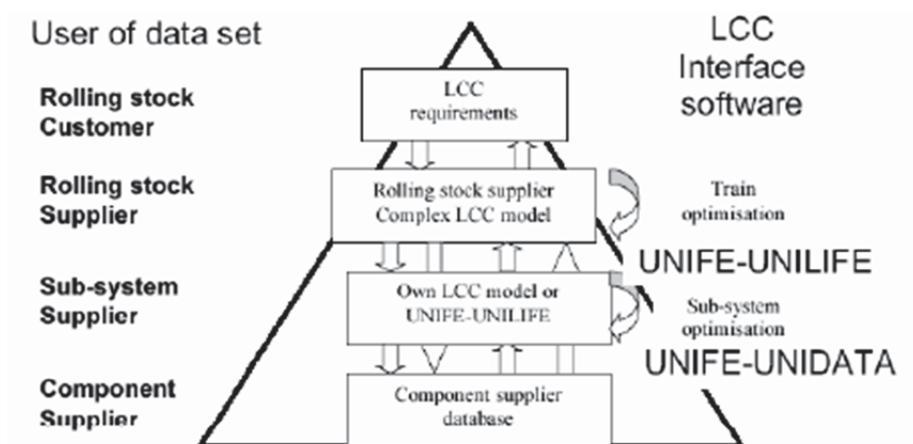


Figura C.7 - Esquema de funcionamiento UNILIFE

En el caso de UNIDATA, colecciona datos necesarios para el cálculo de LCC, mientras que en el caso de UNILIFE se ocupa del cálculo de un primer análisis de LCC mediante los datos almacenados por UNIDATA. Se recomienda no utilizarlo con sistema de más de 2000 elementos. Además, existe una herramienta que permite realizar, de una forma muy simple y básica, cálculos de fiabilidad.

Hay que mencionar que UNILIFE es un software diseñado para la comunicación de información de LCC. Lamentablemente, en ella se observan errores no aceptados en el método universal de cálculo de life cycle cost.

Se podría decir que es una herramienta de transmisión de datos y como tal, su uso habitual es simplemente como comparación entre datos obtenidos del mismo modo. De hecho, éste programa está orientado como herramienta de cálculo de costes de mantenimiento ó cálculos de tiempos entre fallos más que como un software de cálculo de LCC.

MODELO DE ANÁLISIS DE PLANES DE MANTENIMIENTO DE MATERIAL RODANTE FERROVIARIO

En caso de que un elemento falle, es necesario decidir si este fallo es reparable o no, y a continuación se muestra una figura en la que se pueden observar las posibles combinaciones de cambios ó reparaciones.

Revision 0		CORRECTIVE MAINTENANCE				
Project	UNIFE test proj	Errcheck	Spare Part Price	Exch-able Y/N	Fraction by exchange	Repar-able Y/N
Sub-syst Supplier	Example Electric	Errcheck	DEM	Y/N	exchange	Y/N
Equipment	UNIFE test syste	Errcheck	PRICE	Y/N	exchange	Y/N
Identify	Name	PRICE	Y/N	exchange	Y/N	Y/N
3	Power Supply					
3.01	Line Voltage System					
3.01.01	A-component	1.000	Y	1.00	Y	
3.01.02	B-component	1.000	Y	1.00	N	
3.01.03	C-component	1.000	N	1.00	Y	
3.01.04	D-component	1.000	N	0.50	N	
3.01.04.01	Header 1					
3.01.04.01.01	Header 2					
3.01.04.01.01.01	Header 3					
3.01.04.01.01.01.01	E-component	1.000	Y	1.00	Y	

Exchangeable in 1 <sup>st</sup> or 2 <sup>nd</sup> line	Reparable	
	Yes	No
Yes	Replaceable and repairable	Replaceable and discardable
No	Repairable item	Discardable item

Tabla C.6 - Posibles combinaciones entre cambios y reparaciones

Otra limitación detectada en éste software es sin duda la apariencia, ya que al estar basado en una hoja de cálculo Excel no tenemos la posibilidad de tener la apariencia de árbol, que sin duda da facilidades de visualizar a la hora de introducir datos en la posición correcta. A continuación se muestra una figura en la que podemos observar como se definen los elementos dentro de UNIDATA.

UNIFE-UNILIFE		Navigation											
Project	UNIFE test proj	Errcheck	9	10	Sum	Failrate	CM Rank Cost	CM Mtrl Cost	CM Cost	Failure Penalty Cost	PM Cost	Maintenance Cost	Maintenance Cost %
Equipment	UNIFE test syste	Errcheck	0	0	Fpmh	DEM All Tr	DEM All Tr	DEM All Tr	DEM All Tr	DEM All Tr	DEM All Tr	DEM All Tr	DEM All Tr
Identify	Name	PRICE	Y/N	Y/N	Y/N	Y/N	Y/N	Y/N	Y/N	Y/N	Y/N	Y/N	Y/N
3	Power Supply				0,00	0	0	0	0	0	15.698	15.698	25%
3.01	Line Voltage System				0,00	0	0	0	0	0	0	0	0%
3.01.01	A-component				8,00	940	2.400	3.240	12.000	0	17.550	20.790	31%
3.01.02	B-component				8,00	420	12.000	12.420	0	4.725	17.145	26%	
3.01.03	C-component				8,00	830	2.400	3.030	0	0	3.030	4%	
3.01.04	D-component				8,00	210	6.000	6.210	0	0	6.210	9%	
3.01.04.01	Header 1				0,00	0	0	0	0	0	0	0%	
3.01.04.01.01	Header 2				0,00	0	0	0	0	0	0	0%	
3.01.04.01.01.01	Header 3				0,00	0	0	0	0	0	0	0%	
3.01.04.01.01.01.01	E-component				8,00	420	4.800	5.220	0	0	5.220	8%	
19					0,00	0	0	0	0	0	0	0%	
20					0,00	0	0	0	0	0	0	0%	
21					0,00	0	0	0	0	0	0	0%	
22	SUM				0,00	0,00	2.520	27.800	30.120	12.000	37.973	66.093	100%

Tabla C.7 - Apariencia de la introducción de datos

Todavía se podrían mencionar más limitaciones, como por ejemplo el forzamiento a la utilización de determinados modos de cálculo, por la imposibilidad de utilizar otro, como es el caso del cálculo de NET PRESENT VALUE (valor actual neto) en el que el programa sólo puede definir una tasa de descuento constante.

Todas estas limitaciones hacen del software un programa no demasiado útil y sobre el cual hay que investigar para obtener mejores apariencias y mejores métodos de cálculos en un futuro, al menos si se desea seguir utilizándolo.

## ANEXO D: CÁLCULOS

---

En este último anexo se va a exponer cómo se ha calculado cada uno de los apartados resueltos en la memoria del presente PFC, para dejar una mayor constancia de la metodología seguida y a la vez, que sirva como explicación para posibles estudios posteriores.

- Cálculos para el compresor de forma teórica

Para el cálculo de la tasa de fallo de un compresor, supuesta constante a lo largo de su ciclo de vida, se va a seguir el método expuesto en el documento “Naval Surface Warfare Center – Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment”, de Mayo de 2011, también conocido como “NSWC-11”.

Según el capítulo 13 del documento citado anteriormente, se pueden clasificar los compresores de la siguiente forma:

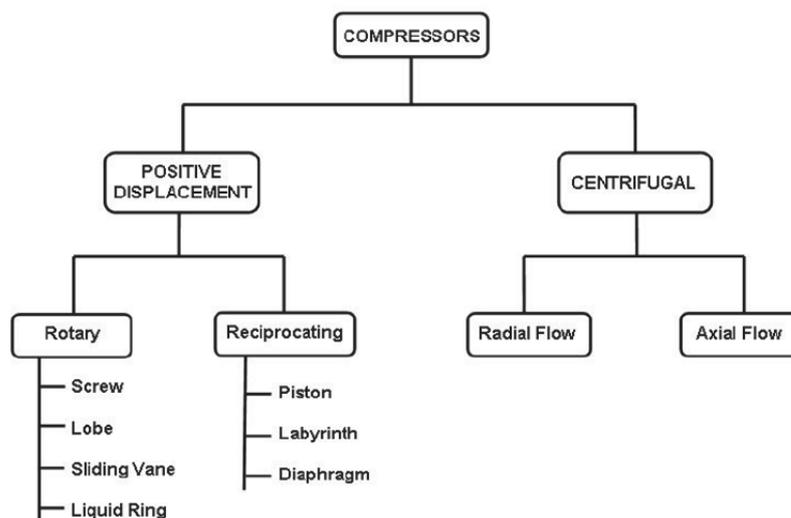


Figura D.1 – Clasificación Genérica de los Compresores

Tras esta breve clasificación, y si seguimos el documento, expone como calcular la tasa de fallo para cualquier compresor, siendo la expresión la siguiente:

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

Siendo cada uno de los componentes de la ecuación:

- $\lambda_C$  = Tasa de fallo total del compresor, en Fallos/Millón de horas
- $\lambda_{FD}$  = Tasa de fallo de los conductores, en Fallos/Millón de horas
- $C_{SF}$  = Factor de Multiplicación por servicio
- $\lambda_{CA}$  = Tasa de fallo de la cubierta del compresor, en Fallos/Millón de horas
- $\lambda_{BE}$  = Tasa de fallo de los rodamientos, en Fallos/Millón de horas

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

- $\lambda_{VA}$  = Tasa de fallo de las válvulas de control, en Fallos/Millón de horas
- $\lambda_{SE}$  = Tasa de fallos de las juntas, en Fallos/Millón de horas
- $\lambda_{SH}$  = Tasa de fallos del eje, en Fallos/Millón de horas

Se entiende que cuando se menciona, Fallos/Millón de horas, es millón de horas de operación.

Como se puede observar, se descompone el conjunto del compresor en componentes más sencillos, para que resulte algo más sencillo de calcular.

El siguiente paso es calcular la tasa de fallo de cada uno de los términos de la ecuación anterior.

### Cálculo de $\lambda_{FD}$

En el documento se presenta de dos formas:

- Tabla de valores:

FLUID DRIVER MODE	MODEL TYPE	BASE RATE $\lambda_{FD}$
Radial flow	-----	12.0
Axial flow	-----	12.0
Reciprocating	Single piston	14.0
Reciprocating	Double acting piston	16.5
Reciprocating	Labyrinth	16.5
Reciprocating	Rubber Diaphragm	22.8
Reciprocating	Metal Diaphragm	28.5
Rotary	Vane	12.0
Rotary	Screw	12.0
Rotary	Lobe	12.0
Rotary	Liquid Ring	12.0

Tabla D.1 – Tasa de fallo para conductores

- Mediante una ecuación:

$$\lambda_{FD} = \lambda_{DI} = \lambda_{BFD} \cdot C_P \cdot C_{AC} \cdot C_{LC} \cdot C_T$$

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

Donde cada uno de los componentes de la ecuación es:

- $\lambda_{DI}$  = Tasa de fallo del montaje de diafragma, en Fallos/Millón de horas
- $\lambda_{BFD}$  = Tasa de fallo base del diafragma del compresor. Es 0.58 Fallos/Millón de horas
- $C_p$  = Factor debido a los efectos de cargas axiales
- $C_{AC}$  = Factor debido a los efectos de contaminantes atmosféricos
- $C_{LC}$  = Factor debido a los efectos de contaminantes líquidos
- $C_T$  = Factor debido a los efectos de temperatura

Estos coeficientes, según el manual se obtienen de tablas, y debido a que no se ha podido obtener la cantidad de datos necesaria para su obtención mediante esta ecuación, se opta por tomar un valor de la tabla expuesta anteriormente.

Dadas las características del compresor estudiado, se toma un valor:

$$\lambda_{FD} = 14 \text{ Fallos/Millón de horas}$$

### Cálculo de $C_{SF}$

Se trata de un factor de multiplicación, y según en manual lo obtenemos de la siguiente tabla:

<b>Multiplying Factor</b>	<b>Centrifugal</b>	<b>Rotary</b>	<b>Reciprocating</b>	<b>Diaphragm</b>
Normal duty cycle, operating temperature and humidity, air cleanliness with proper filtration, lubrication quality, vibration and shock loading	1.0	1.0	1.0	1.0
High duty cycle (> 5 cycles per /hour)	1.2	1.2	1.4	1.2
Extreme operating temperatures	1.1	1.1	1.4	1.4
Non-scheduled lubrication check	1.1	1.2	1.1	1.2
High vibration level and/or heavy shock loading	1.2	1.4	1.3	1.5
Poor inlet air quality	1.1	1.4	1.1	1.3

**Tabla D.2 – Valores de  $C_{SF}$**

Dadas las condiciones de operación del compresor, y que esta ubicado en la parte inferior del vehículo (bajo bastidor), se opta por dar un valor de:

$$C_{SF} = 1.4$$

Cálculo de  $\lambda_{CA}$

Según el documento, y tras la experiencia de muchos productores, da un valor estandarizado y aceptado para este cálculo.

