

Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de Organización Industrial

Análisis de la fiabilidad de un equipo con varios
modos de fallo. Cálculo de la curva de
envejecimiento

Autor: Elena Aguado Limones

Tutor: Antonio Sánchez Herguedas

Alicia de los Santos Pineda

Dpto. Organización Industrial y Gestión de
Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2022



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de Organización Industrial

Análisis de la fiabilidad de un equipo con varios modos de fallo. Cálculo de la curva de envejecimiento

Autor:

Elena Aguado Limones

Tutor:

Antonio Sánchez Herguedas

Alicia de los Santos Pineda

Dpto. Organización Industrial y Gestión de Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022

Trabajo Fin de Grado: Análisis de la fiabilidad de un equipo con varios modos de fallo. Cálculo de la curva de envejecimiento

Autor: Elena Aguado Limones

Tutor: Alicia de los Santos Pineda
Antonio Sánchez Herguedas

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis amigos

Agradecimientos

La Escuela Técnica Superior de Ingeniería ha marcado un antes y un después en mi vida. Más allá de lo académico, ponerme al límite durante estos años me ha permitido darme cuenta de que con sacrificio y constancia puedo llegar a dónde quiera.

Quiero agradecer a mi hermano, Enrique, que me ha ayudado en toda esta etapa con su sensatez y experiencia. Gracias Quique, siempre has sido y serás mi ejemplo a seguir.

A mi padre, Enrique, por motivarme a que diera más en los estudios y me superara día a día.

A mi madre, María, por hacerme ver siempre lo positivo y enfocarme cuando me despistaba.

Gracias por estar siempre ahí.

A mis compañeros, jamás olvidaré todos los buenos momentos que vivimos.

A mis tutores, por apoyarme en todo el proyecto.

A mi familia, por hacerme sentir especial y feliz con ellos.

Elena Aguado Limones

Sevilla, 2022

Resumen

La incorporación de nuevas tecnologías en la industria ha mejorado considerablemente los procesos de fabricación permitiendo la producción de productos más específicos, mejorando la calidad y eficacia de estos. Al mismo tiempo, al aumentar la complejidad en los procesos industriales, también se aumentan los riesgos en el sistema, siendo de vital importancia el estudio de la fiabilidad y mantenibilidad. El análisis de la fiabilidad de los equipos es un factor clave en la industria para determinar cuándo realizar un mantenimiento preventivo adecuado. A lo largo del documento, se introducirá todos los factores que influyen en este estudio, centrándonos en el caso de un sistema con diferentes modalidades de fallo. Se presenta por primera vez la curva de envejecimiento de un equipo con varios modos de fallos teniendo en cuenta parámetros propios del desgaste de un dispositivo. Finalmente, se hará estudio de fiabilidad sobre un caso real basado en un motor 12V diésel marino, de 48 litros de desplazamiento y 1500 kW de potencia. Los tres modos de fallo a estudiar es el turbo, la bomba refrigerante y la bomba de agua salada.

Concretamente, en Capítulo 1 se introducirán los orígenes de la fiabilidad y la importancia que tiene en la ingeniería. En Capítulo 2 se definirán conceptos básicos necesarios para comprender qué es la fiabilidad, se introducirá el concepto de mantenimiento preventivo y su estrecha relación con la fiabilidad. En el Capítulo 3 se describirán las distribuciones más utilizadas en fiabilidad, especificando sus características y las situaciones en las se usan. En el Capítulo 4 se describirá la fiabilidad de un sistema constituido por tres modos de fallos y por n-fallos. En el Capítulo 5 se introducirán los conceptos de curva de mantenimiento perfecto e imperfecto y se definirá la curva de envejecimiento para un mantenimiento imperfecto. Finalmente, en el Capítulo 6 se hará estudio de fiabilidad sobre un caso real poniendo en práctica lo visto en los capítulos anteriores. Se calculará la fiabilidad de un equipo con tres modos de fallos mediante la distribución Weibull, el mantenimiento preventivo óptimo para cada modo de fallo y se describirá la curva de envejecimiento perfecto e imperfecto.

Abstract

The incorporation of new technologies in the industry has considerably improved manufacturing processes allowing the production of more specific products, improving their quality and efficiency. At the same time, as the complexity of industrial processes increases, so do the risks in the system, and the study of reliability and maintainability is of vital importance. The analysis of equipment reliability is a key factor in the industry to determine when to perform adequate preventive maintenance. Throughout the paper, all the factors that influence this study will be introduced, focusing on the case of a system with different failure modes. For the first time, the aging curve of an equipment with several failure modes will be presented, taking into account parameters typical of the wear and tear of a device. Finally, a reliability study will be made on a real case based on a 12V marine diesel engine of 48 liters displacement and 1500 kW power. The three failure modes to be studied are the turbo, the coolant pump and the saltwater pump.

Specifically, Chapter 1 will introduce the origins of reliability and its importance in engineering. Chapter 2 will define basic concepts necessary to understand what reliability is, will introduce the concept of preventive maintenance and its close relationship with reliability. Chapter 3 will describe the most commonly used distributions in reliability, specifying their characteristics and the situations in which they are used. Chapter 4 will describe the reliability of a system consisting of three failure modes and n -failures. In Chapter 5, the concepts of perfect and imperfect maintenance curve will be introduced and the aging curve for imperfect maintenance will be defined. Finally, in Chapter 6, a reliability study will be carried out on a real case, putting into practice what has been seen in the previous chapters. The reliability of an equipment with three failure modes will be calculated using the Weibull distribution, the optimal preventive maintenance for each failure mode and the perfect and imperfect aging curve will be described.

Índice

Agradecimientos	9
Resumen	11
Abstract	13
Índice	15
Índice de Tablas	17
Índice de Figuras	19
Objetivo	21
1 Fiabilidad	1
1.1 <i>Orígenes</i>	1
1.2 <i>Generalidades</i>	1
2 Conceptos básicos	3
2.1 <i>Mantenimiento preventivo</i>	5
3 Distribuciones usuales en fiabilidad	7
3.1 <i>Distribución Normal</i>	7
3.2 <i>Distribución Log-Normal</i>	8
3.3 <i>Distribución Exponencial</i>	9
3.4 <i>Distribución Weibull</i>	10
3.5 <i>Weibull frente a otras distribuciones</i>	11
4 Descripción de la fiabilidad como producto de Weibull	13
4.1 <i>Descripción de la fiabilidad como producto de 3 funciones Weibull</i>	13
4.2 <i>Descripción de la fiabilidad como producto de n-Weibull</i>	15
5 Mantenimiento perfecto e imperfecto	17
5.1 <i>Generalidades</i>	17
5.2 <i>Curva de envejecimiento con mantenimiento perfecto</i>	17
5.2.1 <i>Mantenimiento perfecto preventivo con un modo de fallo</i>	17
5.2.2 <i>Mantenimiento perfecto preventivo con dos modos de fallo independientes</i>	18
5.2.3 <i>Ejemplo numérico-gráfico</i>	19
5.2.4 <i>Mantenimiento perfecto preventivo con tres modos de fallos independientes</i>	21
5.3 <i>Curva de envejecimiento con mantenimiento imperfecto</i>	22
5.3.1 <i>Mantenimiento imperfecto para dos modos de fallo</i>	22
6 Aplicación a un caso real	23
6.1 <i>Descripción del caso de estudio y recogida de datos</i>	25
6.2 <i>Obtención de los parámetros de la distribución de Weibull</i>	31
6.2.1 <i>Paso 2 del algoritmo: manipulación de datos</i>	33
6.2.2 <i>Paso 3 del algoritmo: obtención de la función observada</i>	36
6.2.3 <i>Paso 4 del algoritmo: ajuste de la función de Weibull</i>	38
6.2.4 <i>Paso 5 del algoritmo: ajuste por regresión cuadrática</i>	41

6.2.5	Paso 6 del algoritmo: Construcción función de Weibull	44
6.3	<i>Otros métodos para obtener los parámetros de la distribución Weibull</i>	48
6.4	<i>Mantenimiento preventivo óptimo</i>	50
7	Conclusión	65
8	Referencias	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Recopilación de datos de los modos de fallo	19
Tabla 2. Resultados fiabilidades individuales y total	20
Tabla 3. Recopilación de los datos de fallos y revisiones de los turbos	26
Tabla 4. Recopilación de los datos de fallos y revisiones de la bomba refrigerante	27
Tabla 5. Recopilación de los datos de fallos y revisiones de la bomba salada	27
Tabla 6. Recopilación de los costes y horas de las intervenciones	28
Tabla 7. Datos sobre incidencias de los turbos	29
Tabla 8. Datos sobre incidencias de la bomba refrigerante	30
Tabla 9. Datos sobre incidencias de la bomba de agua salada	31
Tabla 10. Resultados manipulación de datos para el turbo	34
Tabla 11. Resultados manipulación de datos para la bomba refrigerante	35
Tabla 12. Resultados manipulación de datos para la bomba de agua salada	36
Tabla 13. Valores de la función observada del primer modo de fallo calculados mediante la fórmula de Benard	37
Tabla 14. Valores de la función observada del segundo modo de fallo calculados mediante la fórmula de Benard	37
Tabla 15. Valores de la función observada del tercer modo de fallo calculados mediante la fórmula de Benard	38
Tabla 16. Valores para obtener los dos parámetros del primer modo de fallo	38
Tabla 17. Valores para obtener los parámetros del segundo modo de fallo	39
Tabla 18. Valores para obtener los dos parámetros del tercer modo de fallo	40
Tabla 19. Datos necesarios para la obtención de los tres parámetros de la función Weibull del primer modo de fallo	42
Tabla 20. Datos necesarios para la obtención de los tres parámetros de la función Weibull del segundo modo de fallo	42
Tabla 21. Datos necesarios para la obtención de los tres parámetros de la función Weibull del tercer modo de fallo	42
Tabla 22. Calculo error cuadrático del primer modo de fallo	46
Tabla 23. Calculo error cuadrático del segundo modo de fallo con tres parámetros	46
Tabla 24. Calculo error cuadrático del segundo modo de fallo con dos parámetros	47
Tabla 25. Calculo error cuadrático del segundo modo de fallo con tres parámetros	47
Tabla 26. Calculo error cuadrático del segundo modo de fallo con dos parámetros	48
Tabla 27. Datos de costes para cada modo de fallo	51
Tabla 28. Tiempos medios de los modos de fallo	52
Tabla 29. Valores óptimos de tiempo para cada paso (primer modo de fallo)	53
Tabla 30. Valores óptimos de tiempo para cada paso (segundo modo de fallo)	54
Tabla 31. Valores óptimos de tiempo para cada paso (tercer modo de fallo)	55
Tabla 32. Datos obtenidos de la fiabilidad total en el caso de tres modos de fallos con dos parámetros	60
Tabla 33. Datos obtenidos de la fiabilidad total en el caso de tres modos de fallos con tres parámetros	62
Tabla 34. Comparación de las fiabilidad total de tres modos de fallo con dos y tres parámetros con el mismo mantenimiento preventivo	64

Figura 1. Representación de la curva de bañera	4
Figura 2. Clasificación del mantenimiento preventivo	6
Figura 3. Fiabilidad total con un modo de fallo	18
Figura 4. Fiabilidad total con dos modos de fallo	19
Figura 5. Fiabilidad total del sistema	20
Figura 6. Fiabilidad total con tres modos de fallo	21
Figura 7. Flujo de tareas para la determinación de las funciones de distribución de fallos	24
Figura 8. Determinación de las funciones de distribución de fallos por pasos	32
Figura 9. Obtención de los parámetros de la función Weibull (dos parámetros) para el primer modo de fallo	39
Figura 10. Obtención de los dos parámetros de la función Weibull (dos parámetros) para el segundo modo de fallo	40
Figura 11. Obtención de los parámetros de la función Weibull (dos parámetros) para el tercer modo de fallo	41
Figura 12. Obtención de los parámetros de la función Weibull (tres parámetros) para el primer modo de fallo	43
Figura 13. Obtención de los parámetros de la función Weibull (con $\gamma_2 = 1894,59$) para el segundo modo de fallo	43
Figura 14. Obtención de los parámetros de la función Weibull (con $\gamma_3 = 3654,421$) para el tercer modo de fallo	44
Figura 15. Error cuadrático del primer modo de fallo	46
Figura 16. Comparación error cuadrático del segundo modo de fallo	47
Figura 17. Comparación error cuadrático del tercer modo de fallo	48
Figura 18. Relaciones y costes entre estados de un equipo	51
Figura 19. Valores óptimos τ_0 de cada paso para el primer modo de fallo	56
Figura 20. Valores óptimos τ_0 de cada paso para el segundo modo de fallo	56
Figura 21. Valores óptimos τ_0 de cada paso para el tercer modo de fallo	57
Figura 22. Representación curva de envejecimiento imperfecto	58
Figura 23. Representación curva de envejecimiento perfecto	59
Figura 24. Curva de envejecimiento perfecto con tres modos de fallo con dos parámetros	61
Figura 25. Curva de envejecimiento perfecto con tres modos de fallo con tres parámetros	63

OBJETIVO

El objetivo de este trabajo fin de grado es analizar el comportamiento de la fiabilidad de un equipo cuando está influenciada por varios modos de fallos. A partir de este estudio se pretende descubrir y dibujar la curva de envejecimiento del activo y cómo ésta puede verse afectada por el desgaste que sufre el activo durante su vida útil.