$\lambda_{CA} = 0.01$ Fallos/Millón de horas
--

Cálculo de  $\lambda_{BE}$

Este apartado es más complicado de analizar, ya que la ecuación a resolver es la siguiente:

$$\lambda_{BE} = \lambda_{BE,B} \cdot C_R \cdot C_V \cdot C_{CW} \cdot C_t \cdot C_{SF} \cdot C_C$$

Siendo cada término de la ecuación:

- $\lambda_{BE,B}$  = Tasa de fallos base, en fallos por millón de horas
- $C_R$  = Factor de ajuste por fiabilidad
- $C_V$  = Factor debido al lubricante
- $C_{CW}$  = Factor debido a factores de contaminación por agua
- $C_t$  = Factor debido a temperatura
- $C_{SF}$  = Factor debido a las condiciones de operación
- $C_C$  = Factor debido a la contaminación por lubricante

A continuación, se expone cómo calcular cada uno de los integrantes de la ecuación anterior, siendo el primer término, es el más complicado de calcular, siempre y cuando no se dispongan datos de fabricantes.

- Cálculo de  $\lambda_{BE,B}$ :

Se define  $\lambda_{BE,B} = \frac{1}{L_{10h}}$ , siendo  $L_{10h}$  la vida del rodamiento, al 90% de fiabilidad, en horas de operación.

La ecuación para el cálculo de  $L_{10h}$  es la siguiente:

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 \cdot n} \cdot \left( \frac{L_S}{L_A} \right)^y$$

Cada término de la ecuación representa:

- $n$  = velocidad de operación, en rev/min

- $L_5$  = Capacidad de carga dinámica del rodamiento, en Lbs. Se obtiene de los datos del fabricante.
- $L_A$  = Equivalente de carga radial sobre el rodamiento, en lbs. Se puede calcular de dos formas distintas:
  - Aproximación general de  $L_A = 0.5 \cdot L_5$
  - Mediante la siguiente ecuación:

$$L_A = X \cdot F_R + Y \cdot F_A$$

Siendo cada miembro de la ecuación:

- $F_R$  = carga radial, en lbs
  - $F_A$  = carga axial, en lbs
  - $X$  = factor radial en relación con el ángulo de contacto
  - $Y$  = factor relacionado con el ángulo de ataque de la carga, el número y tamaño de las bolas o rodillos
- $y$  = constante. Valor de 3 para rodamientos de bolas, valor de 3.3 para rodamientos de rodillos.

Optando por la aproximación para  $L_A$  y según las características del compresor objeto de estudio, se obtiene que

$$\lambda_{BE,B} = 0.005843 \text{ Fallos/Millón de horas}$$

- Cálculo de  $C_R$

El cálculo de este valor depende de que valor de  $L_{10h}$ , se halla utilizado, tal y como se muestra en la tabla inferior:

Reliability $R$ %	$L_a$	Life adjustment factor $C_R^*$
90	$L_{10}$	1.00
95	$L_5$	1.62
96	$L_4$	1.88
97	$L_3$	2.29
98	$L_2$	3.01
99	$L_1$	4.79
50	$L_{50}$	0.29

Tabla D.3 – Factor por Fiabilidad

También se puede calcular aplicando la siguiente expresión:

$$C_R = \frac{0.223}{\left[ \ln\left(\frac{100}{R}\right) \right]^{2/3}}$$

Siendo R la fiabilidad tomada.

Finalmente el valor de  $C_R = 1$

- Cálculo de  $C_v$

Este factor es debido a la viscosidad y depende de la viscosidad del lubricante que se utilice. Su cálculo es mediante la siguiente expresión:

$$C_v = \left( \frac{v_o}{v_L} \right)^{0.54}$$

Siendo:

- $v_o$  = viscosidad del especificada de lubricante, en lb-min/in<sup>2</sup>
- $v_L$  = viscosidad del lubricante utilizado, en lb-min/in<sup>2</sup>

Finalmente el valor de  $C_v = 1.128$

- Cálculo de  $C_{CW}$

Este factor depende del porcentaje de agua que lleve el lubricante utilizado.

Podemos utilizar la gráfica:

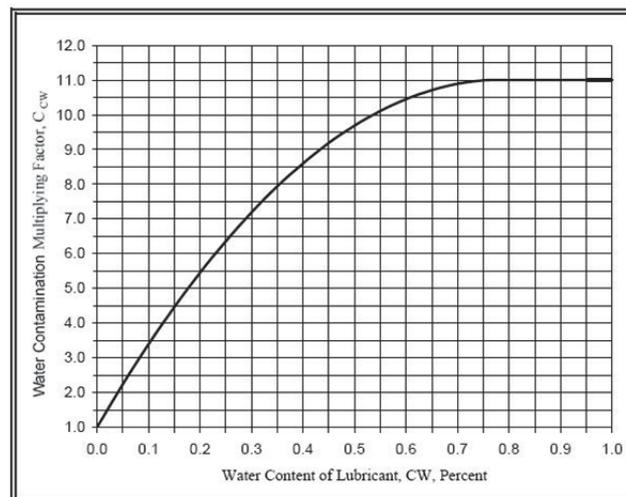


Figura D.2 – Valores de  $C_{CW}$

O, si el porcentaje en agua es menor que 0.8, la siguiente expresión

$$C_{CW} = 1 + 25.5 * CW - 16.25 * CW^2$$

Siendo CW el porcentaje de agua del lubricante.

Resulta  $C_{CW} = 5.45$

- Cálculo de  $C_t$

Para el cálculo de este coeficiente, que depende de la temperatura de trabajo, se puede utilizar la siguiente gráfica:

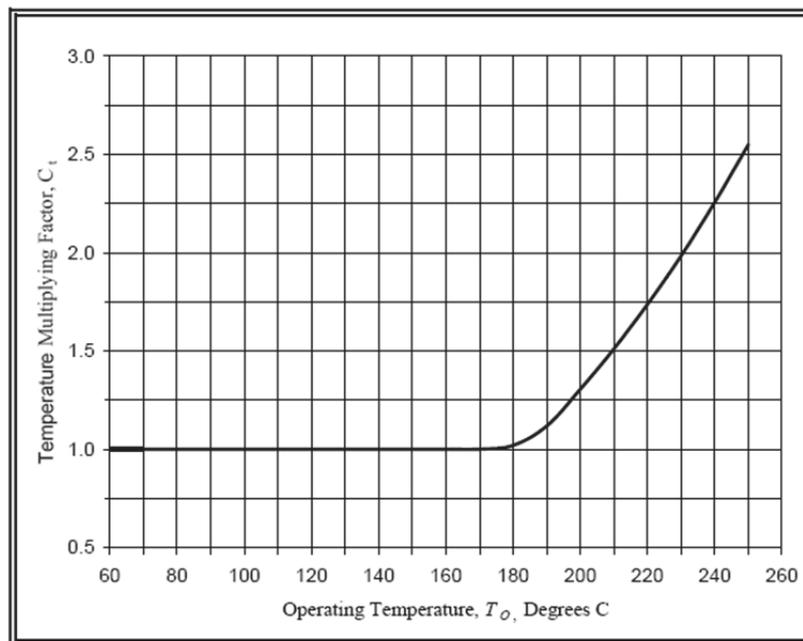


Figura D.3 – Valores de  $C_t$

O bien las ecuaciones siguientes:

$$C_t = 1, \text{ si } T_o < 183^\circ\text{C}$$

$$C_t = \left( \frac{T_o}{183} \right)^3 \text{ si } T_o \geq 183^\circ\text{C}$$

Finalmente, obtenemos un valor de  $C_t = 1$

- Cálculo de  $C_{SF}$

Este factor depende la carga axial y radial que sufre el rodamiento. Su valor lo se puede obtener de la siguiente tabla:

Type of Application	Service Factor, $C_{SF}$	
	Ball Bearing	Roller Bearing
Uniform and steady load, free from shock	1.0	1.0
Normal operation, light shock load	1.5	1.0
Moderate shock load	2.0	1.3
Heavy shock load	2.5	1.7
Extreme and indeterminate shock load	3.0	2.0
Precision gearing	1.2	
Commercial gearing	1.3	
Toothed belts		1.2
Vee belts		1.8
Flat belts		3.0

Tabla D.4 – Valores de  $C_{SF}$  en función de la carga

Dadas las condiciones de operación, se toma un valor de  $C_{SF} = 1.3$

- Cálculo de  $C_c$

Este último coeficiente, se toma de la siguiente tabla:

Contamination Condition	Service Factor, $C_c$	
	Bearing diameter < 100 mm	Bearing diameter > 100 mm
Extreme cleanliness- particle size approx. lubricant film thickness (laboratory conditions)	1.0	1.0
High cleanliness – oil filtered through fine filter $\leq 10$ micron	1.4	1.2
Normal cleanliness – slight contamination in lubricant	1.8	1.4
Slight contamination –slight contamination in lubricant – hard particles > 10 micron	2.5	2.0
Severe contamination – course filtering, no integral seals	5.0	3.3

Tabla D.5 – Valores de  $C_c$

Dada la citación del compresor y las condiciones de operación, se toma un valor de  $C_c = 2$

Después de los cálculos anteriores, se está en disposición de calcular la tasa de fallo de los rodamientos:

$$\lambda_{BE} = 0.087639 \text{ Fallos/Millón de horas}$$

Cálculo de  $\lambda_{VA}$

Para el cálculo de la tasa de fallo de las válvulas que lleva un compresor, se tiene que resolver la siguiente expresión:

$$\lambda_{SV} = \lambda_{SV,B} \cdot C_P \cdot C_Q \cdot C_V \cdot C_N \cdot C_B \cdot C_{DS} \cdot C_{\mu} \cdot C_W$$

Siendo cada componente de la ecuación:

- $\lambda_{SV,B}$  = Tasa de fallos base, 1.25 Fallos/Millón de Operaciones
- $C_P$  = Factor debido a la presión del fluido
- $C_Q$  = Factor debido a los efectos de la fugas admisibles
- $C_V$  = Factor debido a factores de viscosidad/Temperatura del fluido
- $C_N$  = Factor debido a contaminantes en el fluido
- $C_B$  = Factor debido a las condiciones de acabado en salida
- $C_{DS}$  = Factor debido al diámetro de salida
- $C_{\mu}$  = Factor debido a la fricción
- $C_W$  = Factor debido al caudal

Como se puede apreciar, el procedimiento a seguir es similar al del apartado anterior, mediante la aplicación de una serie de coeficientes a una tasa de fallo base.

A continuación, se procede al cálculo de cada uno de los miembros de la ecuación anterior:

- Cálculo de  $C_P$

Este primer término se puede obtener de la siguiente figura:

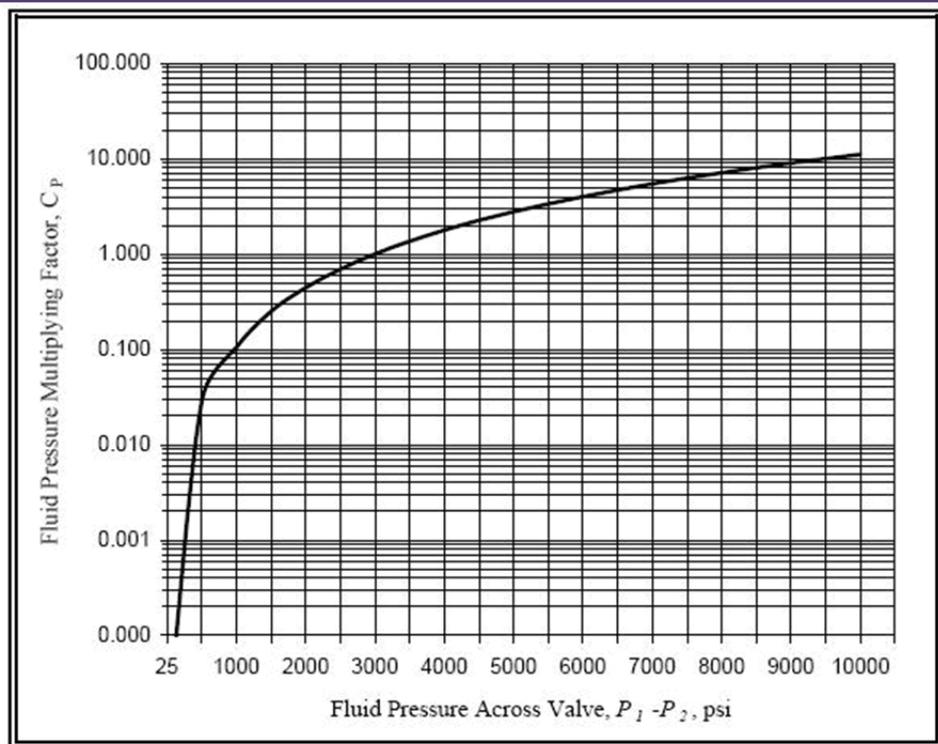


Figura D.4 – Valores de  $C_p$

O bien, calcularlo a través de la ecuación:

$$C_p = \left( \frac{P_1 - P_2}{3000} \right)^2$$

Siendo:

- $P_1$  = Presión a la entrada de la válvula, en psi
- $P_2$  = Presión a la salida de la válvula, en psi.

Según lo anterior, se obtiene un valor de  $C_p = 0,015$

- Cálculo de  $C_Q$

Como en el punto anterior, este coeficiente se puede obtener a través de la siguiente figura:

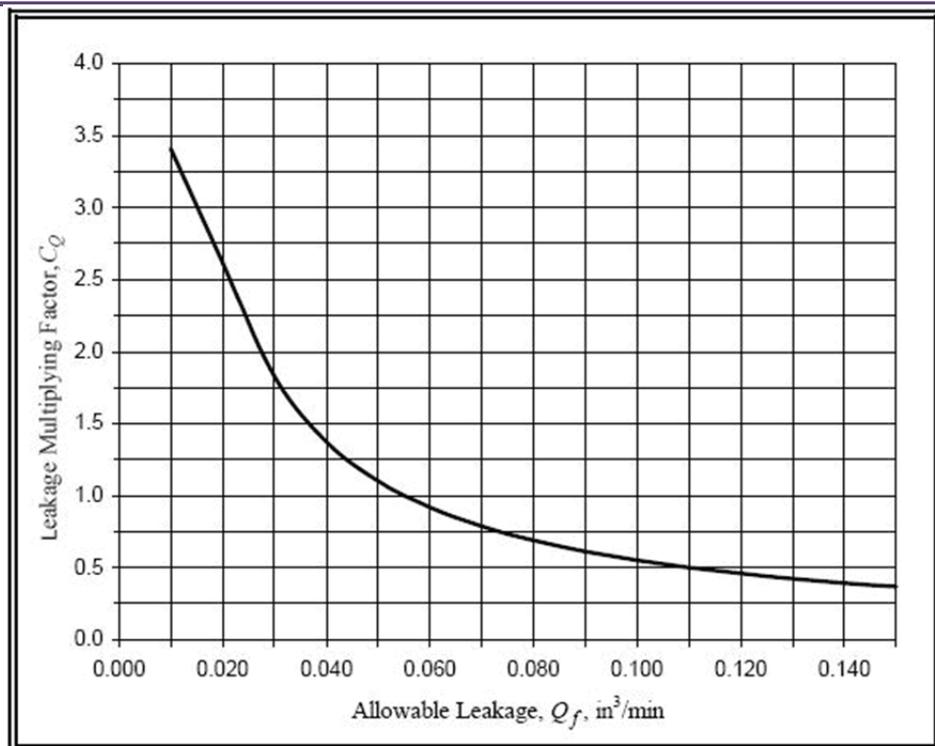


Figura D.5 – Valores de  $C_Q$

O bien a través de una de las siguientes expresiones:

$$\text{Si } Q_f > 0.03 \text{ in}^3/\text{min}, C_Q = \frac{0.055}{Q_f}$$

$$\text{Si } Q_f \leq 0.03 \text{ in}^3/\text{min}, C_Q = 4.2 - (79 \cdot Q_f)$$

A partir de esto, obtenemos un valor de  $C_Q = 1,83$

- Cálculo de  $C_v$

El valor de este factor se puede extraer de la siguiente tabla:

FLUID	$C_v$								
	Fluid Temperature, °F								
	-50	0	50	100	150	200	250	300	350
Air	554.0	503.4	462.9	430.1	402.6	379.4	359.5	---	---
Oxygen	504.6	457.8	420.6	390.2	365.9	343.6	325.3	---	---
Nitrogen	580.0	528.0	486.5	452.6	424.3	400.0	379.6	---	---
Carbon Dioxide	---	---	0.7	0.8	0.9	0.9	---	---	---
Water	---	---	6.309	12.15	19.43	27.30	---	---	---
SAE 10 Oil	---	---	0.060	0.250	0.750	1.690	2.650	---	---
SAE 20 Oil	---	---	0.0314	0.167	0.492	1.183	2.213	2.861	5.204
SAE 30 Oil	---	---	0.0297	0.1129	0.3519	0.8511	1.768	2.861	4.309
SAE 40 Oil	---	---	0.0122	0.0534	0.2462	0.6718	1.325	2.221	3.387
SAE 50 Oil	---	---	0.0037	0.0326	0.1251	0.3986	0.8509	1.657	2.654
SAE 90 Oil	---	---	0.0012	0.0189	0.0973	0.3322	0.7855	1.515	2.591
Diesel Fuel	0.1617	0.7492	2.089	3.847	6.228	9.169	12.78	16.31	---
MIL-H-83282	0.0031	0.0432	0.2137	0.6643	1.421	2.585	4.063	0.6114	0.7766
MIL-H-5606	0.0188	0.0951	0.2829	0.6228	1.108	1.783	2.719	3.628	4.880

Tabla D.6 – Valores de  $C_v = f(T, \text{Fluido})$

Según esta tabla, el valor de  $C_v = 462.9$

- Cálculo de  $C_N$

Para el cálculo de este factor, se tiene que observar la siguiente tabla:

TYPICAL QUANTITIES OF PARTICLES PRODUCED BY HYDRAULIC COMPONENTS	PARTICLE MATERIAL	NUMBER PARTICLES UNDER 10 MICRON PER HOUR PER RATED GPM (N10)
Piston Pump	steel	0.017
Gear Pump	steel	0.019
Vane Pump	steel	0.006
Cylinder	steel	0.008
Sliding action valve	steel	0.0004
Hose	rubber	0.0013

Tabla D.7 – Valores de  $N_{10}$

Y posteriormente, aplicar la siguiente ecuación:

$$C_N = \left( \frac{C_o}{C_{10}} \right)^3 \cdot FR \cdot N_{10}$$

Siendo cada término:

- $C_o$  = Tamaño del filtro (en micras)

- $C_{10}$  = Sistema de filtro estándar = 10 micras
- FR = Caudal nominal, en GPM
- $N_{10}$  = Factor de tamaño de partícula

A raíz de lo anterior, obtenemos un valor de  $C_N = 2,69$

- Cálculo de  $C_B$

Este valor, se puede obtener extrayéndolo de la siguiente tabla:

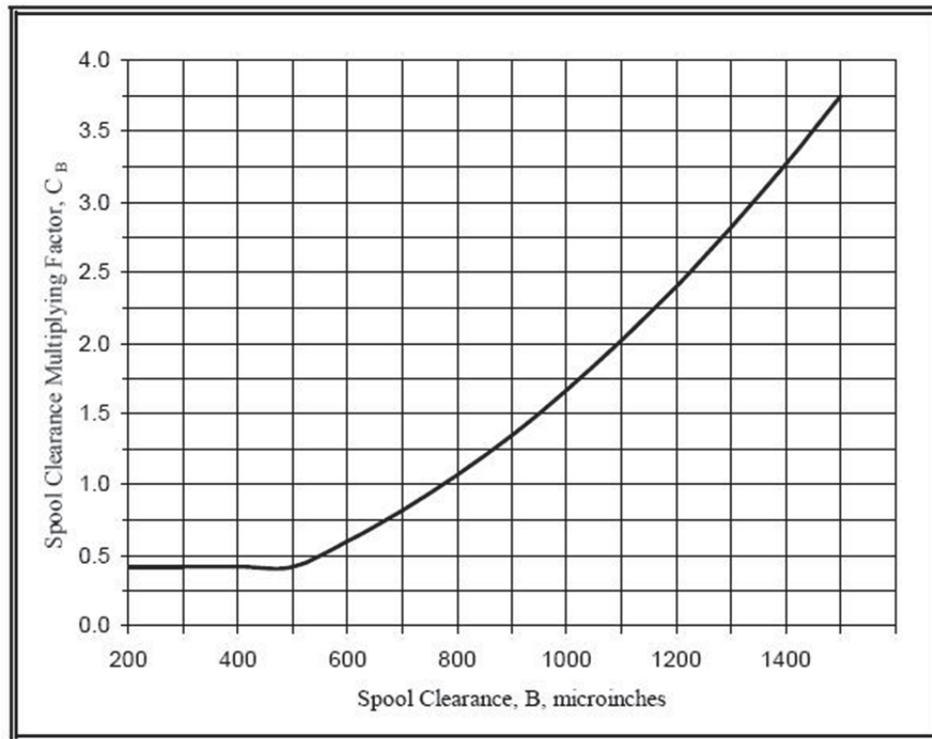


Figura D.6 – Valores de  $C_B$

O, por consiguiente, a través de una de las siguientes ecuaciones:

$$\text{Si } B < 500 \mu\text{in, } C_B = 0.42$$

$$\text{Si } B \geq 500 \mu\text{in, } C_B = \frac{B^2}{6 \times 10^5}$$

Quedando un resultado de  $C_B = 0.42$

- Cálculo de  $C_{DS}$

El valor de este factor se calcula a través de la siguiente expresión:

$C_{DS} = 0.615 * D_{Sp}$ , siendo  $D_{Sp}$  el diámetro del asiento de la válvula, en pulgadas.

Se obtiene un valor de  $C_{DS} = 0,615$

- Cálculo de  $C_{\mu}$

El factor correspondiente a los efectos de la fricción se puede obtener de la siguiente tabla:

Material	Static Friction Coefficient	
	$C_{\mu}$ Dry	$C_{\mu}$ Lubricated
Steel on steel	0.8	0.5
Aluminum on steel	0.6	0.5
Copper on steel	0.5	0.4
Brass on steel	0.5	0.4
Cast iron on steel	0.4	---
Brass on nylon	0.3	---
Steel on nylon	0.3	---
Teflon on Teflon	0.05	0.04
Hard carbon on carbon	0.2	0.1
Copper on copper	1.3	0.8
Aluminum on aluminum	1.1	---
Nickel on nickel	0.7	0.3
Brass on brass	0.9	0.6

Tabla D.8 – Valores de  $C_{\mu}$

Obtenemos un valor de  $C_{\mu} = 0.6$

- Cálculo de  $C_w$

Este último coeficiente se obtiene a través de la siguiente figura:

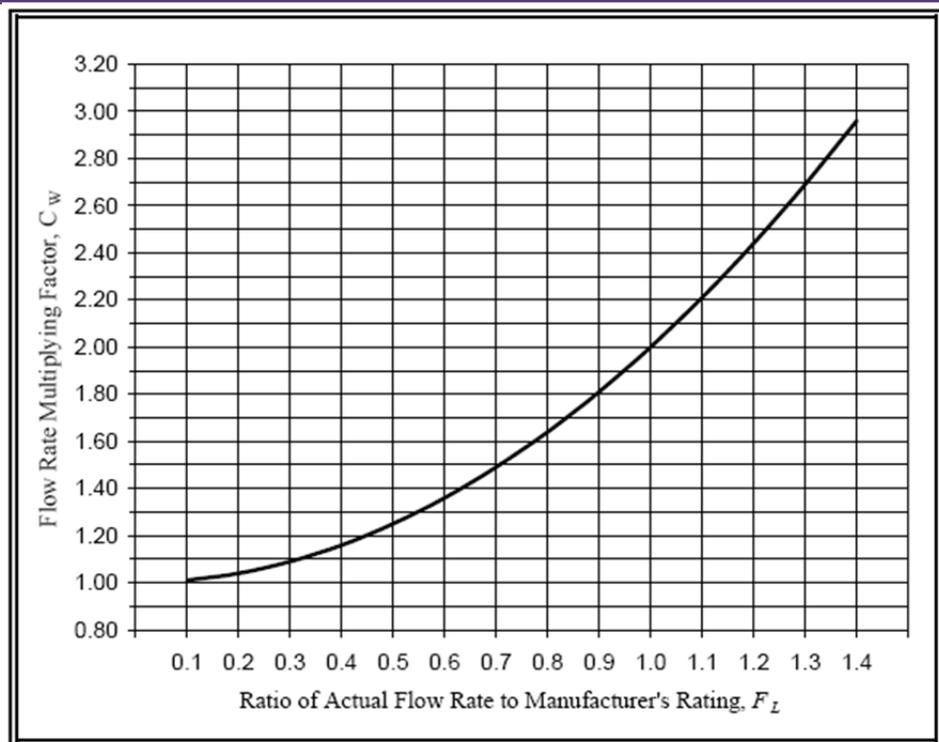


Figura D.7 – Valores de  $C_w$

O bien, mediante la siguiente expresión:

$$C_w = 1 + F_L^2$$

Siendo  $F_L$  el ratio entre el caudal nominal del fabricante y el actual.