Se pretende construir la curva de envejecimiento para cada modo de fallo, mediante la recogida de datos y ajustando estos a una función de distribución teórica Weibull de dos y tres parámetros, utilizando el método de estimación de rango de medianas y la aproximación de Benard.

Se desea determinar el comportamiento de la curva de envejecimiento al introducir un parámetro de desgaste para cada modo de fallo que actúe sobre el sistema reduciendo la vida útil del activo. También se pretende observar el comportamiento de la fiabilidad máxima a medida que evolucionan los ciclos de operación y mantenimiento.

Se pretende determinar para tres modos de fallos que afectan al activo, el intervalo preventivo que maximiza el retorno (ingresos menos gastos) económico a lo largo de la vida útil del activo.

1 FIABILIDAD

En el siguiente capítulo se van a detallar los orígenes y generalidades de la fiabilidad.

1.1 Orígenes

Fiabilidad es una palabra que significa “cualidad del que puede pagar después”, con sufijo -dad (cualidad) y procedente del latín fidere: “confiar, dar o prestar algo de confianza” [1].

Históricamente, las técnicas de fiabilidad se empiezan a aplicar con la ley de los grandes números de Jacob Bernoulli. Esta ley contempla varios teoremas en los que la fiabilidad se centra en la ley de probabilidad de dos eventos independientes.

Posteriormente, en el siglo XX, en la Segunda Guerra Mundial, Erich [2], con el objetivo de mejorar el desarrollo de las misiones que se desarrollaban en Peenemunde, se centró en estudiar el comportamiento de la pieza más débil del misil V1 Von Braun [2]. Era necesario que ese componente funcionara bien, ya que éste determinaba el éxito del lanzamiento del misil. Llegó a la conclusión de que las fiabilidades individuales son mayores que la fiabilidad del conjunto de todos ellos. Este fundamento fue esencial para la mejora en nuevas técnicas que aumentasen la fiabilidad y con ello el éxito de funcionamiento de un sistema.

El término se extendió definitivamente en la industria militar con las normas MIL, en los vuelos con tripulación a la Luna y en el sector nuclear donde un fallo podría causar catástrofes ambientales y humanas letales como en Chernobyl en 1986 [2].

1.2 Generalidades

La incorporación de nuevas tecnologías en la industria ha marcado un antes y un después. Con la introducción de nuevos elementos electrónicos, se pasó de fabricar productos muy estandarizados a productos más específicos, aumentando la complejidad en los procesos industriales. Al aumentar la complejidad, se mejoró la eficacia y calidad en los procesos, pero también provocó un aumento de riesgos en el sistema, afectando directamente a la fiabilidad y a la seguridad de la instalación. Estos dos conceptos están directamente vinculados ya que si el conjunto de los componentes que conforman un equipo tiene una alta fiabilidad, su seguridad también lo será [3].

La seguridad en los equipos se pretende establecer a través de la ingeniería de fiabilidad, centrándose en la capacidad de los equipos en funcionar sin fallos durante un determinado periodo de tiempo bajo unas condiciones específicas. La ingeniería de fiabilidad dispone de una serie de técnicas predictivas basadas en la probabilidad, persiguiendo la calidad de los equipos y procesos. Para conseguirlo, se aplican técnicas que estudian cuantitativa y cualitativamente los riesgos, se identifican y se mejoran posibles situaciones críticas que afectan a la seguridad [3].

No obstante, lo más destacable de la ingeniería de la fiabilidad es que abarca tres áreas fundamentales que acompañan al producto durante toda su vida, desde su diseño hasta su vida útil y mantenimiento. Estas áreas son [4]:

- Fiabilidad
- Mantenibilidad
- Disponibilidad

En el documento, nos vamos a centrar en el área del mantenimiento y fiabilidad. El mantenimiento abarca todas las actividades asignadas a preservar o devolver al elemento a un estado en el que pueda realizar la función requerida.

Para conseguirlo, es necesario que el elemento y cada uno de sus componentes cuenten con una probabilidad lo suficientemente alta que asegure que van a desempeñar la función requerida adecuadamente en unas condiciones definidas y en un espacio de tiempo concreto [5].

Es por ello, que apoyándose en los objetivos de la fiabilidad en ingeniería los cuales son:

- Aplicar conocimientos técnicos y experiencia para eliminar o reducir la probabilidad o frecuencia de fallos.
- Identificar y corregir las causas de los fallos.
- Determinar cómo tratar el fallo, si la causa del fallo no se ha eliminado.
- Aplicar métodos para determinar la fiabilidad probable de nuevas construcciones y analizar datos de fiabilidad.

Se podrá enfocar la fiabilidad en el mantenimiento para:

- Conservar el rendimiento del sistema mientras mantiene los costos bajo control.
- Disminuir la incertidumbre en el funcionamiento general del sistema.
- Conservar y aumentar la rentabilidad.

Con todo ello, este documento pretende ir más allá, estudiar la fiabilidad total de un equipo con las fiabilidades de los diferentes modos de fallo que lo componen. A través de ello, se persigue calcular una curva de envejecimiento muy cercana a la realidad, teniendo en cuenta parámetros propios del desgaste de un dispositivo y cuando se debe realizar el mantenimiento preventivo de cada modo de fallo.

2 CONCEPTOS BÁSICOS

En este capítulo se detallarán los conceptos básicos necesarios para la comprensión de este trabajo. Asimismo, se dedicará una sección a explicar el concepto de mantenimiento preventivo, ya que es uno de los conceptos claves de este trabajo.

- **Fallo.** Según [6], cuando hablamos de fallo nos referimos a “cese de la aptitud de un elemento para realizar la función requerida”
- **Modo de fallo (ξ).** En [6], se define modo de fallo como “manera en que se produce la inaptitud de un elemento para realizar la función requerida”
- **Equipo:** Según [7], un equipo es un “elemento que constituye el todo o parte de una máquina o instalación que, por sus características, tiene datos, historial y programas de reparación propios”
- **Tiempo hasta fallo (T).** Variable aleatoria T representando la vida de un dispositivo $T \in [0, +\infty)$
- **Función de mortalidad o de infiabilidad (F(t)).** La función de mortalidad F(t) es la función de distribución F(t) de la variable aleatoria T:

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(x)dx \quad (1)$$

- **Función de fiabilidad o de supervivencia (R(t)).** La función de fiabilidad de un determinado componente es la probabilidad complementaria de F(t) (ver [8]). Representa la probabilidad de que un dispositivo falle después del instante t.

$$R(t) = 1 - F(t) = P(T > t) = \int_t^{\infty} f(x)dx \quad (2)$$

- **Vida media o tiempo medio hasta el fallo (θ).** La vida media θ de un dispositivo es la esperanza matemática de la variable aleatoria T.

$$\theta = E[T] = \int_0^{\infty} tf(t)dt \quad (3)$$

Siendo $f(t)$ la función de densidad de la variable aleatoria T

- **Tasa media de fallos (MTBF).** La tasa media de fallos, o en inglés Mean Time Between Failures, se define como “Número de fallos de un elemento durante un intervalo de tiempo dado dividido por el intervalo de tiempo” (ver [6]).

- **Tasa instantánea de fallos ($z(t;h)$).** La tasa instantánea de fallo $z(t;h)$ se define como la proporción de dispositivos supervivientes en el instante t que fallan en el intervalo $(t, t+h]$, por unidad de tiempo (ver [6]). Matemáticamente se expresa como:

$$z(t; h) = \frac{F(t + h) - F(t)}{h \cdot R(t)} \quad (4)$$

- **Varianza:** “Media de las desviaciones cuadráticas de una variable aleatoria, referidas al valor medio de esta” [9] .
- **Curva de bañera:** Se trata de un modelo conceptual en el que los dispositivos no reparables mueren por fallos infantiles, por azar o por desgaste” (ver [8]). Es una curva plana representando la vida de un dispositivo (normalmente en horas) y el eje de ordenadas su correspondiente tasa de fallos. La Figura 1 [10] ilustra la representación gráfica de la curva de bañera. En esta curva se puede diferenciar tres zonas bien definidas:
 - Periodo infantil. Los productos empiezan su vida con una tasa de fallos alta. A medida que va pasando el tiempo, la tasa de fallos decrece rápidamente puesto que la proporción de dispositivos con defectos iniciales decrece cuando estos van fallando.
 - Vida útil. Los productos tienen una tasa de fallos prácticamente constante, con fallos puntuales.
 - Periodo de desgaste. Los productos experimentan un aumento de la tasa de fallos causados por el desgaste.

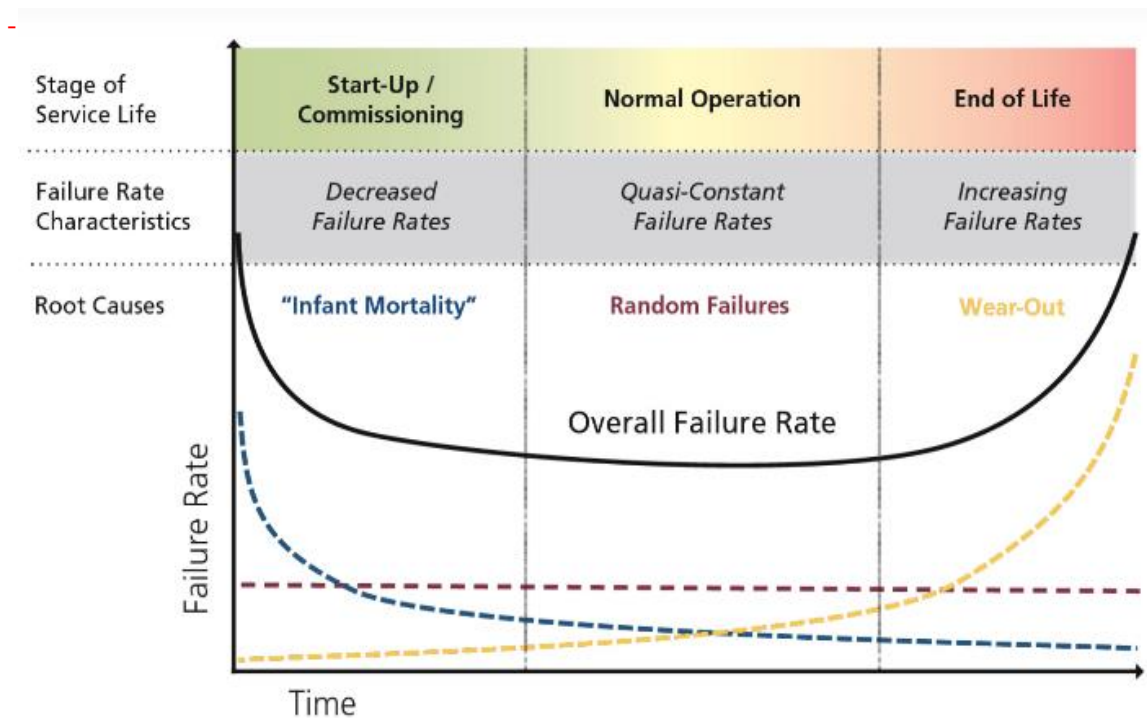


Figura 1. Representación de la curva de bañera

- **Curva de envejecimiento.** La curva de envejecimiento representa cómo evoluciona la fiabilidad de un equipo a lo largo del tiempo. Esta curva es el resultado de dibujar la fiabilidad total del equipo compuesta por el producto de las fiabilidades de cada modo de fallo. Para cada modo de fallo, se realiza el mantenimiento preventivo en un intervalo de tiempo τ . Al realizar el mantenimiento preventivo para cada modo de fallo, la fiabilidad de éste vuelve a un valor cercano a 1. Esto es debido a que hay siempre presente una reducción de fiabilidad por desgaste debido al propio uso (ϵ).

2.1 Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo se define como el mantenimiento llevado a cabo para evaluar y/o mitigar la degradación y reducir la probabilidad de fallo de un elemento [6].

La ejecución del mantenimiento preventivo permite reestablecer la fiabilidad de los equipos, evitando un posible fallo que cause la inactividad parcial o total de un sistema. Por ejemplo, un fallo de un equipo que provoque el cese de la actividad de una cadena de producción puede causar a la fábrica graves consecuencias en costes y retrasos de entregas. Se destacan las siguientes ventajas de una buena estrategia en mantenimiento preventivo [6]:

- Disminuye posibles costes futuros por cese de la actividad
- El proceso productivo adquiere mayor fiabilidad
- Aumenta la vida útil de los equipos
- Disminuye el mantenimiento correctivo
- Permite detectar posibles cambios que mejoren los equipos

A pesar de la gran cantidad de ventajas que cuenta, es necesario destacar que un buen estudio realizado por expertos en la materia implica un desembolso importante por parte de la empresa. Por ello, es clave que se realice de forma efectiva para no generar acciones innecesarias que incurra en costes y tiempo, alcanzando un resultado contrario al objetivo esperado.

El conocimiento y experiencia ingenieril es un pilar elemental para una buena realización de mantenimiento preventivo. Muchas veces la variabilidad del fallo pasa a un segundo plano cuando depende en la práctica de factores humanos, materiales y de uso, lo que hace que la estimación de estos sea a veces difícil de calcular. Además, muchos de estos factores varían con el tiempo, por ejemplo, por cambios en el diseño y variaciones en el proceso, lo que implica la necesidad de un mayor enfoque para determinar estos [5].