Resulta un valor de  $C_w = 1.64$

Finalmente, después de los cálculos anteriores, se está en disposición de calcular la tasa de fallo correspondiente a las válvulas:

$$\lambda_{VA} = 1,08 \text{ Fallos/Millón de horas}$$

#### Cálculo de $\lambda_{SE}$

Para calcular la tasa de fallo de las juntas, se tiene que resolver la siguiente expresión:

$$\lambda_{SE} = \lambda_{SE,B} \cdot C_P \cdot C_Q \cdot C_{DL} \cdot C_H \cdot C_F \cdot C_V \cdot C_T \cdot C_N \cdot C_{PV}$$

Igual que los apartados anteriores, cada término de la ecuación es:

- $\lambda_{SE,B}$  = Tasa de fallos base, 2.8 Fallos/Millón de Horas

- $C_p$  = Factor debido a la presión del fluido
- $C_Q$  = Factor debido a los efectos de la fugas admisibles
- $C_{DL}$  = Factor debido al efecto del tamaño de la junta
- $C_H$  = Factor debido a la tensión de contacto y dureza de la junta
- $C_F$  = Factor debido a las condiciones de acabado de la superficie de contacto
- $C_V$  = Factor debido a la viscosidad del fluido
- $C_T$  = Factor debido a la temperatura
- $C_N$  = Factor debido a los efectos de contaminantes
- $C_{pV}$  = Factor que considera el efecto de la Presión/Velocidad

Una vez expuesta la ecuación fundamental, se expone cómo calcular cada uno de los términos citados anteriormente:

- Cálculo de  $C_p$

El valor de este factor depende la velocidad de movimiento:

- Si es mayor a 800 rpm o mayor a 600 ft/min →  $C_p = 1$
- Si es menor a esos valores, se tiene que obtener de la siguiente figura:

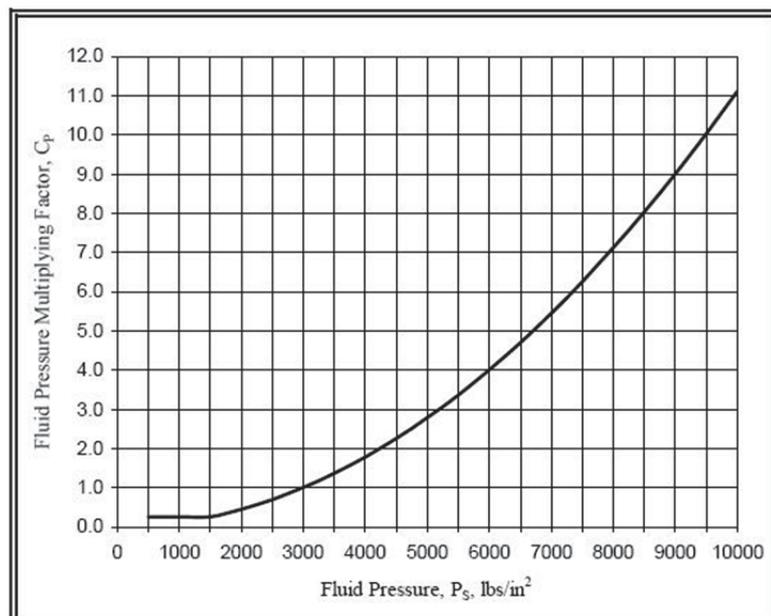


Figura D.8 – Valores de  $C_p$  en juntas

Resulta un valor de  $C_p = 0.1$

- Cálculo de  $C_Q$

El efecto de las fugas, se calcula exactamente igual que en el apartado de calculo de la tasa de fallo para la válvula, por lo que no se considera necesario volver a exponerlo.

Resulta un valor de  $C_Q = 1,83$

- Cálculo de  $C_{DL}$

Como en el caso del coeficiente debido a la presión, depende de la velocidad de movimiento, resulta lo siguiente:

- Si es mayor a 800 rpm o mayor a 600 ft/min  $\rightarrow C_{DL} = 1$
- Si es menor a esos valores, se tiene que obtener de la siguiente figura:

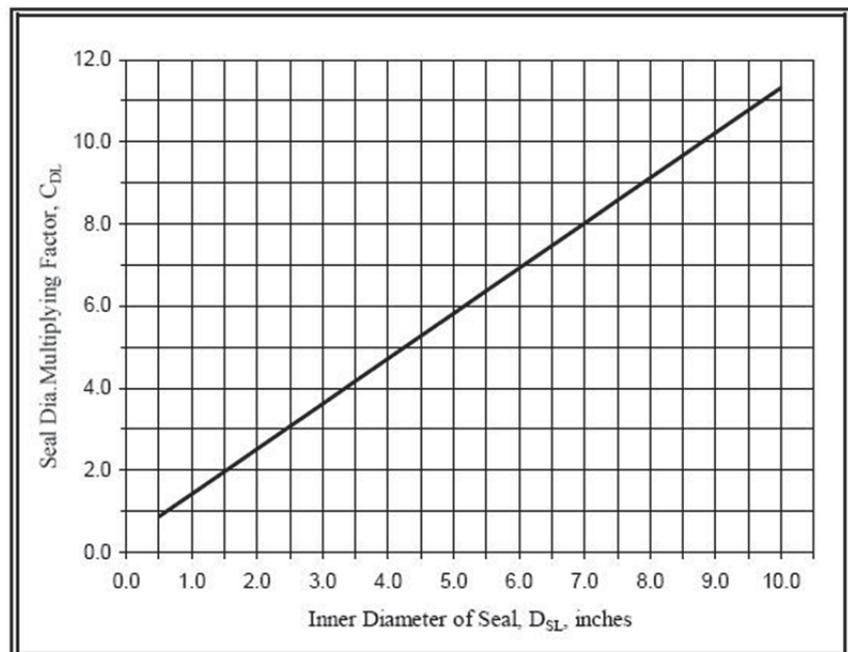


Figura D.9 – Valores de  $C_{DL}$

O la expresión:  $C_{DL} = 1.1 * D_{SL} + 0.32$ , siendo  $D_{SL}$  = diámetro interior de la junta, en pulgadas.

Se obtiene un resultado de  $C_{DL} = 1$

- Cálculo de  $C_H$

Igual que el caso anterior, también depende de la velocidad.

- Si es mayor a 800 rpm o mayor a 600 ft/min  $\rightarrow C_H = 1$
- Si es menor a esos valores, se tiene que obtener de la siguiente figura:

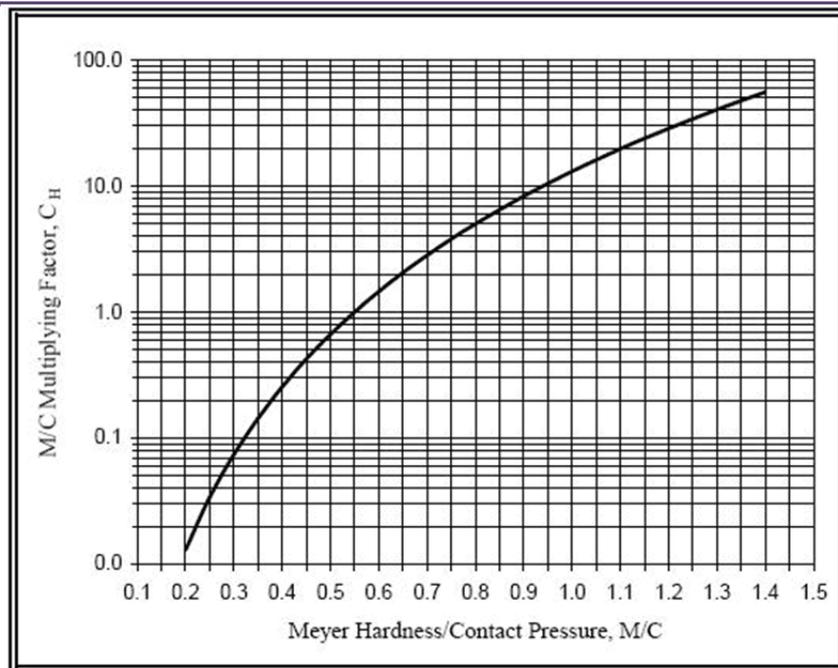


Figura D.10 – Valores de C<sub>H</sub>

Si se prefiere, también se puede utilizar la siguiente expresión:

$$C_H = \left( \frac{M / C}{0.55} \right)^{4.3}$$

Siendo:

- M = Dureza Meyer, en lbs/in<sup>2</sup>
- C = Presión de Contacto, en lbs/in<sup>2</sup>

Se obtiene un valor de C<sub>H</sub> = 1

- Cálculo de C<sub>F</sub>

Para este cálculo, es imprescindible conocer el acabado superficial, f, en μin RMS

Se puede obtener de la siguiente figura:

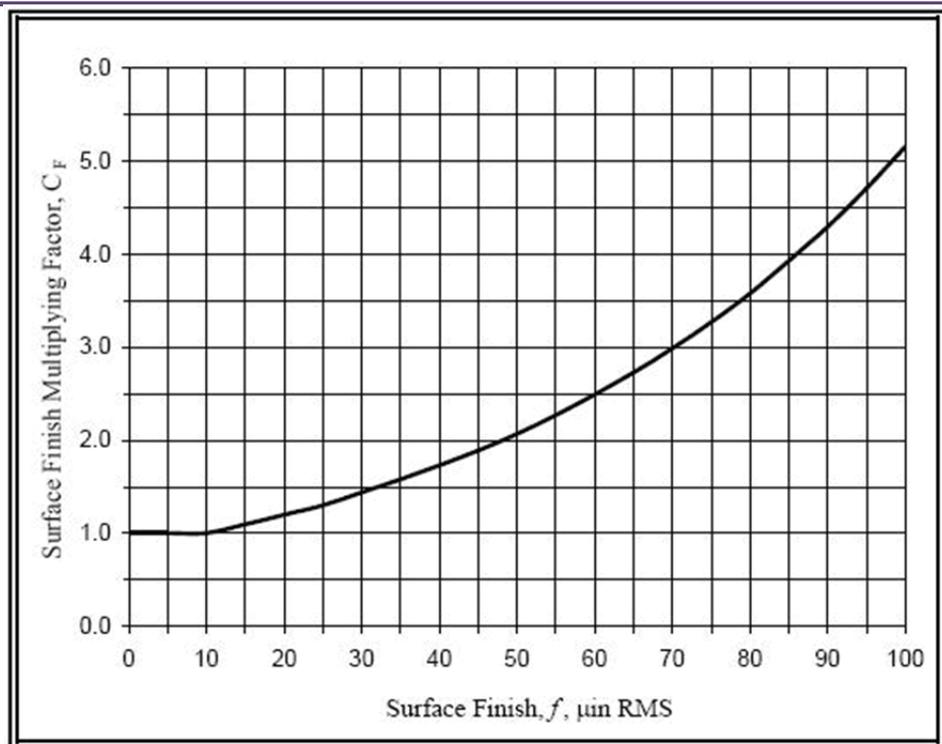


Figura D.11 – Valores de  $C_f$

O mediante una de las siguientes expresiones:

$$\text{Si } f \leq 10 \mu\text{in}, C_f = 1$$

$$\text{Si } f > 10 \mu\text{in}, C_f = \frac{1}{2^{((10-f)/38)}}$$

Finalmente, se obtiene un valor de  $C_f = 1$

- Cálculo de  $C_v$

Este valor se calcula igual que el apartado con el mismo nombre de coeficiente del punto anterior, es decir, para cálculo de la tasa de fallo de válvulas, por lo que no se considera necesario volver a exponerlo.

Se obtiene un valor de  $C_v = 462.9$

- Cálculo de  $C_T$

El valor del coeficiente debido a los efectos de temperatura sale de la siguiente gráfica:

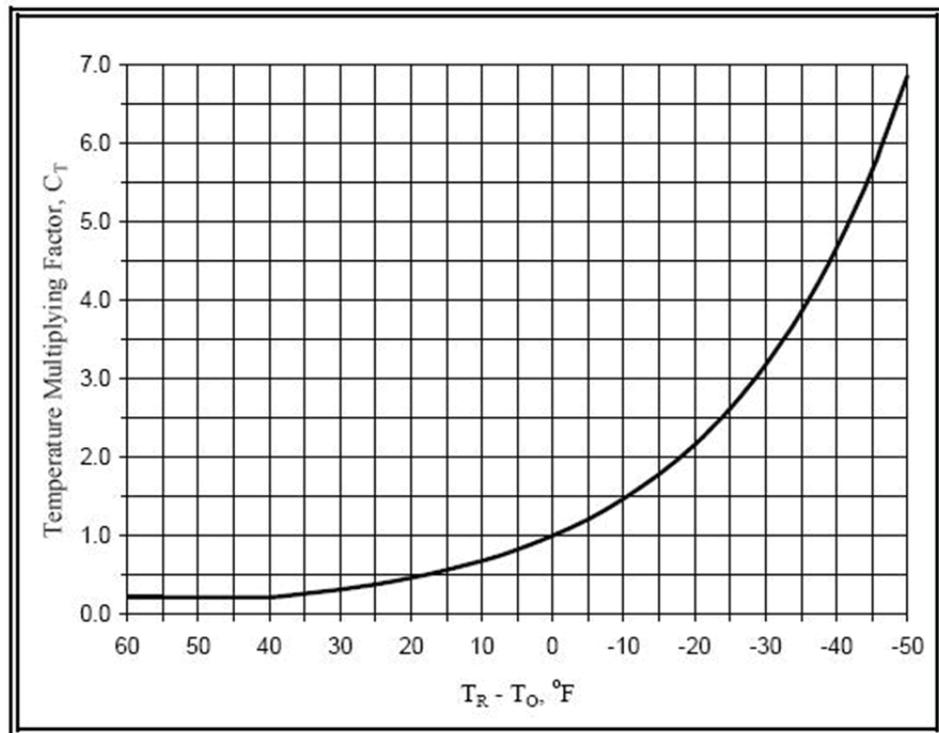


Figura D.12 – Valores de  $C_T$  en juntas

Para hacerlo de un modo más exacto, se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$C_T = \frac{1}{2^t} \text{ siendo } t = \frac{T_R - T_0}{18} \text{ si } (T_R - T_0) \leq 40 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$C_T = 0.21 \text{ si } (T_R - T_0) > 40 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$T_R$  = Temperatura nominal de la junta

SEAL MATERIAL	$T_R$ ( $^\circ\text{F}$ )
Natural rubber	160
Ethylene propylene	250
Neoprene	250
Nitrile	250
Polyacrylate	300
Fluorosilicon	450
Fluorocarbon	475
Silicon rubbers	450
Butyl rubber	250
Urethane	210
Fluroelastomers	500
Fluroplastics	500
Leather	200
Impregnated poromeric material	250

Tabla D.9 – Valores de  $T_R$  de algunos materiales

---

$T_o$  = Temperatura de operación de la junta

Tras calcularlo, se tiene un valor de  $C_T = 0.21$

- Cálculo de  $C_N$

Se calcula siguiendo los mismos pasos que para el coeficiente con el mismo nombre para válvulas.