En la práctica, en el día a día, la escasez de tiempo y, a veces, de recursos hace que las empresas opten por un mantenimiento preventivo basado, en las indicaciones del fabricante. Según las condiciones y ritmo de trabajo que el equipo experimenta, determinan el histórico de fallos con el que poder recalcular el mantenimiento preventivo. Los datos recopilados deben incluir información sobre los problemas encontrados, cada cuanto tiempo y su solución. A partir de ahí, se establece el mantenimiento preventivo, que puede ser de dos tipos: predeterminado o basado en la condición.

- **El mantenimiento predeterminado** se define según [6], como el mantenimiento cuyas tareas “*se realizan de acuerdo con intervalos de tiempo establecidos o con un número definido de unidades de funcionamiento, pero sin análisis previo de la condición del elemento*”.
- **El mantenimiento basado en la condición** es aquel que “*incluye una combinación de la evaluación y análisis de las condiciones físicas y las posibles acciones de mantenimiento posteriores*”. Con esta información se puede realizar un pronóstico de la degradación, denominándose **mantenimiento**

predictivo (aquel que se realiza siguiendo una predicción obtenida del análisis repetido o de características conocidas y de la evaluación de los parámetros significativos de la degradación del elemento) [6]. Si no realiza un pronóstico de la evaluación de la degradación, se procede al mantenimiento basado en la condición.

Tras la evaluación de la condición y el pronóstico (si se realiza), se determina se procede a realizar las tareas de **mantenimiento activo** que es la “parte del mantenimiento basado en la condición durante el cual las acciones físicas se llevan a cabo directamente en un elemento para mantenerlo en un estado en el que pueda realizar la función requerida”[6]. Si no fuera así, no se realizaría ninguna actividad de mantenimiento hasta la próxima evaluación.

La siguiente Figura 2 [6] representa un esquema de clasificación del mantenimiento preventivo.

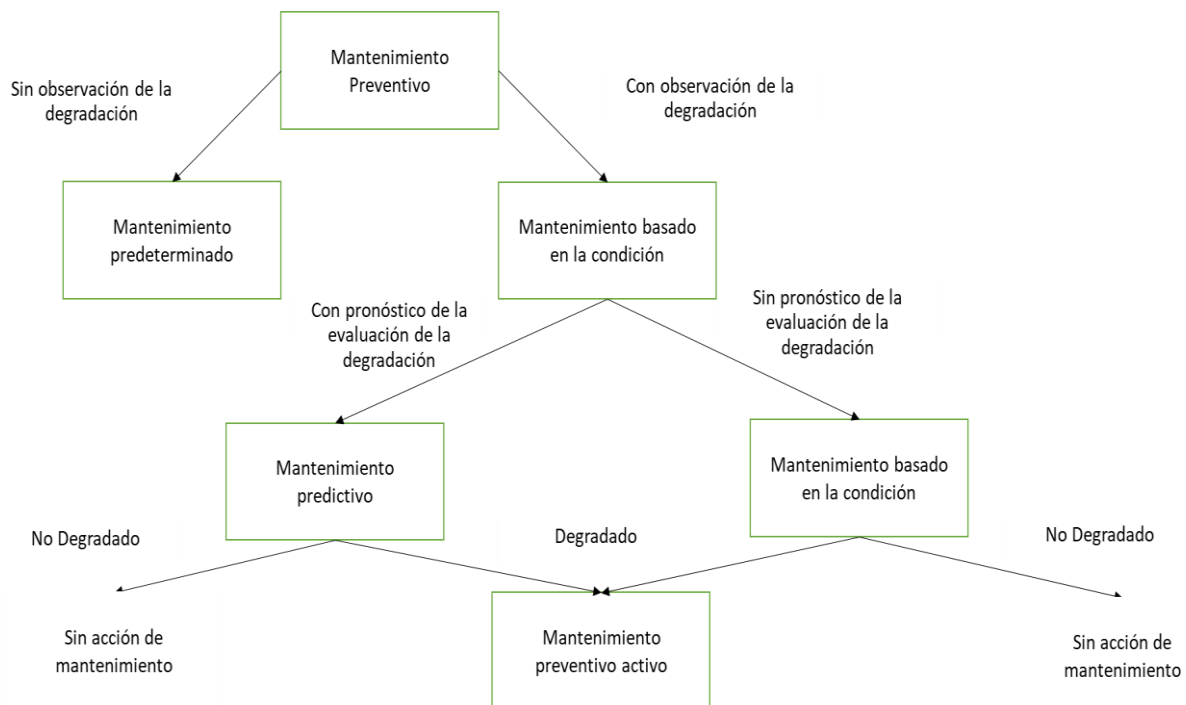


Figura 2. Clasificación del mantenimiento preventivo

3 DISTRIBUCIONES USUALES EN FIABILIDAD

En este capítulo, se describen las distribuciones más utilizadas en fiabilidad, especificando sus características y las situaciones en las se usan.

3.1 Distribución Normal

La distribución Normal o distribución de Laplace-Gauss, denotada como $X \sim N(\theta, \sigma^2)$, es una de las distribuciones más utilizadas en Estadística. Entre sus aplicaciones destaca su uso en la determinación de la vida útil de productos consumibles.

La función de densidad de la distribución Normal queda definida por:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\theta}{\sigma}\right)^2} \quad (5)$$

donde:

t = tiempo hasta el fallo

θ = vida media de los tiempos de fallos

σ = desviación típica de los tiempos de fallo

La función fiabilidad viene dada por:

$$R(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\theta}{\sigma}\right)^2} dx \quad (6)$$

Y finalmente, la tasa de fallo quedaría como:

$$z(t) = \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\theta}{\sigma}\right)^2}}{\int_t^{\infty} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\theta}{\sigma}\right)^2} dx} \quad (7)$$

3.2 Distribución Log-Normal

La distribución Log-Normal, denotada como $X \sim \text{Lognormal}(\theta, \sigma^2)$, resulta al aplicar la función logaritmo sobre una variable aleatoria normalmente distribuida. Esta distribución surge a partir de la distribución Normal. La distribución Normal permite adquirir valores negativos lo hace que sea una distribución inadecuada para el mantenimiento. Esto es debido a que no tiene sentido un tiempo entre fallos negativos [11]. Es por ello se utiliza la distribución Log-Normal, para que todos los valores utilizados sean positivos. Esta distribución se usa para determinar la fiabilidad en casos muy específicos (componentes estructurales y electrónicos) cuando sufren fatiga y estrés. Algunos de ellos pueden ser la fatiga de componentes mecánicos, procesos técnicos, datos de sistemas con reparación...[11]

Su uso queda limitado a este tipo de componentes, no siendo recomendada esta distribución para la obtención de fiabilidad de otro tipo de equipos.

La función de densidad de la distribución Log-Normal queda definida por:

$$f(t') = \frac{1}{\sigma' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t' - \theta'}{\sigma'} \right)^2} \quad (8)$$

donde:

t = es el tiempo hasta el fallo

$t' = \ln(t)$. t es el tiempo hasta el fallo

θ' = media de los logaritmos neperianos de los tiempos de fallo

σ' = Desviación típica de los logaritmos neperianos de los tiempos de fallo

La vida media se expresa como:

$$\theta = E(\tau) = e^{\theta' + \frac{\sigma'^2}{2}} \quad (9)$$

cuya varianza es:

$$\sigma^2 = V(\tau) = e^{2\theta' + \sigma'^2} (e^{\sigma'^2} - 1) \quad (10)$$

La función fiabilidad viene dada por:

$$R(t) = \frac{1}{\sigma' \sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \theta'}{\sigma'} \right)^2} dx \quad (11)$$

Y finalmente, la tasa de fallo quedaría como:

$$z(t) = \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t'-\theta'}{\sigma'}\right)^2}}{\int_t^{\infty} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\theta'}{\sigma'}\right)^2} dx} \quad (12)$$

La distribución Log-Normal se sitúa en la etapa infantil del equipo, en la zona inicial de la curva de la bañera. En esta zona, la tasa de fallos decrece rápidamente puesto que la proporción de dispositivos con defectos iniciales decrece cuando estos van fallando.

3.3 Distribución Exponencial

La distribución Exponencial, denotada por $X \sim \text{Exponencial}(\lambda)$, es una distribución continua que puede considerarse como un caso particular de la distribución Weibull (ver Sección 3.4), donde $\beta = 1$.

A partir de las notaciones anteriores, la función de densidad de la distribución exponencial queda definida por:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (13)$$

donde:

t = tiempo hasta el fallo

λ = tasa de fallos constante

La función fiabilidad tal que:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (14)$$

Y finalmente, la tasa de fallo quedaría como:

$$z(t) = \lambda \text{ (constante)} \quad (15)$$

La distribución Exponencial se sitúa en la etapa de vida útil del equipo, en la zona central de la bañera donde se calcula la distribución de fallos aleatorios con una tasa de fallo constante. Por ello, la probabilidad de que el equipo vuelva a fallar desde que se produjo el último fallo es independiente al envejecimiento, es decir, al tiempo de trabajo que ha efectuado. La probabilidad de fallo no depende de la edad del dispositivo, es decir, la probabilidad de fallo es la misma independientemente de si el dispositivo es nuevo o no.

Se concluye que la aleatoriedad de esta distribución, al estar situada en esta zona, no garantiza una fiabilidad útil para poner en práctica [12]. No existe un intervalo preventivo que optimice el mantenimiento.

3.4 Distribución Weibull

La aplicación de la distribución Weibull, denotada como $X \sim \text{Weibull}(\beta, \eta, \gamma)$, destaca por ser el medio más eficaz para determinar la fiabilidad en ingeniería, medicina y calidad entre otras [13]. A partir de esta distribución se puede pronosticar tiempos de mantenimiento preventivo considerando datos históricos, estudiar datos relativos a tiempos antes del fallo del dispositivo y multitud de aplicaciones...

Por ello todo, es una distribución que permite, de forma efectiva, el control riesgos que día a día tiene que afrontar una empresa. Este riesgo se establece como una función en el tiempo [5]. Con enfoque en el mantenimiento, Weibull utiliza el histórico de fallos de los componentes del equipo para:

- Determinar las probabilidades de fallo y poder aplicar los mantenimientos preventivos de forma más exacta. A partir de la información obtenida tras aplicar la distribución Weibull para cada modo de fallo se puede disminuir los riesgos de costes, paros en la producción y seguridad que supondría un fallo de un equipo [5].
- Analizar la evolución de fallos de cada uno de los componentes que conforman el equipo y posteriormente decidir el mantenimiento preventivo adecuado [5].

A partir de las notaciones anteriores, se puede definir la función de densidad de la distribución Weibull como:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} (t - \gamma)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (16)$$

donde:

t : tiempo entre fallos.

La función fiabilidad se define como:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (17)$$

Y finalmente, la tasa de fallo quedaría tal que:

$$z(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} (t - \gamma)^{\beta-1} \quad (18)$$

Estos parámetros son:

- β : Parámetro de forma
- η : Parámetro de escala o vida característica
- γ : Parámetro de origen o vida garantizada

La distribución de Weibull destaca por su versatilidad, por lo que puede usarse en cualquiera de las etapas de la Curva de bañera, dependiendo del signo del parámetro beta. Éstos pueden ser:

- a) Si $\beta < 1 \rightarrow$ tasa de fallos es decreciente.

Este caso se sitúa a la izquierda de la curva de la bañera, en la fase de la juventud o mortalidad infantil [10]. Los fallos se producen a principio de la vida del equipo, por lo que no se realiza mantenimiento preventivo. Los fallos pueden ser ocasionados por errores de diseño, defectos de fabricación...

- b) Si $\beta = 1 \rightarrow$ tasa de fallos es constante.

Este caso se sitúa en el centro de la curva de la bañera, en la zona de la madurez o período de vida útil [10]. Los fallos son totalmente aleatorios, por lo que no se realiza mantenimiento preventivo. La madurez es una función constante. Coincide con la función exponencial.

- c) Si $\beta > 1 \rightarrow$ tasa de fallos creciente

Este caso se sitúa en la derecha de la curva de la bañera, en la zona de la vejez [10]. Los fallos se producen al final de la vida del equipo por deterioro y se recogen en un historial de fallos y se realiza mantenimiento preventivo. En esta situación se va notando el desgaste y los fallos se acumulan entorno a un determinado momento. La madurez es una función creciente.

3.5 Weibull frente a otras distribuciones

De todas las distribuciones vistas, la distribución Weibull es la más adecuada para determinar la fiabilidad de cada modo de fallo. Es la única distribución que se centra en la zona que nos interesa en este documento, que es la zona de vejez de la curva de la bañera, donde tiene sentido el mantenimiento preventivo. Esto es debido a que en esta zona es donde se concentran la mayoría de los fallos ya que se producen cuando van envejeciendo [12]. Además, si quisiéramos, con los tres parámetros de la distribución podríamos situarnos indistintamente en cualquier zona de la curva de la bañera, pudiendo modelar varios comportamientos de riesgos y siendo fácil de modelar de forma algebraica.

Por tanto, como se ha visto anteriormente, descartamos la distribución Normal ya que admite valores negativos, pudiendo así llegar a tiempos entre fallos negativos (lo cual no tiene sentido). Tampoco la distribución Log-Normal sería una buena opción ya que tiene una aplicación muy específica basada en calcular fiabilidades de elementos sometidos a fatiga y estrés. Finalmente, la distribución exponencial, al ser un caso específico de la distribución Weibull, no interesaría.

Los resultados obtenidos serán claves optimizar el intervalo preventivo y disminución de gastos en amortización de activos. Para ello, será necesario calcular con los datos históricos los parámetros de la distribución Weibull para cada modo de fallo.

4 DESCRIPCIÓN DE LA FIABILIDAD COMO PRODUCTO DE WEIBULL

En este capítulo se describe la fiabilidad de un sistema constituido por n -fallos independientes ($n \geq 3$ fallos). Cada modo de fallo tiene asociado una fiabilidad que supondremos sigue una distribución de Weibull (por la razón explicada en el capítulo anterior). Recordemos que una distribución de Weibull está caracterizada por tres parámetros: parámetro de forma (β), de escala (η), y de origen (γ). Supondremos que el parámetro de origen es cero en todo el desarrollo del cálculo. Cuando la distribución Weibull queda definida por dos parámetros (parámetro de origen igual a cero), los valores de éstos han de ser mayores a cero y positivos. Sin embargo, cuando la distribución Weibull queda definida con tres parámetros, cabe la posibilidad de que éstos adquieran valores iguales o menores que cero [14]. En primer lugar, consideraremos el caso de $n=3$, para posteriormente extenderlo al caso más general de n -modos de fallos.

4.1 Descripción de la fiabilidad como producto de 3 funciones Weibull

La fiabilidad de cada modo de fallo $i=1...3$, queda expresada como:

$$R_i(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta_i}\right)^{\beta_i}} \quad i = 1,2,3 \quad (19)$$

A partir de la ecuación (16), la fiabilidad de un sistema se define como el producto de las fiabilidades de cada uno de sus modos de fallo, en este caso, de sus tres modos de fallo.

$$R_T(t) = R_1(t) * R_2(t) * R_3(t) \quad (20)$$

Sustituyendo, la ecuación final es:

$$R_T(t) = e^{-\left(\frac{t^{\beta_1}}{\eta_1^{\beta_1}} + \frac{t^{\beta_2}}{\eta_2^{\beta_2}} + \frac{t^{\beta_3}}{\eta_3^{\beta_3}}\right)} \quad (21)$$

Las siguientes secciones se dedicarán a describir distintos escenarios que puedan darse con los parámetros que aparecen en la función de fiabilidad del sistema (Ec. 21).

Escenarios

La expresión de la fiabilidad (Ec. 21) a través de la distribución Weibull de tres modos de fallo puede variar dependiendo del valor de los parámetros de cada uno de ellos. Por ello, se va a analizar esta expresión considerando tres escenarios distintos: modos de fallos con mismo parámetro de forma, con mismo parámetro de escala y con mismo parámetro de forma y escala.

Mismo parámetro de forma

El parámetro de forma β es el indicador del mecanismo de fallo. A mayor valor del parámetro de forma, más se asemeja la distribución a una curva normal, mejorando la fiabilidad [14]. Si los parámetros de forma son iguales, el comportamiento de desgaste es el mismo en cada modo de fallo. Por ello, si consideramos:

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta \quad (22)$$

La función fiabilidad quedaría expresada como:

$$R_T(t) = e^{-\left(\frac{t^\beta}{\eta_1^\beta} + \frac{t^\beta}{\eta_2^\beta} + \frac{t^\beta}{\eta_3^\beta}\right)} = e^{-t^\beta \left(\frac{1}{\eta_1^\beta} + \frac{1}{\eta_2^\beta} + \frac{1}{\eta_3^\beta}\right)} \quad (23)$$

Cabe destacar que la función densidad Weibull varía al aumentar el parámetro de escala (η) y dejando constante el parámetro de forma (β). A medida que el parámetro de escala es mayor, la aparición de los fallos se alarga más en el tiempo, con intervalos de mantenimiento mayores.

Mismo parámetro de escala

El parámetro de escala es el indicador de lo plana o aguada que es la distribución [14].

Hace referencia al percentil 63.2 de los datos con los que se trabaja. Esto quiere decir que si $\eta = 10$, habrá una probabilidad del 63.2% de que fallen los equipos en las 10 primeras horas después del parámetro de origen, que en este caso es 0. Si se establece que:

$$\eta_1 = \eta_2 = \eta_3 = \eta \quad (24)$$

La función fiabilidad quedaría expresada como:

$$R_T(t) = e^{-\left(\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta_1} + \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta_2} + \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta_3}\right)} \quad (25)$$

Cabe destacar que la función densidad Weibull varía al aumentar el parámetro de forma (β) y dejando constante el parámetro de escala (η). Al tener el parámetro de escala constante, el pico de aparición de fallos se produce en el mismo instante de tiempo. Sin embargo, a medida que el parámetro de forma es mayor, el pico de aparición de fallos es más pronunciado. Esto es debido a que el desgaste es más rápido.

Mismos parámetros de forma y escala

En este escenario, se aúna los dos escenarios anteriores. Es decir, los tres modos de fallo tienen los mismos parámetros de forma (β) y escala (η).

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta \quad \text{y} \quad \eta_1 = \eta_2 = \eta_3 = \eta \quad (26)$$

La función fiabilidad quedaría expresada como:

$$R_T(t) = e^{-\left(\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta + \left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta + \left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right)} = e^{-3\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (27)$$

Por tanto, los tres modos de fallos sufren el mismo desgaste al tener el mismo parámetro de forma (β) y la aparición de los fallos se producen en el mismo instante debido al mismo parámetro de escala (η).

4.2 Descripción de la fiabilidad como producto de n-Weibull

La fiabilidad de cada modo de fallo $i=1\dots n$, queda expresada como:

$$R_i(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta_i}\right)^{\beta_i}} \quad i = 1 \dots n \quad (28)$$

A partir de la ecuación (80), la fiabilidad de un sistema se define como el producto de las fiabilidades de cada uno de sus modos de fallo.

$$R_T(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad i = 1 \dots n \quad (29)$$

Sustituyendo, la ecuación final es:

$$R_T(t) = e^{-\sum_{i=1}^n \left(\frac{t}{\eta_i}\right)^{\beta_i}} \quad i = 1 \dots n \quad (30)$$

Las siguientes secciones se dedicarán a describir distintos escenarios que puedan darse con los parámetros que aparecen en la función de fiabilidad del sistema (Ec. 30).

Escenarios

La expresión de la fiabilidad (Ec. 28) a través de la distribución Weibull de n- modos de fallo puede variar dependiendo del valor de los parámetros de cada uno de ellos. Por ello, se va a analizar esta expresión considerando tres escenarios distintos: modos de fallos con mismo parámetro de forma, con mismo parámetro de escala y con mismo parámetro de forma y escala.

Mismo parámetro de forma

El parámetro de forma β es el indicador del mecanismo de fallo. A mayor valor del parámetro de forma, más se asemeja la distribución a una curva normal, mejorando la fiabilidad [14]. Si los parámetros de forma son iguales, el comportamiento de desgaste es el mismo en cada modo de fallo. Por ello, si consideramos:

$$\beta_1 = \beta_2 \dots = \beta_n = \beta \quad (31)$$

La función fiabilidad quedaría expresada como:

$$R_T(t) = e^{-t^\beta \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\eta_i^\beta}\right)} \quad i = 1 \dots n \quad (32)$$

Cabe destacar que la función densidad Weibull varía al aumentar el parámetro de escala (η) y dejando constante el parámetro de forma (β). A medida que el parámetro de escala es mayor, la aparición de los fallos se alarga más en el tiempo, con intervalos de mantenimiento mayores.

Mismo parámetro de escala

El parámetro de escala es el indicador de lo plana o aguada que es la distribución [14].

Hace referencia al percentil 63.2 de los datos con los que se trabaja. Esto quiere decir que si $\eta = 10$, habrá una probabilidad del 63.2% de que fallen los equipos en las 10 primeras horas después del parámetro de origen, que en este caso es 0. Si se establece que:

$$\eta_1 = \eta_2 \dots = \eta_n = \eta \quad (33)$$

La función fiabilidad quedaría expresada como:

$$R_T(t) = e^{-\sum_{i=1}^n \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta i}} \quad i = 1 \dots n \quad (34)$$

Cabe destacar que la función densidad Weibull varía al aumentar el parámetro de forma (β) y dejando constante el parámetro de escala (η). Al tener el parámetro de escala constante, el pico de aparición de fallos se produce en el mismo instante de tiempo. Sin embargo, a medida que el parámetro de forma es mayor, el pico de aparición de fallos es más pronunciado. Esto es debido a que el desgaste es más rápido.

Mismos parámetros de forma y escala

En este escenario, se aúna los dos escenarios anteriores. Es decir, los tres modos de fallo tienen los mismos parámetros de forma (β) y escala (η).

$$\beta_1 = \beta_2 \dots = \beta_n = \beta \quad y \quad \eta_1 = \eta_2 \dots = \eta_n = \eta \quad (35)$$

La función fiabilidad quedaría expresada como:

$$R_T(t) = e^{-n \left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (36)$$

Por tanto, los tres modos de fallos sufren el mismo desgaste al tener el mismo parámetro de forma (β) y la aparición de los fallos se producen en el mismo instante debido al mismo parámetro de escala (η).

5 MANTENIMIENTO PERFECTO E IMPERFECTO

En este capítulo, se va a introducir los conceptos de curva de mantenimiento perfecto e imperfecto considerando como función de fiabilidad la descrita en el capítulo anterior.

5.1 Generalidades

Todo equipo cuenta con un conjunto de modos de fallo, que se estudian y analizan a partir del histórico de fallos. Para cada modo de fallo, se estudia cuál es la función de fiabilidad más adecuada de acuerdo con el histórico de datos, es decir, cuáles son los parámetros de forma y escala de cada distribución de Weibull. A partir de ahí, para cada modo de fallo se aplicará una tarea preventiva que dependerá de las cuestiones investigadas y del rango de fiabilidad que la empresa quiera operar para ese modo de fallo.

El análisis de la curva de envejecimiento juega un papel importante para el estudio de fiabilidad del equipo. Como mencionamos en el Capítulo 2, esta curva es una representación gráfica de cómo el equipo envejece a lo largo del tiempo teniendo en cuenta las tareas preventivas. Para ello, se obtiene la fiabilidad total del equipo tras realizar las correspondientes tareas preventivas a los diversos modos de fallo. En esta curva se representa tanto la fiabilidad total en cada instante de tiempo como las fiabilidades individuales de cada modo de fallo, teniendo en cuenta las tareas preventivas y cómo éstas modifican las correspondientes fiabilidades. Cuando se realiza un mantenimiento, puede ocurrir que el equipo recupere la totalidad de su fiabilidad (mantenimiento perfecto) o no la recupere (mantenimiento imperfecto). Los siguientes apartados serán dedicados al análisis de las curvas de envejecimiento teniendo en cuenta estos dos tipos de mantenimiento (perfecto e imperfecto).

5.2 Curva de envejecimiento con mantenimiento perfecto

Un mantenimiento perfecto permite que, al realizar el mantenimiento preventivo, el equipo recupera la totalidad de su fiabilidad, sin contar con el envejecimiento propio del equipo por desgaste. Introduciremos la curva de envejecimiento para uno, dos y tres modos de fallos.

5.2.1 Mantenimiento perfecto preventivo con un modo de fallo

En este escenario, para un solo modo de fallo en un equipo, se puede observar cómo la fiabilidad, dibujada en azul, disminuye con la utilización del equipo hasta que, con un mantenimiento preventivo cada intervalo tiempo τ (eje horizontal), recupera la fiabilidad (eje vertical).

Como se ha visto anteriormente, la función fiabilidad para el modo de fallo queda definida por ecuación (14). Al haber solo un único modo de fallo, coincide con la fiabilidad total del equipo, como se observa en Figura 3.

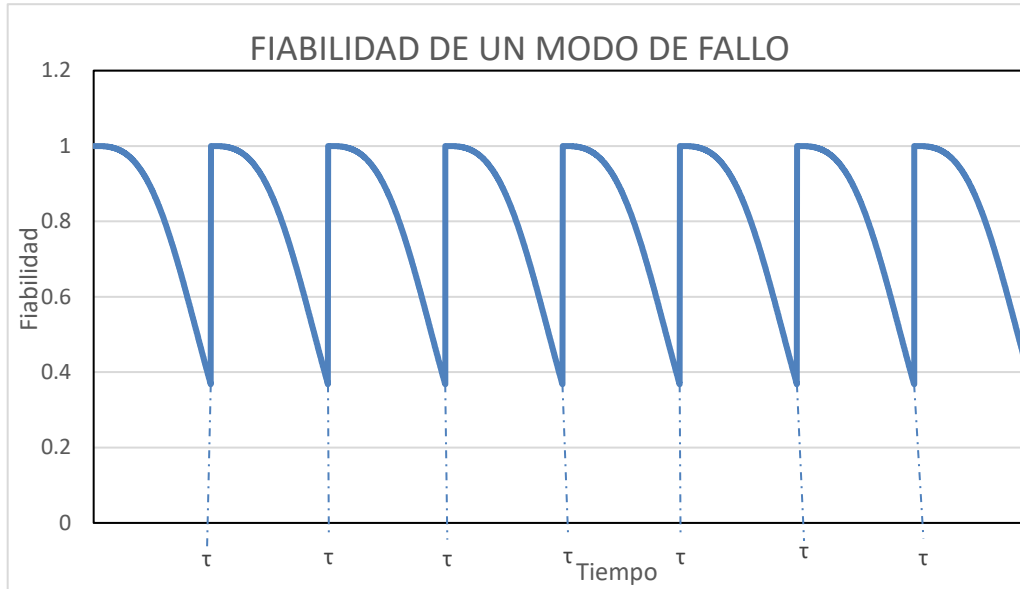


Figura 3. Fiabilidad total con un modo de fallo

5.2.2 Mantenimiento perfecto preventivo con dos modos de fallo independientes

En este caso, se contempla dos modos de fallos a los que se aplica respectivamente mantenimientos preventivos en intervalos de tiempo τ_1 y τ_2 . Cabe destacar que el mantenimiento preventivo del segundo modo de fallo es el doble que el del primero ($\tau_2 = 2\tau_1$). Gráficamente, representaremos el intervalo preventivo como τ , siendo éste el mismo que el del segundo modo de fallo y, su vez, el doble que el del primero. La fiabilidad total del equipo vendrá definida por la expresión de fiabilidad:

$$R_T(t) = R_1(t) * R_2(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta_1}\right)^{\beta_1}} * e^{-\left(\frac{t}{\eta_2}\right)^{\beta_2}} = e^{-\left(\frac{t^{\beta_1}}{\eta^{\beta_1}} + \frac{t^{\beta_2}}{\eta^{\beta_2}}\right)} \quad (37)$$

Notar que la distribución considerada en cada modo de fallo es la de Weibull y que la función de fiabilidad resultante es la expresada en la Ec. 30 con $n=2$.