El resultado es  $C_N = 2,69$

- Cálculo de  $C_{PV}$

El cálculo de este valor se realiza mediante:

Si la velocidad de la junta < 800 rpm o 600 ft/min  $\rightarrow C_{PV} = 1$

Si es mayor, se tiene que aplicar la siguiente ecuación:

$$C_{PV} = \frac{PV_{OP}}{PV_{DS}}$$

Siendo:

- $PV_{OP}$  el valor de PV de operación
- $PV_{DS}$  el valor de PV de diseño

El valor de PV se obtiene despejándolo de la expresión:

$$Q_s = 0.077 \cdot PV \cdot \mu \cdot a_o$$

Siendo cada uno de estos términos:

- $Q_s$  = calor de entrada a la junta, BTU/hora
- $\mu$  = coeficiente de fricción
- $a_o$  = área de la cara de la junta, pulgadas<sup>2</sup>

Con esto, se obtiene un valor de  $C_{PV} = 0,5$

Finalmente, después de los cálculos anteriores, se está en disposición de calcular la tasa de fallo correspondiente a las juntas:

$\lambda_{SE} = 58,6$ Fallos/Millón de horas
--

Cálculo de  $\lambda_{SH}$

En este último apartado, se resolverá el cálculo de la tasa de fallo del eje del compresor. Se tiene que resolver la siguiente expresión:

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

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

Tal y como se ha ido haciendo a lo largo de este anexo, se va a proceder a calcular cada uno de estos términos individualmente.

- Cálculo de  $\lambda_{SH,B}$

El cálculo de este término se realiza resolviendo la siguiente ecuación:

$$\lambda_{SH,B} = \frac{1}{N}$$

Siendo N el número de ciclos para el fallo a la tensión  $S_{ED}$  (Límite de dureza, en lbs/in<sup>2</sup>).

Alguno de los valores de  $S_{ED}$  para algunos materiales se muestra en la tabla siguiente:

MATERIAL	ENDURANCE LIMIT $S_{ED}$
Steel, $\sigma_{T,ult} \leq 200$ kpsi	0.50 $\sigma_{T,ult}$
Steel, $\sigma_{T,ult} > 200$ kpsi	100 kpsi
Magnesium	0.35 $\sigma_{T,ult}$
Nonferrous Alloy	0.35 $\sigma_{T,ult}$
Aluminum Alloy (wrought)	0.40 $\sigma_{T,ult}$
Aluminum Alloy (cast)	0.30 $\sigma_{T,ult}$

**Tabla D.10 – Valores de  $S_{ED}$  de algunos materiales**

Tras ver lo anterior, el valor de  $\lambda_{SH,B} = 2.22E-7$  fallos/Millón de ciclos

- Cálculo de  $C_f$

El valor lo obtenemos de la siguiente tabla:

FINISH	$C_f$
Polished	1.0
Ground	0.89
Hot Rolled	$0.94 - 0.0046 T_s + 8.37 \times 10^{-6} (T_s)^2$
Machined or Cold Drawn	$1.07 - 0.0051 T_s + 2.21 \times 10^{-5} (T_s)^2 - 3.57 \times 10^{-8} (T_s)^3$
Forged	$0.75 - 4.06 \times 10^{-3} T_s + 7.58 \times 10^{-6} (T_s)^2$

Tabla D.11 – Valores de  $C_f$  en ejes

Siendo  $T_s$  = resistencia a la tracción, en kpsi

Se obtiene un valor de  $C_f = 0,89$

- Cálculo de  $C_T$

El valor del coeficiente de temperatura se calcula resolviendo una de las siguientes ecuaciones:

$$\text{Si } T_{AT} > 160 \text{ } ^\circ\text{F}, C_T = \frac{460 + T_{AT}}{620}$$

$$\text{Si } T_{AT} \leq 160 \text{ } ^\circ\text{F}, C_T = 1$$

Tras esto, se llega a  $C_T = 1$

- Cálculo de  $C_{DY}$

El cálculo de este coeficiente resulta algo más complicado, se tiene que resolver la siguiente ecuación:

$$C_{DY} = \frac{0.0043 \cdot F}{E \cdot b} \left[ \frac{X^3}{I_X} + \frac{L^3}{I_L} + \frac{M^3}{I_M} + \frac{N^3}{I_N} \right]$$

Siendo y calculándose cada uno de estos términos como:

- $F$  = peso de la carga o fuerza radial, en lb.
- $E$  = módulo de elasticidad del material, en lbs/in<sup>2</sup>. Algunos valores se muestran a continuación:

Shaft Material	Tensile Strength (Ultimate) $\sigma_u$ ksi	Endurance Strength $\sigma_e$ ksi	$\sigma_e / \sigma_u$	Modulus of Elasticity E mpsi
Alloy steel	100 - 240	44 - 106	0.44	30
Stainless steel	80 - 230	24 - 69	0.30	29
High carbon steel	90-210	39 - 90	0.43	30
Cast steel, carbon	70 - 100	35 - 50	0.50	30
Low alloy cast steel	70 - 200	35 - 100	0.50	30
Cast aluminum	20 - 48	8 - 18	0.38	10.3
Wrought aluminum	22 - 83	8 - 29	0.35	10.0 – 10.6

Tabla D.12 – Valores útiles de algunos materiales para ejes

- $b$  = desviación permitida del eje, en pulgadas. Se muestra una tabla a continuación.

Application	Allowable Shaft Deflection $b$ , inches *
Actuator	0.007
Compressor	0.025
Motor	0.010
Pump	0.007

Tabla D.13 – Valores de desviación permitida,  $b$

- $I$  = Momento de inercia del eje,  $(\pi*d^4/64)$ ,  $in^4$
- $X, L, M, N$  = longitud de cada tramo del eje, en pulgadas. Se muestra la siguiente figura para comprenderlo mejor:

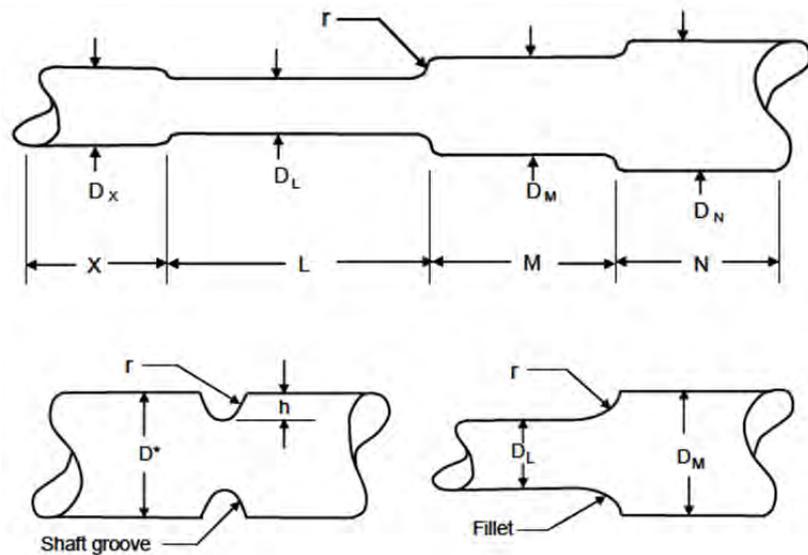


Figura D.13 – Longitud y Diámetro de un eje

Tras la explicación anterior, se obtiene  $C_{DY} = 160$

- Cálculo de  $C_{SC}$

Este factor consta de dos partes, tal y como se muestra en la siguiente ecuación:

$$C_{SC} = C_{SC,R} + C_{SC,G}$$

Siendo:

- $C_{SC,R}$  = factor de concentración de tensiones respecto a la transmisión entre las diferentes secciones del eje.

Se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_{SC,R} = \left(\frac{0,3}{r/d}\right)^{0,2} \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^{\left(1-\frac{r}{d}\right)}$$

Siendo

- $r$  = radio de paso entre secciones o de redondeo, en pulgadas
- $d$  = diámetro de transición entre secciones, en pulgadas
- $D$  = diámetro inicial del eje, en pulgadas
- $C_{SC,G}$  = factor debido a los surcos del eje. Se obtiene de la siguiente tabla:

h/D	h/r						
	0.1	0.5	1.0	2.0	4.0	6.0	8.0
0.05	1.10	1.45	1.60	2.00	2.05	---	---
0.10	1.00	1.27	1.40	1.70	2.00	2.25	---
0.20	1.00	1.10	1.20	1.31	1.60	1.75	2.00
0.30	1.00	1.10	1.10	1.20	1.35	1.48	1.55

Tabla D. 14 – Valores de  $C_{SC,G}$

Si no hay surcos, el valor será igual a 1.

El valor h indica la profundidad del surco. Ver la figura D.13 para comprenderlo mejor.

Finalmente, el valor de  $C_{SC} = 1,66$

Finalmente, después de los cálculos anteriores, se está en disposición de calcular la tasa de fallo correspondiente al eje:

$$\lambda_{SH} = 0,529 \text{ Fallos/Millón de horas}$$

Ahora ya, tras los cálculos de todas las tasas de fallo parciales, se calcula la tasa de fallo perteneciente al compresor.

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

Una vez calculada la tasa de fallo, junto con los supuestos de tasa de fallo constante y de utilización de una distribución exponencial, se puede calcular la fiabilidad y la no fiabilidad o probabilidad de fallo mediante las siguientes expresiones:

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

$$UR(t) = 1 - R(t) = 1 - \int f(t)dt = 1 - e^{-\lambda \cdot t}$$

Una vez calculados los diferentes valores de fiabilidad en función del tiempo de operación o en función de los kilómetros recorridos, se pueden obtener la siguiente gráfica:

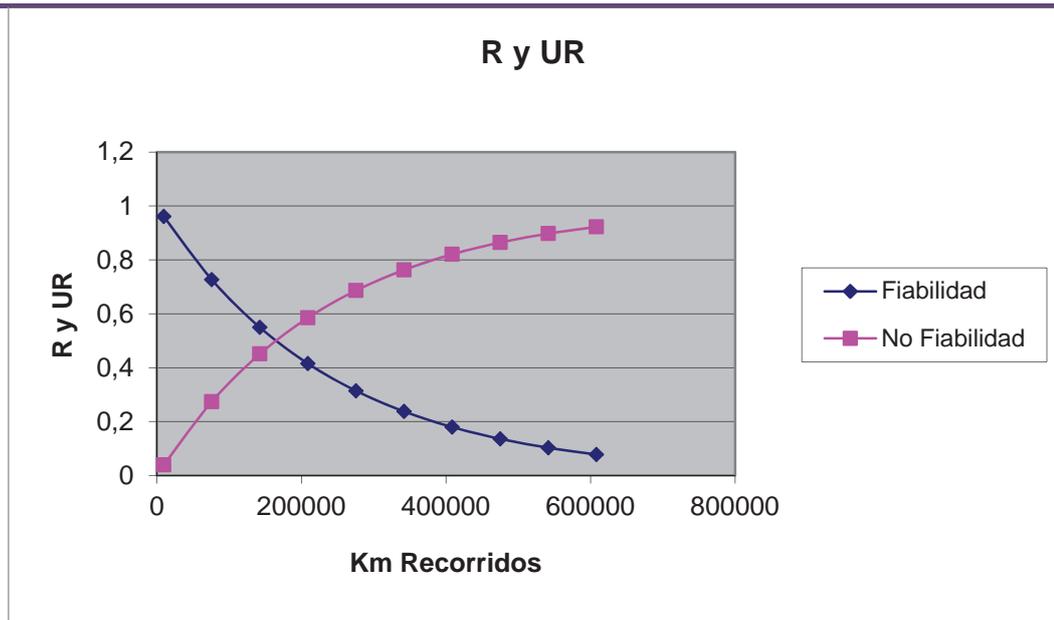


Figura D.14 – R y UR Compresor Teórico

Quedando así resuelto el problema inicial.

- Cálculos para el compresor de forma experimental

En este punto del anexo, se expone cómo calcular la tasa de fallo de un equipo completo gracias a unos datos de partida de tipo experimental. Es el método más extendido, ya que tal y como se ha podido apreciar en el punto anterior, el cálculo teórico es muy costoso y conlleva un tiempo muy valioso.

Las formas más usuales de aplicar este tipo de cálculo son:

- Gracias a bases de datos, propias o externas, en las que se muestra cuando ha fallado un equipo y el tiempo que llevaba en funcionamiento, para así poder calcular el tiempo medio entre fallos.
- A través de manuales como pueden ser el MIL-STD... O EL NPRD-95. En ellos se muestra un tiempo medio entre fallos o una tasa de fallo propia de cada tipo de componente, por lo que habrá que descomponer nuestro equipo y posteriormente realizar un diagrama de bloques de fiabilidad.