La línea azul representa la evolución de la fiabilidad del primer modo de fallo, la línea amarilla la del segundo modo de fallo y la línea roja la fiabilidad total del sistema.

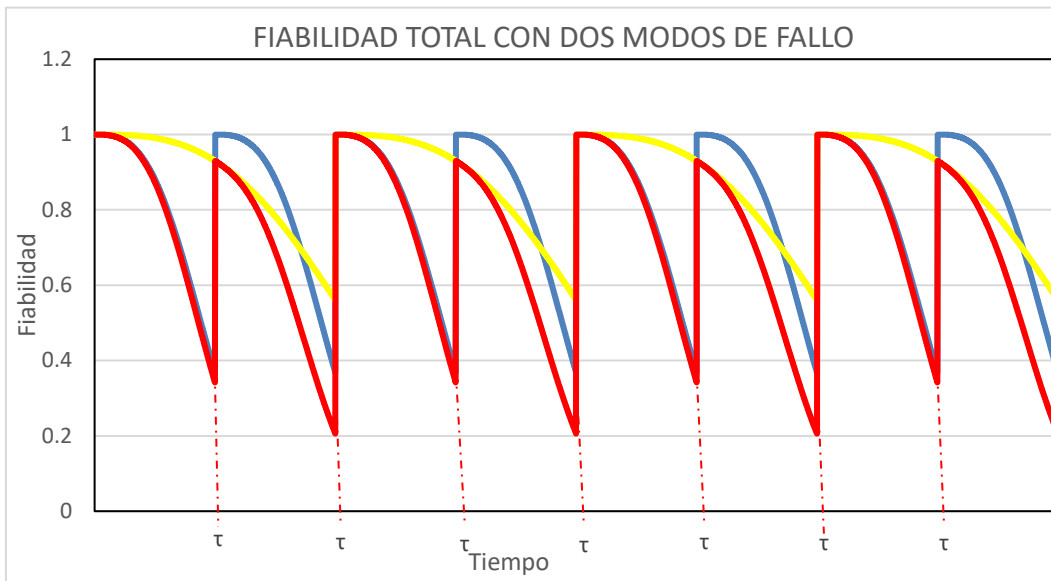


Figura 4. Fiabilidad total con dos modos de fallo

5.2.3 Ejemplo numérico-gráfico

El siguiente ejemplo ilustra la curva de envejecimiento para dos modos de fallo. Para ello, consideraremos los datos de la siguiente tabla donde se muestran los parámetros de la distribución de Weibull para cada modo de fallo, así como el instante de tiempo donde se realiza el mantenimiento preventivo.

DATOS		
PARÁMETROS	MODO DE FALLO 1	MODO DE FALLO 2
β	2	2.1
η	2900	3100
Mantenimiento Preventivo (min)	1200	1200

Tabla 1. Recopilación de datos de los modos de fallo

En intervalos de tiempo de 1200 min, se calcula la fiabilidad de cada modo de fallo y, posteriormente la fiabilidad total del equipo (producto de fiabilidades de cada modo de fallo) usando la Ec. 37. El mantenimiento preventivo del primer modo de fallo se realiza en el instante de tiempo τ_1 y el mantenimiento preventivo del segundo modo de fallo se realiza en el instante de tiempo τ_2 . Como ambos coinciden, se simplifica gráficamente con $\tau = \tau_1 = \tau_2$. En la Tabla 2 se muestran los instantes de tiempo (columna primera) donde se evalúa la función de fiabilidad de cada modo de fallo (columnas 2 y 3) usando los datos de los parámetros de la Tabla 1. En la Figura 5, la línea azul representa la fiabilidad del primer modo de fallo, la línea roja la del segundo modo de fallo y la línea verde la fiabilidad total del equipo.

TIEMPO	R(t)MF1	R(t)MF2	RT(t)
1	1,000	1,000	1,000
200	0,995	0,997	1,000
400	0,981	0,987	1,000
600	0,958	0,969	1,000
800	0,927	0,943	0,999
1000	0,888	0,911	0,999
1200	1,000	1,000	0,998
1400	0,995	0,997	0,997
1600	0,981	0,987	0,996
1800	0,958	0,969	0,994
2000	0,927	0,943	0,992
2200	0,888	0,911	0,989
2400	1,000	1,000	0,986
2600	0,995	0,997	0,983
2800	0,981	0,987	0,978
3000	0,958	0,969	0,973
3200	0,927	0,943	0,968
3400	0,888	0,911	0,961
3600	1,000	1,000	0,954

Tabla 2. Resultados fiabilidades individuales y total

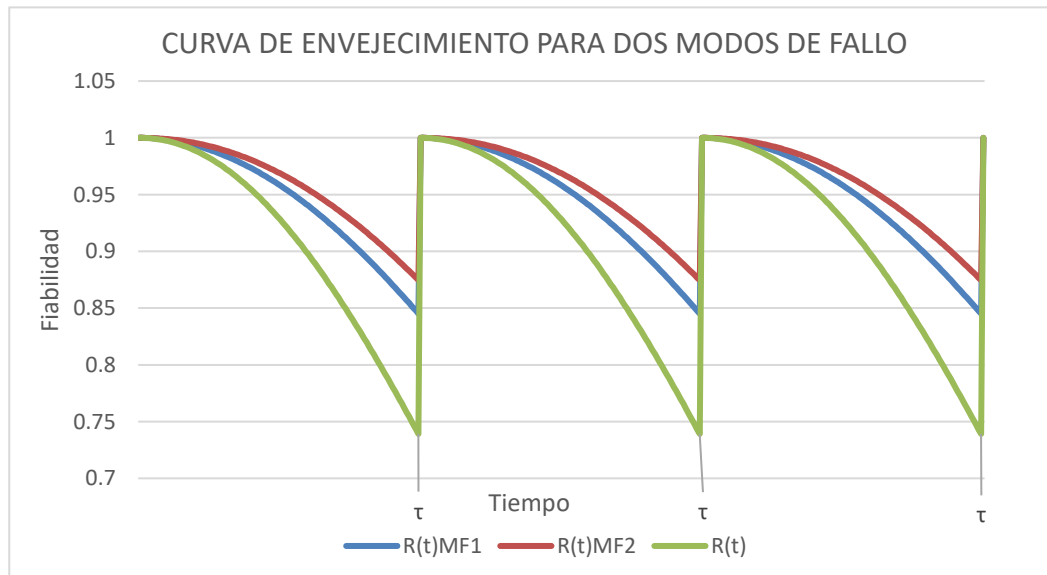


Figura 5. Fiabilidad total del sistema

5.2.4 Mantenimiento perfecto preventivo con tres modos de fallos independientes

En este caso, se contempla tres modos de fallos a los que se aplica respectivamente mantenimientos preventivos en intervalos de tiempo τ_1 , τ_2 y τ_3 .

La fiabilidad total del equipo vendrá definida por la expresión de fiabilidad vista anteriormente:

$$R_T(t) = R_1(t) * R_2(t) * R_3(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta_1}\right)^{\beta_1}} * e^{-\left(\frac{t}{\eta_2}\right)^{\beta_2}} * e^{-\left(\frac{t}{\eta_3}\right)^{\beta_3}} \quad (38)$$

$$R_T(t) = e^{-\left(\frac{t^{\beta_1}}{\eta^{\beta_1}} + \frac{t^{\beta_2}}{\eta^{\beta_2}} + \frac{t^{\beta_3}}{\eta^{\beta_3}}\right)} \quad (39)$$

En la Figura 6 la línea amarilla representa la evolución de la fiabilidad del primer modo de fallo, la línea azul la del segundo modo de fallo, la línea negra la del tercer modo de fallo y la línea roja la fiabilidad total del sistema. En el eje de abscisas se representa los instantes de tiempo (τ) en los que se realiza el mantenimiento preventivo. En el eje de ordenadas se representa la fiabilidad obtenida en cada instante de tiempo. Por el hecho de simplificar la representación de esta curva, supondremos que τ_1 , τ_2 y τ_3 son iguales.

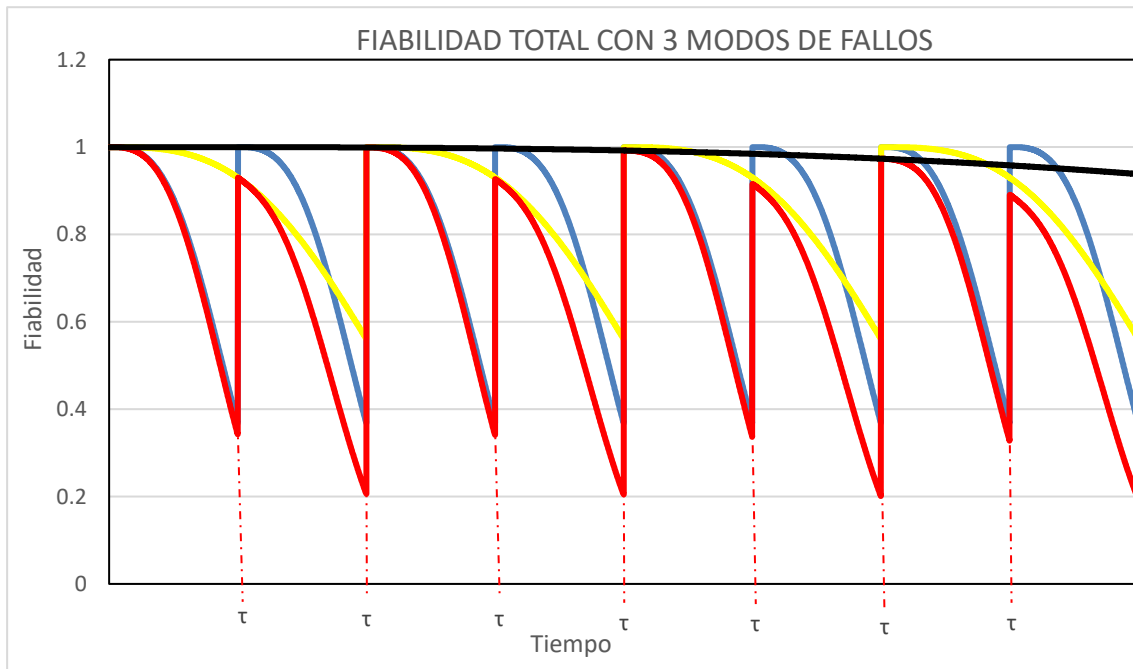


Figura 6. Fiabilidad total con tres modos de fallo

5.3 Curva de envejecimiento con mantenimiento imperfecto

Al igual que en el caso de mantenimiento perfecto, la fiabilidad total en cada instante de tiempo se obtiene a través del producto de las fiabilidades de cada modo de fallo. Al realizar el mantenimiento preventivo de uno de los modos de fallo, ese modo de fallo recupera su fiabilidad a 1 mientras que el resto recuperan su fiabilidad en general, en otro instante de tiempo. Sin embargo, existe un factor de envejecimiento ε propio del sistema, en el que un mantenimiento preventivo es totalmente independiente a él. Este parámetro hace referencia al desgaste por uso y/o edad del equipo en cuestión, el cual hay que tener en cuenta.

Suponiendo que el desgaste (ε) es constante, describimos la fórmula de fiabilidad total para dos modos de fallo. Debido a la complejidad que presenta la consideración de tres modos de fallo, no se muestra la correspondiente fórmula en esta sección.

5.3.1 Mantenimiento imperfecto para dos modos de fallo

Para describir la fórmula de fiabilidad para tres modos de fallo, se define la siguiente función:

$$I_n(t) = \begin{cases} R^1(t - \tau_1^1) * \varepsilon & \text{si } n = 1 \\ (I_{n-1} - \varepsilon) * R^1\left(\left|\tau_{\frac{n}{2}}^2 - \tau_{\frac{n}{2}}^1\right|\right) & \text{si } n \in \mathbb{N}, n \geq 2, n \text{ par} \\ (I_{n-1} - \varepsilon) * R^2\left(\left|\tau_{\frac{n}{2}+0.5}^2 - \tau_{\frac{n}{2}-0.5}^1\right|\right) & \text{si } n \in \mathbb{N}, n \geq 2, n \text{ impar} \end{cases}$$

Siendo:

n : Orden del mantenimiento preventivo realizados en general de todos los modos de fallo del equipo.