Una vez expuesto esto, se va a proceder a calcular la fiabilidad de un compresor siguiendo uno de estos métodos.

Se asume que se calculará la fiabilidad a través de la distribución exponencial, por lo que la tasa de fallo será constante.

En el ejemplo que se va a realizar, se procederá a través de datos de históricos.

En primer lugar, hay que calcular la tasa de fallo. Se va a proceder de dos formas diferentes, ya que los datos pueden ser dados de diferentes formas:

- Se va a suponer que se conocen el momento de fallo de una serie de equipos idénticos. Se va a seguir el procedimiento de cálculo según “Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment” de la N.A.S.A. Tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Equipo	Tiempo hasta Fallo (h)
1	5670
2	6430
3	7230
4	8976
5	12450

Tabla D.15 – Momento de Fallo de Compresor

Además, se conoce que cada equipo estuvo en modo de operación durante 12450 horas después de fallo.

La tasa de fallo y por consiguiente, el MTBF se calculará como:

$$\lambda = cte = \frac{N^{\circ} \text{ Fallos}}{\text{Total } \_ \text{ Horas } \_ \text{ Operación}}$$

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

Según esto, se obtienen unos valores de  $\lambda = 4,85E-5$  Fallos/Hora y un MTBF = 20601,2 horas

Como se puede apreciar, este método resulta mucho más sencillo que el cálculo mediante una forma teórica.

- En este segundo caso, y para ver cómo se puede realizar de una forma diferente, se supondrá que se obtiene cuántos fallos ha habido en función del número de horas de operación para un conjunto de equipos. La siguiente tabla muestra cómo son estos datos:

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 D.16 – Fallos Vs Tiempo

Gracias a estos datos y suponiendo una distribución exponencial de los fallos, se agrega una línea de tendencia y de ahí podemos despejar la tasa de fallos.

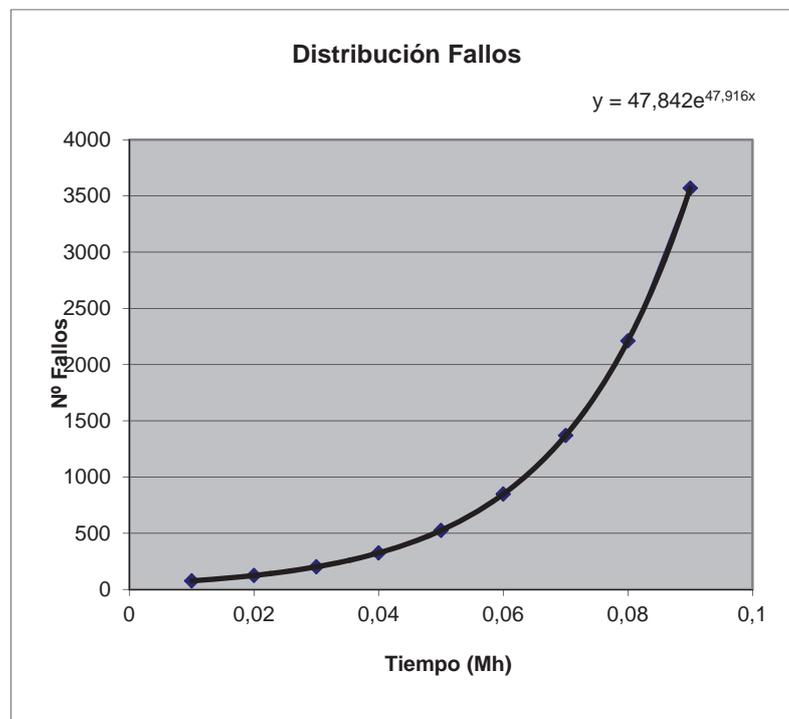


Figura D.15 – Estimación tasa de fallo experimental

Obtenemos una  $\lambda = 4,78E-5$  Fallos/Hora y por consiguiente, un MTBF = 20902,14 horas

Una vez expuesto cómo calcular la tasa de fallo de una forma experimental, se pasa al cálculo de la fiabilidad.

Se toma la tasa de fallo calculada en el supuesto número 1, es decir,  $\lambda = 4,85E-5$  Fallos/Hora

En cálculo de la fiabilidad, tal y cómo se ha expuesto en la memoria, se puede expresar en función de las horas de operación o, si conocemos los datos para el cálculo de la velocidad

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

media, en función de los kilómetros recorridos. Para el cálculo se supondrá una velocidad media de 19 km/h.

La fórmula general de la fiabilidad, y supuesta una tasa de fallos constante se queda:

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

En la siguiente figura muestra estas dos formas de representarla, así como la representación de la "No Fiabilidad":

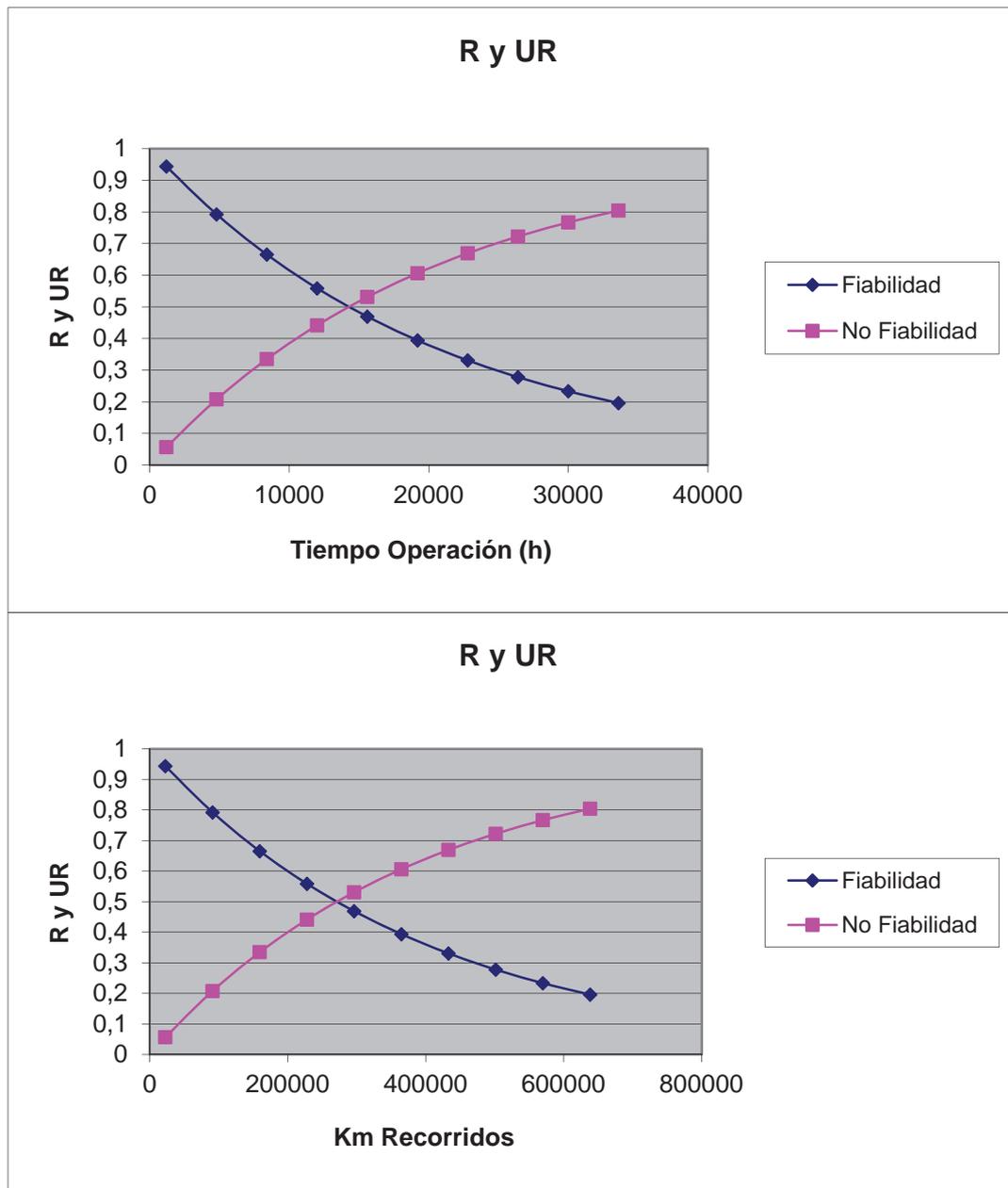


Figura D.16 – R y UR Vs horas (sup) y R y UR Vs Km (inf)

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

Para finalizar este punto del Anexo D, se calcularán el número de operaciones anuales de mantenimiento preventivo y de mantenimiento correcto, en función de la fiabilidad y la no fiabilidad respectivamente.

Se supone unos km anuales de 160.000 km.

$$N^{\circ} P = \frac{\text{Horas}_{\text{Operación}}_{\text{Anuales}}}{\text{Horas}_{\text{Operación}}_{f(R)}} = \frac{\text{Km}_{\text{Anuales}}}{\text{Km}_{f(R)}}$$

$$N^{\circ} C = \frac{\text{Horas}_{\text{Operación}}_{\text{Anuales}}}{\text{Horas}_{\text{Operación}}_{f(UR)}} = \frac{\text{Km}_{\text{Anuales}}}{\text{Km}_{f(UR)}}$$

Se muestran los resultados en la siguiente tabla:

R	NºP	UR	NºC
0,1	0,18	0,9	3,88
0,2	0,25	0,8	1,83
0,3	0,34	0,7	1,15
0,4	0,45	0,6	0,80
0,5	0,59	0,5	0,59
0,6	0,80	0,4	0,45
0,7	1,15	0,3	0,34
0,8	1,83	0,2	0,25
0,9	3,88	0,1	0,18

Tabla D.17 – Nº P y Nº C en función de R y UR

Estos valores también los podemos representar gráficamente:

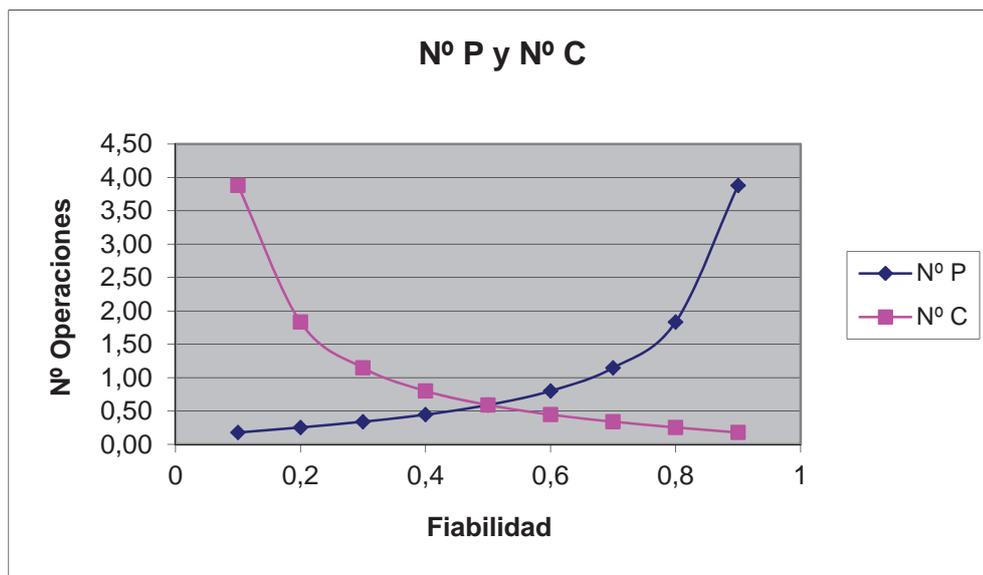


Figura D.17 – Gráfica con Nº P y Nº C en función de R

Esta tabla por si sola tampoco aporta una gran información, ya que es solamente el modelo y esto es una aplicación de una doble exponencial. Al introducir los términos de coste se comprobará como se va modificando esta curva, y será entonces cuando se pueda establecer un punto donde el coste de mantenimiento sea mínimo, según el modelo propuesto.

- Cálculo del equipo de aire acondicionado

En este último punto del Anexo D se va a exponer cómo se han calculado los costes del equipo de climatización de un tren en función de la fiabilidad.

Se tiene que empezar de alguna de las dos formas explicadas en los apartados anteriores, pero en este caso, y dado que es un equipo compacto, es el mismo fabricante el que puede proporcionarnos una tasa de fallo del equipo y un tiempo medio entre fallos.



En ella se ve como se descompone el equipo en elementos más sencillos y como al final, se opta por la suma de las tasas de fallo individuales, para llegar a la tasa de fallo del equipo completo.

No se incluye una hoja real, por temas de confidencialidad.

Como se puede apreciar la tasa de fallo es:  $\lambda_{\text{climatización}} = 1,029E-4$  fallos/hora de operación.

El siguiente paso consiste en el cálculo de la fiabilidad y la no fiabilidad, tal y como se ha realizado en los dos puntos anteriores del presente anexo. Se muestra la figura con la variación de la fiabilidad y la no fiabilidad del equipo de climatización.