τ_j^i : Instante de tiempo en el que se realiza el mantenimiento preventivo en el modo de fallo i , realizado j veces.

R^i : Fiabilidad de modo de fallo i .

Así, la función de fiabilidad sería:

$$R_T(t) = I_n(t) * R^n(t) \quad (41)$$

6 APLICACIÓN A UN CASO REAL

La gestión de activos en la industria se ha convertido en un factor muy importante a estudiar. Esto es debido a que una buena gestión de activos va a proporcionar una mejora en costes y disminución de riesgos. Es por ello por lo que se ha pasado de recoger los datos manualmente y ser tratados individualmente por los ingenieros a implementar sistemas cada vez más sofisticados y automáticos [15]. Estos sistemas son más estándares y recogen directamente la información de los activos, sin necesidad de hacerlo manualmente. Al extraer los datos directamente de los activos, se consigue mayor exactitud y facilidad. En el caso del motor 12V diésel, es especialmente importante este estudio ya que, a pesar de que sus componentes están recubiertos de líquido refrigerante, las altas temperaturas del funcionamiento del motor provocan fugas en los mismos, provocando deterioro a largo plazo [16]. Debido a la importancia que representa la fiabilidad en este tipo de motores, presentaremos en este capítulo un análisis de fiabilidad considerando datos reales para su estudio.

Para realizar el análisis de la fiabilidad se cuenta con seis etapas [15]:

5. Extracción. Se extraen los datos de tiempos entre fallos de cada modo de fallo.
6. Filtración (estructurado). Se filtran los datos seleccionando datos de campos relevantes.
7. Filtración (No estructurado). Se filtran identificando semánticamente eventos relevantes.
8. Transformación. Se transforman las etapas anteriores para automatizarlo basándose en los objetivos de la empresa.
9. Cálculo. Se calculan los parámetros de la distribución e implementarlo.
10. Verificación. Se verifica la validez de la implementación con los resultados obtenidos.

Las cuatro primeras etapas son las más difíciles de realizar ya que es imposible llevar un seguimiento continuo de todos los datos de los activos. En el día a día, los ingenieros se limitan a estudiar aquellos fallos más repetitivos y/o críticos para realizar el análisis de fiabilidad. No obstante, existen nuevos softwares como RelOps que permiten realizar todas estas etapas de forma más sencilla y rápida, con código abierto [15]. Este software diariamente cataliza los datos que obtienen para mantener en todo momento los resultados obtenidos actualizados. Con un bucle REL, se realiza de las etapas dos a la seis, contando con ayuda de ingenieros y de otros sistemas como MLOps debido a tratar con documentación estructurada y no estructurada. Después, se entra en una fase de desarrollo para aunar los resultados obtenidos con los programas informáticos para actualizar el sistema y poder tomar medidas de productividad. Finalmente, se procede al despliegue, seguimiento y control en la producción. Es el último paso para poner en práctica los resultados y decisiones tomadas en los pasos anteriores [15].

En este capítulo se estudia la fiabilidad de un equipo (motor 12V diésel marino) formado por tres modos de fallo, como se detallará en las siguientes secciones. El objetivo de este capítulo es obtener la expresión de la función de fiabilidad del equipo, de la correspondiente curva de envejecimiento, así como un estudio del óptimo para realizar el mantenimiento preventivo de cada modo de fallo. Para ello, supondremos conocida las etapas 1-4 del esquema anterior y nos centraremos en la fase final del análisis de fiabilidad (etapas 5 y 6) del motor 12V diésel marino. Calcularemos la fiabilidad del equipo a través de la función distribución de Weibull de tres modos de fallo (ver capítulo 4). Así, será necesario la obtención de los parámetros de la distribución de Weibull de cada uno de los modos de fallos de dicho equipo, los cuales estimaremos a partir de un algoritmo.

En las siguientes secciones se obtendrá las distribuciones de Weibull para cada uno de los modos de fallos de un caso real siguiendo el esquema de la Figura 7 [17].

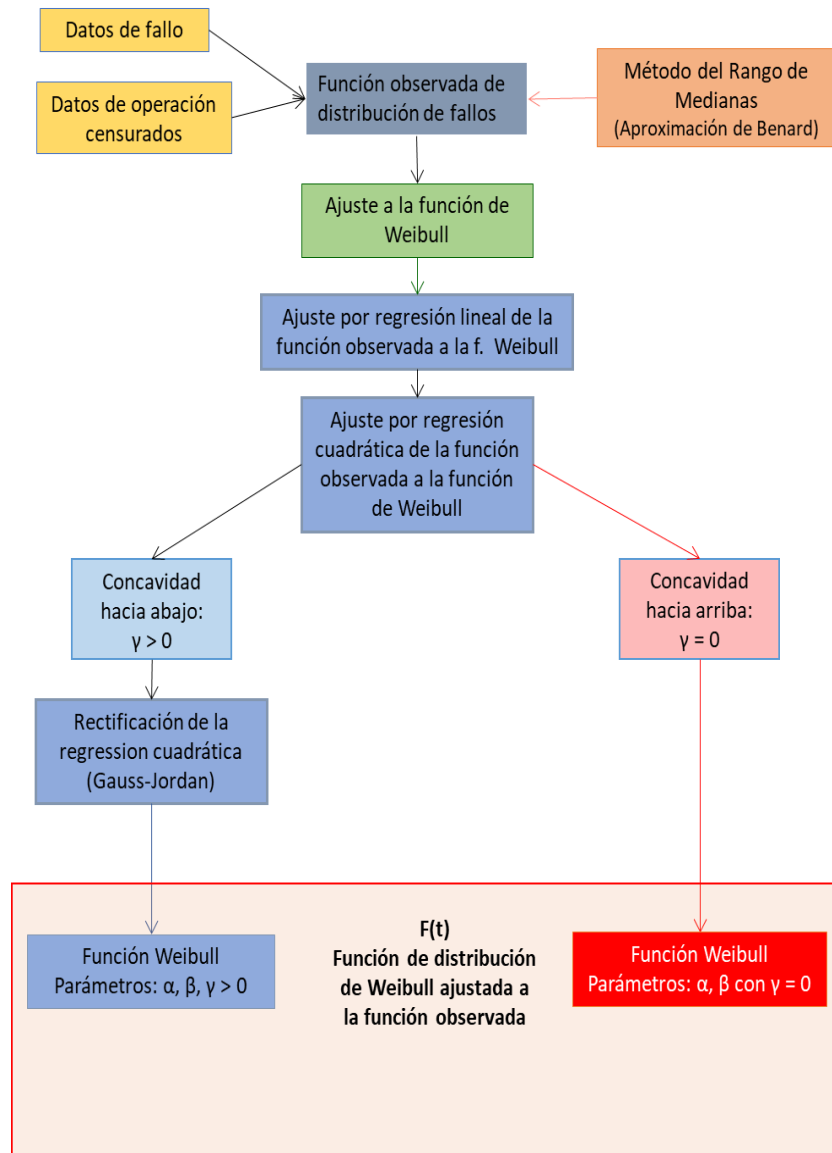


Figura 7. Flujo de tareas para la determinación de las funciones de distribución de fallos

6.1 Descripción del caso de estudio y recogida de datos

Realizaremos un caso de estudio correspondiente a la evolución de los fallos de tres modos de fallos típicos en un motor 12V diésel marino, de 48 litros de desplazamiento y 1500 kW de potencia. Este tipo de motor se utiliza, dependiendo del tamaño del barco, como motor principal o auxiliar. En algunos casos, se puede emplear como mecanismo auxiliar de generación eléctrica en caso de que falle los mecanismos principales de suministro eléctrico a una instalación (por ejemplo, un centro médico) [18]. Consideramos como modos de fallos los turbocompresores y las bombas de refrigerante y de agua salada.

La aplicación para la que ha sido diseñado este motor requiere la reparación general de estos componentes cada 4500 horas de funcionamiento. El propietario de una flota de 15 barcos, con dos motores cada uno, ha recogido los datos de fallo y las revisiones realizadas para estos componentes a lo largo de su ciclo de vida (4500 horas).

Cada motor tiene instalado dos turbos. La reparación de un turbo tiene un coste medio de piezas de 7602 €, mientras que la revisión representa sólo 4035 €. Ambas intervenciones requieren 19 horas de trabajo de un técnico.

En nuestro caso, los motores, durante su ciclo de vida, fallan 8 turbos y 22 alcanzan su overhaul. Cuando se llega al overhaul, los turbos son revisados y rehabilitados, mientras que los ocho turbos que fallan son reparados para que el motor complete su ciclo y posteriormente no fallan.

Los datos de fallo y revisiones correspondientes a los turbos y bombas se recogen en la Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 5. En la primera columna se enumeran los barcos, en la segunda columna cuándo han fallado el turbo o motor en cada uno de ellos y en la tercera columna el tiempo restante hasta llegar al overhaul.

TURBOS		
Barco	Fallo	Censura
1	4207	293
		4500
2		4500
		4500
3		4500
		4500
4		4500
	3841	659
5	4056	444
		4500
6		4500
		4500
7		4500
		4500
8		4500
	3661	839
9		4500
		4500
10	4358	142
		4500
11		4500
	3704	796
12		4500
		4500
13	4445	55
		4500
14		4500
	2668	1832
15		4500
		4500

Tabla 3. Recopilación de los datos de fallos y revisiones de los turbos

BOMBA REFRIGERANTE		
Barco	Fallo	Censura
1		4500
2	3621	879
3		4500
4	3531	969
5		4500
6	2895	1605
7		4500
8		4500
9	4387	113
10		4500
11	4097	403
12		4500
13		4500
14		4500
15	3659	841

Tabla 4. Recopilación de los datos de fallos y revisiones de la bomba refrigerante

BOMBA DE AGUA SALADA		
Barco	Fallo	Censura
1		4500
2	4215	285
3	4362	138
4		4500
5		4500
6		4500
		4500
7		4500
8	3870	630
9		4500
10		4500
11		4500
12	4102	398
13		4500
14	3753	747
15		4500

Tabla 5. Recopilación de los datos de fallos y revisiones de la bomba salada

Los datos de costos y horas de mano de obra correspondientes a las intervenciones de reparación o mantenimiento preventivo se recogen en Tabla 6. Recopilación de los costes y horas de las intervenciones.

COMPONENTE	REPUESTOS (€)	MANO DE OBRA (HORAS)
Reparación Turbo	7602	19
Revisión Turbo	4035	19
Reparación Bomba Refrigerante	1387	4,5
Revisión Bomba Refrigerante	683	4,5
Reparación Bomba Agua Salada	2452	4,5
Revisión Bomba Agua Salada	571	4,5

Tabla 6. Recopilación de los costes y horas de las intervenciones

Las Tablas 7, 8 y 9 recogen datos sobre incidencias de cada uno de los modos de fallos; turbo, bomba refrigerante y bomba de agua salada, respectivamente. En la primera columna se describe el orden de la incidencia producida, en la segunda columna se representa el tipo de fallo (siendo F=Fallos y R=intervenciones preventivas del motor), las últimas tres columnas recogen datos sobre las horas de inicio y fin de cada incidencia y las horas totales de operación.

N.º ORDEN	TIPO	HORAS INICIO	HORAS FIN	HORAS DE OPERACIÓN
1	F	0	4207	4207
2	R	4207	4500	293
3	R	0	4500	4500
4	R	0	4500	4500
5	R	0	4500	4500
6	R	0	4500	4500
7	R	0	4500	4500
8	R	0	4500	4500
9	F	0	3841	3841
10	R	3841	4500	659
11	F	0	4056	4056
12	R	4056	4500	444
13	R	0	4500	4500
14	R	0	4500	4500
15	R	0	4500	4500
16	R	0	4500	4500
17	R	0	4500	4500
18	R	0	4500	4500
19	F	0	3661	3661
20	R	3661	4500	839
21	R	0	4500	4500
22	R	0	4500	4500
23	F	0	4358	4358
24	R	4358	4500	142
25	R	0	4500	4500
26	R	0	4500	4500
27	F	0	3704	3704
28	R	3704	4500	796
29	R	0	4500	4500
30	R	0	4500	4500
31	F	0	4445	4445
32	R	4445	4500	55
33	R	0	4500	4500
34	R	0	4500	4500
35	F	0	2668	2668
36	R	2668	4500	1832
37	R	0	4500	4500
38	R	0	4500	4500

Tabla 7. Datos sobre incidencias de los turbos

N.º ORDEN	TIPO	HORAS INICIO	HORAS FIN	HORAS DE OPERACIÓN
1	R	0	4500	4500
2	F	0	3621	3621
3	R	3621	4500	879
4	R	0	4500	4500
5	F	0	3531	3531
6	R	3531	4500	969
7	R	0	4500	4500
8	F	0	2895	2895
9	R	2895	4500	1605
10	R	0	4500	4500
11	R	0	4500	4500
12	F	0	4387	4387
13	R	4387	4500	113
14	R	0	4500	4500
15	F	0	4097	4097
16	R	4097	4500	403
17	R	0	4500	4500
18	R	0	4500	4500
19	R	0	4500	4500
20	F	0	3659	3659
21	R	3659	4500	841

Tabla 8. Datos sobre incidencias de la bomba refrigerante

N.º ORDEN	TIPO	HORAS INICIO	HORAS FIN	HORAS DE OPERACIÓN
1	R	0	4500	4500
2	F	0	4215	4215
3	R	4215	4500	285
4	F	0	4362	4362
5	R	4362	4500	138
6	R	0	4500	4500
7	R	0	4500	4500
8	R	0	4500	4500
9	R	0	4500	4500
10	R	0	4500	4500
11	F	0	3870	3870
12	R	3870	4500	630
13	R	0	4500	4500
14	R	0	4500	4500
15	R	0	4500	4500
16	F	0	4102	4102
17	R	4102	4500	398
18	R	0	4500	4500
19	F	0	3753	3753
20	R	3753	4500	747
21	R	0	4500	4500

Tabla 9. Datos sobre incidencias de la bomba de agua salada

6.2 Obtención de los parámetros de la distribución de Weibull

En primer lugar, es necesario disponer de los datos de fallo y los datos de operación censurado. A partir de ahí, los pasos a seguir para la obtención de los parámetros de una distribución de Weibull de cada modo son las siguientes [19]:

[Paso 1] Se realiza una tabla en la que se relacione los tiempos hasta el fallo y los tiempos hasta revisión/repación. Estos han de estar ordenados según ocurran. La tabla también tiene que incluir las horas de funcionamientos de cada fase.

[Paso 2] Se realiza otra tabla con las horas de funcionamiento ordenadas de menor a mayor. Para las fases de fallo, se calcula el nuevo incremento y número de orden.

[Paso 3] Mediante la aproximación de Benard, se calcula la función observada para cada fallo.

[Paso 4] Se ajusta por regresión lineal la función Weibull a la función observada. Para ello se aplica escalas logarítmicas en el eje vertical $\ln(\ln(1/(1-F_i)))$ y en el eje horizontal $\ln(t)$. Para calcular el parámetro de forma (β) se obtiene con la pendiente de la recta de ajuste y el parámetro de escala (η) por la exponencial del cociente entre la ordenada en el origen y la pendiente de la línea de ajuste.

[Paso 5] A continuación, se ajusta por regresión cuadrática de la función observada a la función de Weibull. Se determina un valor para el parámetro de origen el cual haga que se produzca el ajuste. En el caso de que la función cuadrática será cóncava hacia arriba, el parámetro de origen adquiere el valor 0. Si fuera cóncava hacia abajo, el parámetro de origen sería mayor que 0.

[Paso 6] Finalmente, se vuelve a calcular los nuevos parámetros de forma y escala de la misma forma que en el Paso 4 pero esta vez teniendo en cuenta el parámetro de origen.

En la Figura 8 [19] se muestra un esquema sobre el proceso que se seguirá, el cual está basado en los pasos del algoritmo visto anteriormente en la Figura 7.

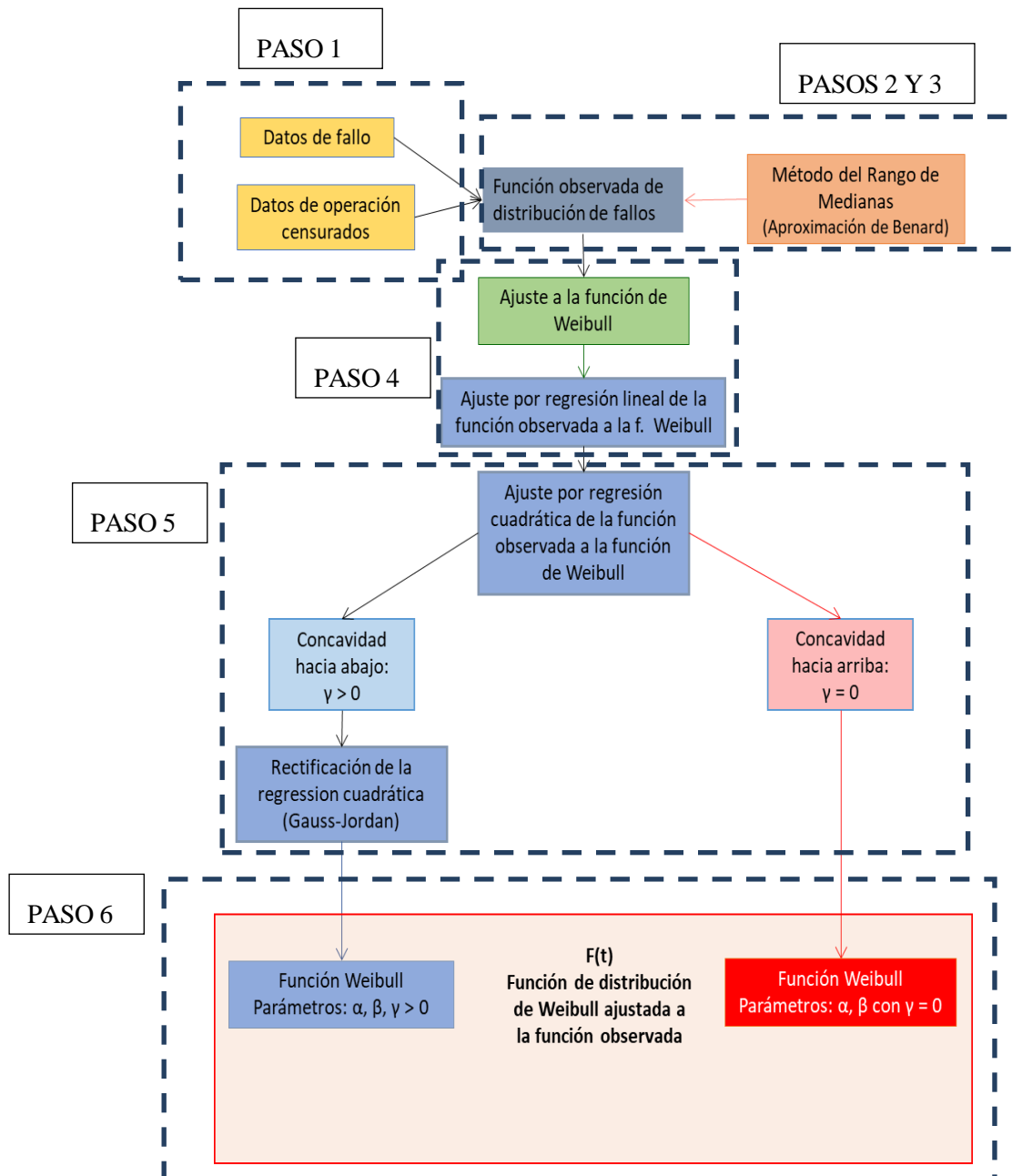


Figura 8. Determinación de las funciones de distribución de fallos por pasos

6.2.1 Paso 2 del algoritmo: manipulación de datos

Como se puede observar en las Tablas 7, 8 y 9, en el primer modo de fallo (turbo) hay 8 fallos y 30 revisiones y reparaciones. Para el segundo modo (bomba refrigerante) de fallo hay 6 fallos y 15 revisiones y reparaciones. El tercer modo de fallo (bomba de agua salada) cuenta con 5 fallos y 15 reparaciones y revisiones.

Para aplicar el método de rango de medianas es necesario realizar cambios previamente en los datos recogidos en dichas tablas. Para ello, se reordenan los datos teniendo en cuenta las horas de funcionamiento en orden creciente. Una vez ordenadas, se aplica la fórmula del nuevo incremento (42) y de nuevo número de orden (43) sobre las incidencias tipo Fallo:

$$\Delta = \frac{N + 1 - (\text{nuevo número de orden del elemento anterior que falló})}{N + 1 - (\text{Número de elementos anteriores})} \quad (42)$$

$$\text{Nuevo número de orden} = \Delta + \text{número de orden anterior} \quad (43)$$

Siendo N el número de elementos totales.

A continuación, en la Tabla 10, Tabla 11 y Tabla 12 se muestran el nuevo número de orden, el tipo de incidencia, horas de funcionamiento (ordenadas de forma creciente) y, por último, el resultado de aplicar las fórmulas de nuevo incremento y número de orden.

N.º ORDEN	HORA FIN	HORAS DE OPERACIÓN	Δ	NUEVO ORDEN
32	R	55		
24	R	142		
2	R	293		
12	R	444		
10	R	659		
28	R	796		
20	R	839		
36	R	1832		
35	F	2668	1,25806452	1,25806452
19	F	3661	1,25806452	2,51612903
27	F	3704	1,25806452	3,77419355
9	F	3841	1,25806452	5,03225806
11	F	4056	1,25806452	6,29032258
1	F	4207	1,25806452	7,5483871
23	F	4358	1,25806452	8,80645161
31	F	4445	1,25806452	10,0645161
3	R	4500		
4	R	4500		
5	R	4500		
6	R	4500		
7	R	4500		
8	R	4500		
13	R	4500		
14	R	4500		
15	R	4500		
16	R	4500		
17	R	4500		
18	R	4500		
21	R	4500		
22	R	4500		
25	R	4500		
26	R	4500		
29	R	4500		
30	R	4500		
33	R	4500		
34	R	4500		
37	R	4500		
38	R	4500		

Tabla 10. Resultados manipulación de datos para el turbo

N.º ORDEN	TIPO	HORAS DE OPERACIÓN	Δ	NUEVO ORDEN
13	R	113		
16	R	403		
21	R	841		
3	R	879		
6	R	969		
9	R	1605		
8	F	2895	1,182	1,182
5	F	3531	1,182	2,364
2	F	3621	1,182	3,545
20	F	3659	1,182	4,727
15	F	4097	1,182	5,909
12	F	4387	1,182	7,091
1	R	4500		
4	R	4500		
7	R	4500		
10	R	4500		
11	R	4500		
14	R	4500		
17	R	4500		
18	R	4500		
19	R	4500		

Tabla 11. Resultados manipulación de datos para la bomba refrigerante

N.º ORDEN	TIPO	HORAS DE OPERACIÓN	Δ	NUEVO ORDEN
5	R	138		
3	R	285		
17	R	398		
12	R	630		
20	R	747		
19	F	3753	1,294	1,294
11	F	3870	1,294	2,588
16	F	4102	1,294	3,882
2	F	4215	1,294	5,176
4	F	4362	1,294	6,471
1	R	4500		
6	R	4500		
7	R	4500		
8	R	4500		
9	R	4500		
10	R	4500		
13	R	4500		
14	R	4500		
15	R	4500		
18	R	4500		
21	R	4500		

Tabla 12. Resultados manipulación de datos para la bomba de agua salada

6.2.2 Paso 3 del algoritmo: obtención de la función observada

Teniendo en cuenta los datos recogidos en las Tablas 10, 11 y 12, se calcula la función de distribución observada F_i la cual es la encargada de estimar la distribución teórica de Weibull para los datos de fallo. La fórmula utilizada es el método de rango de medianas, también llamada aproximación de Benard (44):

$$F_i = \frac{i - 0.3}{N + 0.4} \quad (44)$$

Siendo i el nuevo número de orden calculado en la Ecuación (43).

En la Tabla 13, Tabla 14 y Tabla 15 se reflejan las horas de operación antes del fallo(i) y distribución observada ($F(t)$), así como el resultado de aplicar la fórmula de Benard.

HORAS DEL FALLO (i)	DISTRIBUCIÓN OBSERVADA F(t)	HORAS DE OPERACIÓN
2668		55
3661		142
3704		293
3841		444
4056		659
4207		796
4358		839
4445		1832
	0,0249496	2668
	0,05771169	3661
	0,09047379	3704
	0,12323589	3841
	0,15599798	4056
	0,18876008	4207
	0,22152218	4358
	0,25428427	4445

Tabla 13. Valores de la función observada del primer modo de fallo calculados mediante la fórmula de Benard

HORAS DEL FALLO (i)	DISTRIBUCIÓN OBSERVADA F(t)	HORAS DE OPERACIÓN
2895		113
3531		403
3621		841
3659		879
4097		969
4387		1605
	0,041	2895
	0,096	3531
	0,157	3621
	0,207	3659
	0,262	4097
	0,317	4387

Tabla 14. Valores de la función observada del segundo modo de fallo calculados mediante la fórmula de Benard

HORAS DEL FALLO (i)	DISTRIBUCIÓN OBSERVADA F(t)	HORAS DE OPERACIÓN
3753		138
3870		285
4102		398
4215		630
4362		747
	0,046	3753
	0,107	3870
	0,1674	4102
	0,228	4215
	0,288	4362

Tabla 15. Valores de la función observada del tercer modo de fallo calculados mediante la fórmula de Benard

6.2.3 Paso 4 del algoritmo: ajuste de la función de Weibull

A continuación, se va a calcular los parámetros β y η de la distribución Weibull con datos que se obtienen de las tablas de los valores de la función observada (Tablas 13, 14 y 15) para cada uno de los modos de fallo. En Tablas 16, 17 y 18, se incluyen los datos horas del fallo y distribución observada de las tablas anteriores y se añaden dos nuevas columnas usando escala logarítmica. Concretamente, la tercera columna de estas tablas es el logaritmo neperiano de las horas de fallo ($\ln(t)$) y la cuarta columna $\ln(\ln(1/(1-F(t))))$. A partir de estas dos últimas columnas se obtiene la recta de regresión lineal, siendo el parámetro de forma (β) la pendiente de dicha recta de regresión. Para obtener el parámetro de escala (η), se calcula la exponencial del cociente entre la pendiente y la ordenada en el origen de la recta de regresión.