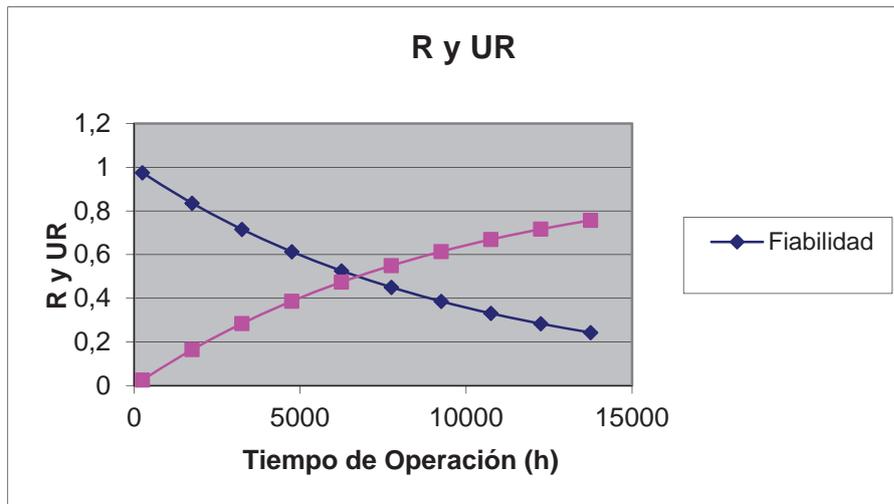


Figura D.19 – R y UR del sistema de climatización

Una vez realizado esto, se puede proceder al cálculo del número de operaciones de mantenimiento preventivo y de mantenimiento correctivo a realizar a lo largo de un año. Se muestra en la figura inferior.

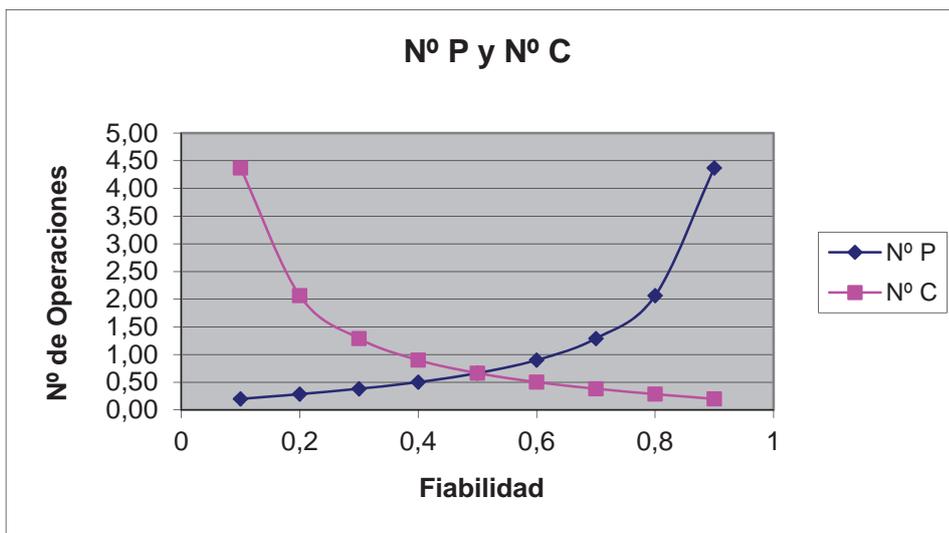


Figura D.20 – Nº P y Nº C frente a R

MODELO DE ANÁLISIS DE PLANES DE MANTENIMIENTO DE MATERIAL RODANTE FERROVIARIO

Hasta aquí, el procedimiento ha sido igual que en los puntos anteriores. Ahora se toman el número de operaciones de mantenimiento preventivo y el número de operaciones de mantenimiento correctivo y las introducimos para lograr traducir esos términos a costes. A continuación una imagen de dónde introducir esos datos:

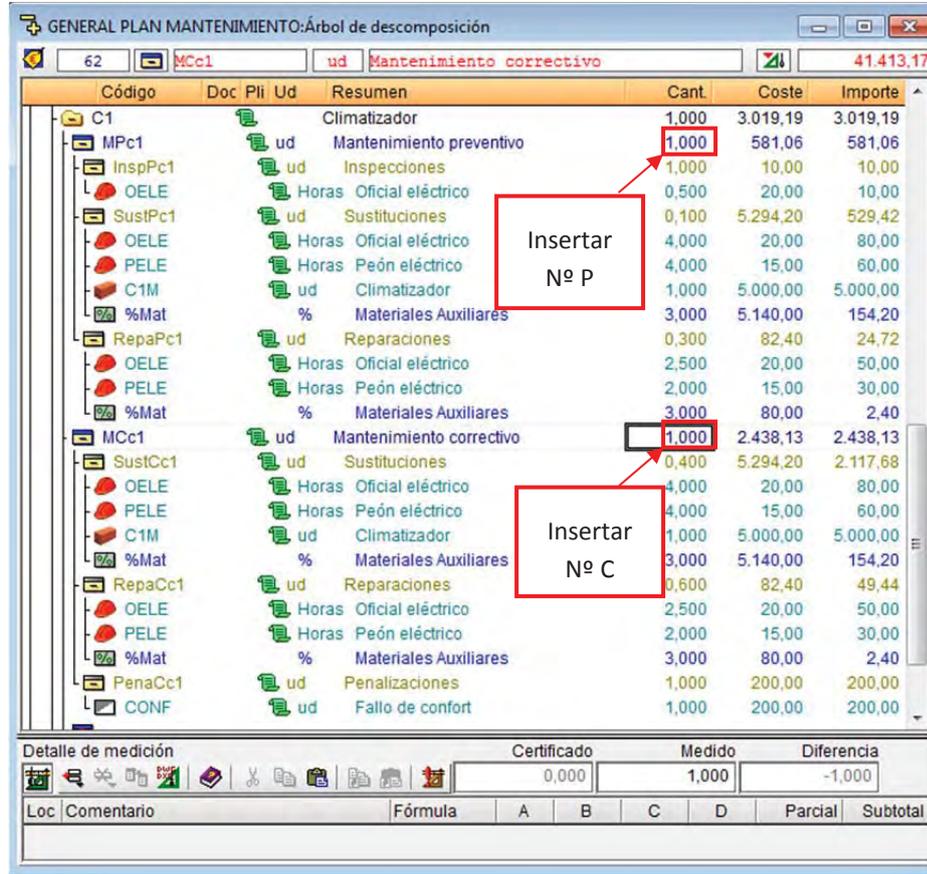


Figura D.21 – Representación de Introducción de Nº P y Nº C

Conforme se van introduciendo los datos citados anteriormente, se puede ir creando la siguiente tabla:

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 D.18 – Costes del Mantenimiento en función de la fiabilidad

Y si se representa esta tabla, se puede apreciar un punto donde el coste es mínimo.

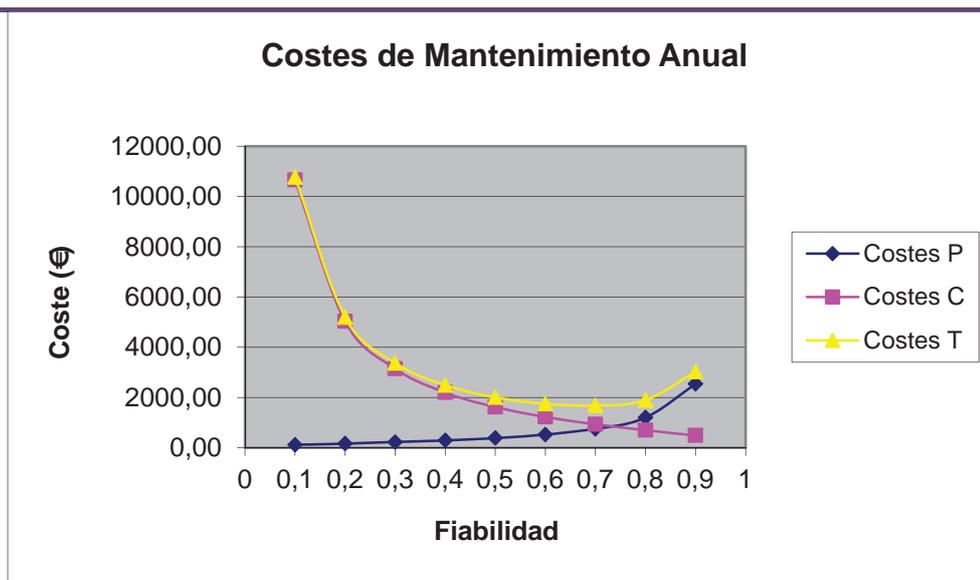


Figura D.22 – Representación Costes de Mantenimiento

Dada la necesidad de comprobar que los resultados son aceptables, se decide introducir un índice, llamado Índice de Confianza, a la hora del cálculo de las operaciones de mantenimiento preventivo y de mantenimiento correctivo, para ver que ocurre si el cálculo se desvía debido a alguna suposición errónea o algún dato mal adquirido.

La formulación a utilizar será la siguiente:

$$N^{\circ} P = \frac{\text{Horas}_{\text{Operación}}_{\text{Anuales}}}{\text{Horas}_{\text{Operación}}_{f(R)} \cdot I} = \frac{\text{Km}_{\text{Anuales}}}{\text{Km}_{f(R)} \cdot I}$$

$$N^{\circ} C = \frac{\text{Horas}_{\text{Operación}}_{\text{Anuales}}}{\text{Horas}_{\text{Operación}}_{f(UR)} \cdot I} = \frac{\text{Km}_{\text{Anuales}}}{\text{Km}_{f(UR)} \cdot I}$$

El Índice de Confianza, toma valores desde 0.1 hasta 1. Se trata de un índice que analiza la confianza el cálculo realizado, creyendo que se recorrerán menos kilómetros de los esperados, ya que hace que los kilómetros capaces de recorrer a una fiabilidad dada, sean menores de los teóricos.

A raíz de lo expuesto 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 D.19 – Tabla de Análisis de Sensibilidad

Y si representamos en una gráfica 3D, siendo los ejes el coste (€), la fiabilidad y el Índice de Pesimismo, se obtiene lo siguiente:

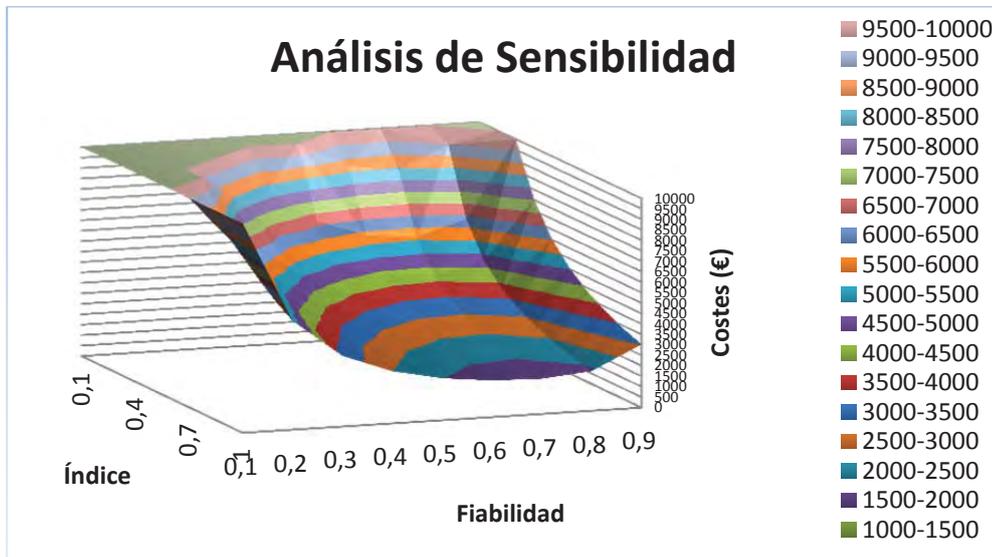


Figura D.23 – Representación R frente a Índice Vs Coste

Las conclusiones referentes a esta figura, así como del estudio, están expuestas en la memoria del presente PFC.

## LISTA DE TABLAS

### MEMORIA

Tabla 1 – Desglose de los costes de un sistema de climatización	19
Tabla 2 – Datos de fallos de un compresor en función del tiempo	28
Tabla 3 – Costes del Mantenimiento en función de R de un sistema de climatización	33
Tabla 4 – Costes en función del Índice y de la Fiabilidad	35

### ANEXO A

Tabla A.1 – Objetivos del mantenimiento	42
Tabla A.2 – Clase de Mantenimiento y equipos	43
Tabla A.3 – Tipos de Ensayos Predictivos Vs Equipos	45
Tabla A.4 – Componentes del Pantógrafo	54
Tabla A.5 - Los sectores y su mantenimiento	79
Tabla A.6 - Comparativa de softwares de gestión de	81

### ANEXO B

Tabla B.1–Matriz de Criticidad	97
Tabla B.2–Ejemplo de formato de un AMFE	98
Tabla B.3–Normativa de Interés	106

### ANEXO C

Tabla C.1 - Tabla de características generales.	119
Tabla C.2 - Tabla de comparación estructuras	120
Tabla C.3 - Comparación de intercambiabilidad de datos	122
Tabla C.4 - Comparación de precisión de resultados	123
Tabla C.5 - Tabla de características de contabilidad	123
Tabla C.6 - Posibles combinaciones entre cambios y reparaciones	125
Tabla C.7 - Apariencia de la introducción de datos	125

### ANEXO D

Tabla D.1 – Tasa de fallo para conductores	128
Tabla D.2 – Valores de CSF	129
Tabla D.3 – Factor por Fiabilidad	131
Tabla D.4 – Valores de CSF en función de la carga	134
Tabla D.5 – Valores de CC	134
Tabla D.6 – Valores de $C_v = f(T, \text{Fluido})$	138
Tabla D.7 – Valores de N10	138
Tabla D.8 – Valores de $C_\mu$	140
Tabla D.9 – Valores de TR de algunos materiales	146
Tabla D.10 – Valores de SED de algunos materiales	148
Tabla D.11 – Valores de $C_f$ en ejes	149
Tabla D.12 – Valores útiles de algunos materiales para ejes	150
Tabla D.13 – Valores de desviación permitida, b	150
Tabla D.14 – Valores de CSC,G	152
Tabla D.15 – Momento de Fallo de Compresor	154
Tabla D.16 – Fallos Vs Tiempo	155
Tabla D.17 – N° P y N° C en función de R y UR	157
Tabla D.18 – Costes del Mantenimiento en función de la fiabilidad	161
Tabla D.19 – Tabla de Análisis de Sensibilidad	162

## LISTA DE FIGURAS

### MEMORIA

Figura 1 – Mantenimiento según AFNOR	9
Figura 2 – Costes Mantenimiento Preventivo y Correctivo	10
Figura 3 – Relación entre fiabilidad y disponibilidad	11
Figura 4 – Descomposición del material rodante es sistemas	13
Figura 5 – Descomposición de los sistemas	14
Figura 6 – Descomposición de los elementos de frenado	15
Figura 7 – Descomposición de las Operaciones de Mantenimiento	16
Figura 8 – Base de Datos CBS	21
Figura 9 – Base de Costes	22
Figura 10 – Imagen completa de Arquímedes	22
Figura 11 – Fiabilidad frente a tiempo	24
Figura 12 – Curva de la bañera	25
Figura 13 – Imagen obtenida del NPRD - 95	28
Figura 14 – Nº de fallos de un Compresor en función del tiempo	29
Figura 15 – Nº de operaciones de mantenimiento preventivo anuales en un Compresor	31
Figura 16 – Nº de operaciones de mantenimiento correctivo anuales en un Compresor	32
Figura 17 – Nº P y Nº C anual de un sistema de climatización	33
Figura18 – Costes del Mantenimiento en función de R de un sistema de climatización	34
Figura11 – Análisis de Sensibilidad. Imagen 1	36
Figura12 – Análisis de Sensibilidad. Imagen 2	36
Figura13 – Análisis de Sensibilidad. Imagen 3	37

### ANEXO A

Figura A.1 – Tipos de Mantenimiento según N.A.S.A.	46
Figura A.2 – Sistema de Suspensión	47
Figura A.3 – Sistema de Frenos	48
Figura A.4 - Acoplamiento automático	50
Figura A.5 - Sistemas de acoplamiento por gomas entre coches	50
Figura A.6 - Sistemas de absorción de choques	51
Figura A.7 – Bomba Inyectora	52
Figura A.8 – Radiador de motor	53
Figura A.9 – Esquema de un Pantógrafo de Semitijera	54
Figura A.10 – Fotografía de un pantógrafo	55
Figura A.11 - Compresor	55
Figura A.12 - Sistema de distribución de presión	56
Figura A.13 - Sistema puertas de doble movimiento	58
Figura A.14 - Estructura de un coche en construcción	59
Figura A.15 - Sistema de rodadura	60
Figura A.16 – Bogie motor	63
Figura A.17 – Convertidor de TraccionTrainElec	63
Figura A.18 – Esquema de un Convertidor según TrainElec	64
Figura A.19 – Fotografía de un Sistema de Climatización	65
Figura A.20 – Imagen de un sistema de Climatización	65
Figura A.21 – Sistema de Baterías	66
Figura A.22 – Interior de un Disyuntor	67
Figura A.23 – Sistemas de Pararrayos	68
Figura A.24 – Convertidor de Auxiliares	69
Figura A.25 – Iluminación Interior de un tren	70
Figura A.26 – Iluminación Exterior de un tranvía	70

Figura A.27 - Asientos vehículo ferroviario	71
Figura A.28 – Imagen de suelo de un tren (pavimento)	71
Figura A.29 – Fuelle de un tranvía	72
Figura A.30 – Pasamanos de un tren	72
Figura A.31 - Reparto de talleres en la geografía Española	74
Figura A.32 - Fotografía torno de foso	75
Figura A.33 - Máquinas de limpieza de suelos	76
Figura A.34 - Túnel de lavado	77
Figura A.35 - División de un taller ferroviario	77

## ANEXO B

Figura B.1 – RAMS Ferroviaria	85
Figura B.2 – Función Densidad de Probabilidad (Exponencial) Vs Tiempo	87
Figura B.3 – Variación FDP (Weibull) $f(t_0)$ Vs Tiempo	88
Figura B.4 - Variación FDP (Weibull) $f(\beta)$ Vs Tiempo	89
Figura B.5 - Variación FDP (Weibull) $f(\eta)$ Vs Tiempo	89
Figura B.6 - Variación FDP (Normal) $f(\sigma)$ Vs Tiempo	90
Figura B.7 - Variación FDP (Binomial) $f(p)$ Vs n	91
Figura B.8 - Variación FDP (Poisson) $f(\lambda)$ Vs k	92
Figura B.9–Comportamiento de los fallos en función del tiempo	94
Figura B.10–Fallo por degradación	95
Figura B.11–Fallo repentino	95
Figura B.12–Proceso de Creación de un AMFE	98
Figura B.13–Ejemplo de AAF	100
Figura B.14–Ejemplo de AAF en serie	101
Figura B.15–Ejemplo de AAF en paralelo	101
Figura B.16–Ejemplo de Diagrama de Fiabilidad	102
Figura B.17–Resumen Cálculo por Diagrama de Fiabilidad	103
Figura B.18–Proceso de Implantación de RCM	104
Figura B.19–Mejora Continua del RCM	105
Figura B.20–Logo Weibull ++	107
Figura B.21–Logo XFMEA	108
Figura B.22–Logo $\lambda$ predict	109
Figura B.23–Logo BlockSim	110
Figura B.24–Logo Isograph	111
Figura B.25–Logo Item Software	111

## ANEXO C

Figura C.1 – Ciclo de vida RAMS	113
Figura C.2 – Fases Ciclo de Vida Vs LCC	115
Figura C.3 – Mantenimiento Vs LCC	116
Figura C.4 - Gráfica intuitiva del proceso de modela LCC	117
Figura C.5 - Apariencia de D-LCC (Cálculo de costes mediante variables)	120
Figura C.6 - Ejemplo de visión gráficos en el entorno CATALOC	121
Figura C.7 - Esquema de funcionamiento UNILIFE	124

## ANEXO D

Figura D.1 – Clasificación Genérica de los Compresores	127
Figura D.2 – Valores de CCW	132
Figura D.3 – Valores de Ct	133
Figura D.4 – Valores de CP	136
Figura D.5 – Valores de CQ	137
Figura D.6 – Valores de CB	139
Figura D.7 – Valores de CW	141

---

Figura D.8 – Valores de CP en juntas	142
Figura D.9 – Valores de CDL	143
Figura D.10 – Valores de CH	144
Figura D.11 – Valores de Cf	145
Figura D.12 – Valores de CT en juntas	146
Figura D.13 – Longitud y Diámetro de un eje	151
Figura D.14 – R y UR Compresor Teórico	153
Figura D.15 – Estimación tasa de fallo experimental	155
Figura D.16 – R y UR Vs horas (sup) y R y UR Vs Km (inf)	156
Figura D.17 – Gráfica con N° P y N° C en función de R	157
Figura D.18 – Formato de una hoja de Estudio RAMS	159
Figura D.19 – R y UR del sistema de climatización	160
Figura D.20 – N° P y N° C frente a R	160
Figura D.21 – Representación de Introducción de N° P y N° C	161
Figura D.22 – Representación Costes de Mantenimiento	162
Figura D.23 – Representación R frente a Índice Vs Coste	163

## BIBLIOGRAFÍA

---

### ARTÍCULOS

- Z. Vintř, University of Defence, Czech Republic, M. Vintř Brno University of Technology Brno, Czech Republic Reliability and Safety of Rail Vehicle Electromechanical Systems, 12th IFToMM World Congress, Besançon (France), June18-21, 2007
- Hyun-Kyu Jun , Jae-Hoon Kim , Jun-Seo Park. 'Maintenance cost prediction model for railway vehicle'. Department of Vehicle Track Research, Korea Railroad Research Institute, 360-1 Woram-dong, Uiwang-city.
- Daneka y M. Richtara. 'New Approaches to the Life Cycle Costs Philosophy of the Railway Vehicles'. Institute of Transport, VSB – Technical University of Ostrava 17. listopadu 15, Ostrava – Poruba, 708 33, Czech republic.
- Dušan Milutinović, Executive Manager of Rolling Stock Research and Development Serbian Railway, Vojkan Lučanin Professor University of Belgrade Faculty of Mechanical Engineering. Relation between Reliability and Availability of Railway Vehicles, FME Transactions (2005)
- Mineta Transportation Institute Report,. Reliability Centered Maintenance: A Case Study of Railway Transit Maintenance to Achieve Optimal Performance, San José State University, California. 2010
- Felipe Gallardo Quesada. 'Plan de mantenimiento de los trenes de la serie 6000 de metro de Barcelona'. Universitat Politècnica de Catalunya.
- N. Cotaina, J. Carretero et al. Study Of Existing Reliability Centered Maintenance (RCM) Approaches Used In Different Industries. Adepa Paris (France) - UPM Madrid (Spain). Junio 2000
- N.A.S.A.- National Aeronautics And Space Administration. Reliability Centered Maintenance Guide For Facilities And Collateral Equipment 2000
- Jesús A. Royo Sánchez, Mariano Bolea Bitrián, Fernando Torres Leza, Juan José Aguilar Martín. 'Mantenimiento Industrial Integral'.
- David González de la Peña. 'Introducción al cálculo del LCC (life cycle cost) de vehículos ferroviarios'. Anales de mecánica y electricidad / noviembre-diciembre 2004.
- Medardo Yañez, José L. Perdomo, Hernando Gómez de la Vega. 'Ingeniería de la fiabilidad. Pilar fundamental del mantenimiento'. Reliability and Risk Management S.A.

- Adolfo Alcalá. 'Propuesta de un modelo matemático de optimización de costes de mantenimiento preventivo'. CULTCA.

### **NORMAS UNE:**

- UNE-EN-15380 Aplicaciones ferroviarias: Sistema de designación para vehículos ferroviarios
- UNE-EN-61703 Expresiones matemáticas para los términos de fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y de logística del mantenimiento.
- UNE-50126. Aplicaciones ferroviarias. Especificación y demostración de la fiabilidad, la disponibilidad, la mantenibilidad y la seguridad.
- UNE-20-609 Pruebas de fiabilidad en equipos basadas en la distribución exponencial
- UNE-20-654 Guía de mantenibilidad de equipos
- UNE-20-932 ensayos de fiabilidad
- UNE- 200001. Gestión de la confiabilidad. Guía de aplicación.
- UNE- 13460. Mantenimiento, documentos para el mantenimiento
- UNE-EN 60300. Gestión de la confiabilidad
- UNE-EN-60706. Mantenibilidad de equipos
- UNE-EN-60812-Técnicas de análisis de fiabilidad de sistemas. Procedimiento de análisis de los modos de fallo y sus efectos (AMFE)
- UNE-EN-61014 - Programas de crecimiento de la fiabilidad
- UNE-EN-61124 – Ensayos de fiabilidad. Planes de ensayo de conformidad para tasa de fallo constante y para intensidad de fallo constante.
- UNE-EN-61025 – Análisis por árbol de fallos (AAF)
- UNE-EN-62347 - Directrices para especificaciones de confiabilidad de sistemas.

### **NORMA IEC**

- IEC 60300-3-11. Dependability Management – Application Guide – Reliability Centred Maintenance

### **MANUALES MILITARES (Military Handbooks)**

- MIL-HDBK-217 Reliability Prediction of Electronic Equipment
- MIL-HDBK-338 Electronic Reliability Project Handbook
- NSWC-11 Naval Surface Warfare Center. Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment. Última versión año 2011.

**ESTÁNDARS MILITARES:**

- MIL-STD-470 Maintainability Program for Systems and Equipment
- MIL-STD-471 Maintainability Verification / Demonstration / Evaluation
- MIL-STD-721 Definitions of Terms for Reliability and Maintainability
- MIL-STD-756 Reliability Modelling and Prediction
- MIL-STD-781 Reliability Testing for Engineering Development, Qualification and Production
- MIL-STD-785 Reliability Program for Systems and Equipment Development and Production
- MIL-STD-810 Environmental Test Methods and Engineering Guidelines
- MIL-STD-882 System Safety Program Requirements
- MIL-STD-1629 Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis

**OTROS:**

- NPRD-95 Nonelectronics Parts Reliability Data (RIAC, Reliability Information Analysis Center) Última versión, año 2011.
- Failure Mode/Mechanism Distributions. (RIAC, Reliability Information Analysis Center) Última versión, año 1997.