Parámetros distribución Weibull del primer modo de fallo:

HORAS DEL FALLO t	DISTRIBUCIÓN OBSERVADA F(t)	LN t R. MEDIANAS	LN LN (1/(1-F(t))) R. MEDIANAS
2668	0,025	7,889	-3,678
3661	0,058	8,205	-2,823
3704	0,091	8,217	-2,357
3841	0,123	8,253	-2,029
4056	0,156	8,308	-1,774
4207	0,189	8,345	-1,565
4358	0,226	8,38	-1,385
4445	0,254	8,4	-1,226

Tabla 16. Valores para obtener los dos parámetros del primer modo de fallo

La ecuación de la recta de regresión obtenida es:

$$y = 4,888x - 42,429 \quad (45)$$

Siendo:

$$\beta_1 = 4,888$$

$$\eta_1 = e^{\left(\frac{-4,888}{-42,429}\right)} = 5884,863$$

La siguiente Figura 9 muestra cómo se ajusta la recta de regresión a los datos de la Tabla 16.

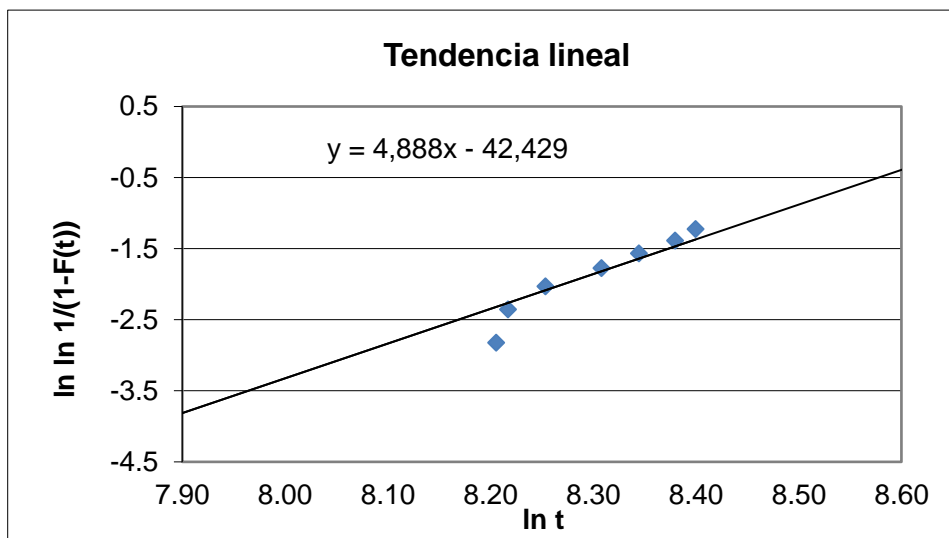


Figura 9. Obtención de los parámetros de la función Weibull (dos parámetros) para el primer modo de fallo

Parámetros distribución Weibull del segundo modo de fallo:

HORAS DEL FALLO t	DISTRIBUCIÓN OBSERVADA F(t)	LN t R. MEDIANAS	LN LN (1/(1-F(t))) R. MEDIANAS
2895	0,041	7,971	-3,168
3531	0,096	8,169	-2,289
3621	0,157	8,195	-1,805
3659	0,207	8,205	-1,462
4097	0,262	8,318	-1,191
4387	0,317	8,386	-0,963

Tabla 17. Valores para obtener los parámetros del segundo modo de fallo

La ecuación de la recta de regresión obtenida es:

$$y = 5,484x - 46,48 \tag{46}$$

Siendo:

$$\beta_2 = 5,484$$

$$\eta_2 = e^{\left(\frac{-5,484}{-46,48}\right)} = 5104,73$$

La siguiente Figura 10 se muestra cómo se ajusta la recta de regresión a los datos de la Tabla 17.

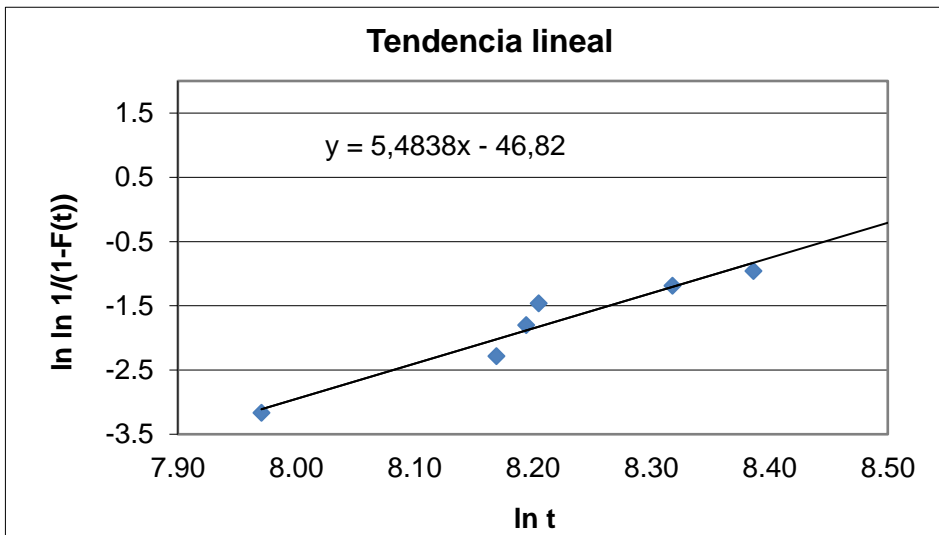


Figura 10. Obtención de los dos parámetros de la función Weibull (dos parámetros) para el segundo modo de fallo

Parámetros distribución Weibull del tercer modo de fallo:

HORAS DEL FALLO t	DISTRIBUCIÓN OBSERVADA F(t)	LN t R. MEDIANAS	LN LN (1/(1-F(t))) R. MEDIANAS
3753	0,047	8,230	-3,046
3870	0,107	8,261	-2,18
4102	0,167	8,319	-1,698
4215	0,228	8,346	-1,352
4362	0,288	8,381	-1,078

Tabla 18. Valores para obtener los dos parámetros del tercer modo de fallo

La ecuación de la recta de regresión obtenida es:

$$y = 12,246x - 103,6 \quad (47)$$

Siendo:

$$\beta_3 = 12,24$$

$$\eta_3 = e^{\left(\frac{-12,24}{-103,6}\right)} = 4723,413$$

La siguiente Figura 11 muestra cómo se ajusta la recta de regresión a los datos de la Tabla 18.

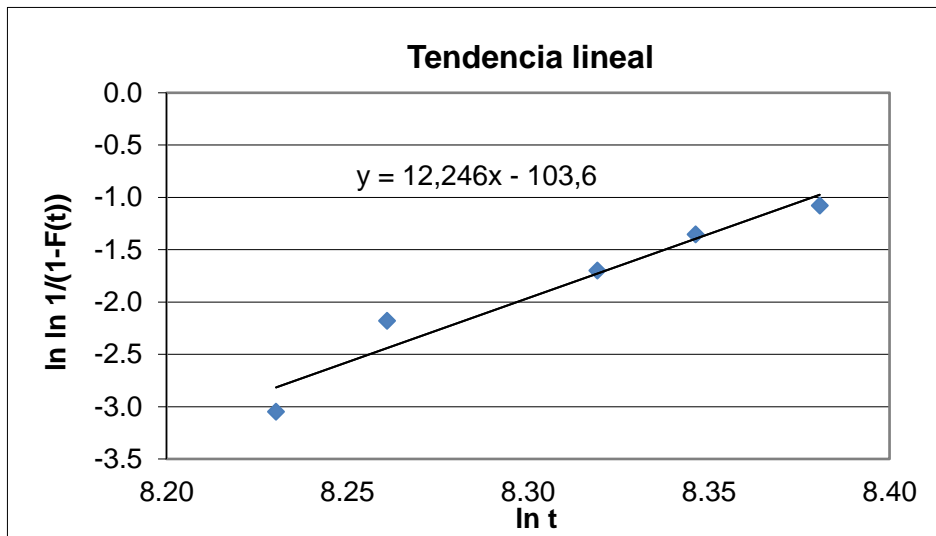


Figura 11. Obtención de los parámetros de la función Weibull (dos parámetros) para el tercer modo de fallo

6.2.4 Paso 5 del algoritmo: ajuste por regresión cuadrática

A continuación, se va a volver a calcular estos parámetros teniendo en cuenta el tercer parámetro de la distribución de Weibull, el parámetro de origen. Para ello, se vuelve a ajustar por mínimos cuadrados una parábola formada por los mismos datos que en la Tabla 16, Tabla 17 y Tabla 18. Sin embargo, en el eje horizontal vamos a restar en el logaritmo el parámetro de origen a las horas de funcionamiento como se puede observar en la Tabla 19, Tabla 20 y Tabla 21.

El parámetro de origen se estima ajustando la función cuadrática a la función lineal, hasta aproximar el término de segundo grado de la parábola a 0, haciendo que coincida en ambas funciones el coeficiente del término de primer grado y el término independiente. En el segundo y tercer modo de fallo, el coeficiente de x^2 es negativo por lo que la parábola es cóncava hacia abajo. Esto hace que el parámetro de origen sea $\gamma > 0$. Sin embargo, para el primer modo de fallo ocurre el caso contrario. El coeficiente de x^2 es positivo por lo que la parábola es cóncava hacia arriba, lo que hace que $\gamma = 0$. Por tanto, los valores de los parámetros de forma y escala son los mismos que se calcularon anteriormente para este modo de fallo. La representación gráfica del ajuste de los modos de fallo se muestra en la Figura 12, Figura 13 y Figura 14.

HORAS DEL FALLO t	DISTRIBUCIÓN OBSERVADA $F(t)$	LN t' R. MEDIANAS $t'=t-\gamma$	LN (LN (1/(1-F(t))) R. MEDIANAS
2668	0,025	7,889	-3,678
3661	0,058	8,205	-2,823
3704	0,091	8,217	-2,357
3841	0,123	8,253	-2,029
4056	0,156	8,308	-1,774
4207	0,189	8,345	-1,565
4358	0,226	8,380	-1,385
4445	0,254	8,400	-1,226

Tabla 19. Datos necesarios para la obtención de los tres parámetros de la función Weibull del primer modo de fallo

HORAS DEL FALLO t	DISTRIBUCIÓN OBSERVADA $F(t)$	LN t' R. MEDIANAS $t'=t-\gamma$	LN (LN (1/(1-F(t))) R. MEDIANAS
2895	0,041	6,908	-3,168
3531	0,096	7,400	-2,289
3621	0,157	7,454	-1,805
3659	0,207	7,476	-1,462
4097	0,262	7,697	-1,191
4387	0,317	7,821	-0,963

Tabla 20. Datos necesarios para la obtención de los tres parámetros de la función Weibull del segundo modo de fallo

HORAS DEL FALLO t	DISTRIBUCIÓN OBSERVADA $F(t)$	LN t' R. MEDIANAS $t'=t-\gamma$	LN (LN (1/(1-F(t))) R. MEDIANAS
3753	0,047	4,591	-3,046
3870	0,107	5,373	-2,18
4102	0,167	6,104	-1,698
4215	0,228	6,329	-1,352
4362	0,288	6,562	-1,078

Tabla 21. Datos necesarios para la obtención de los tres parámetros de la función Weibull del tercer modo de fallo

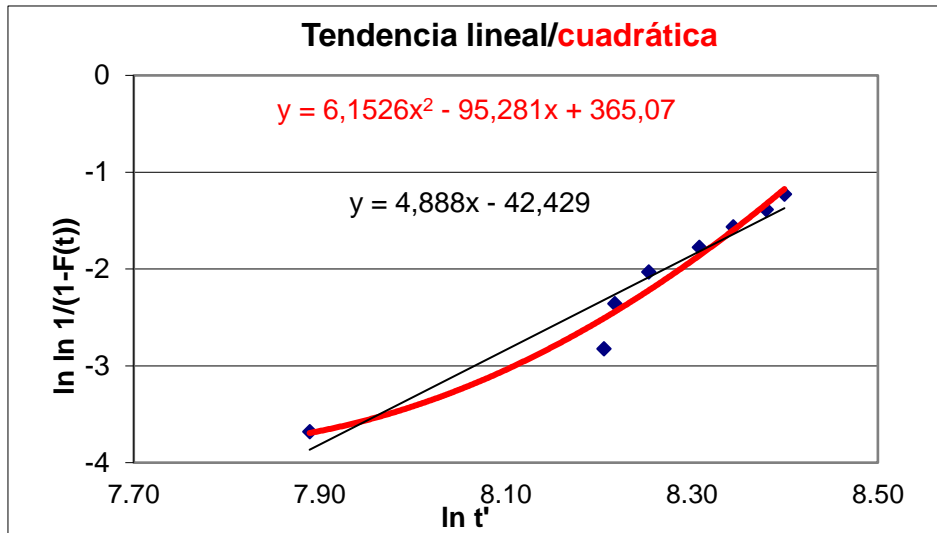


Figura 12. Obtención de los parámetros de la función Weibull (tres parámetros) para el primer modo de fallo

Como se ha mencionado anteriormente, los parámetros para la distribución Weibull de dos parámetros coinciden con que se han obtenido para la distribución Weibull de tres parámetros al ser la función cuadrática cóncava hacia arriba. Por ello, la función distribución Weibull para el primer modo de fallo queda definido como $\beta_1 = 4,888$, $\eta_1 = 5884,863$ y $\gamma_1 = 0$.

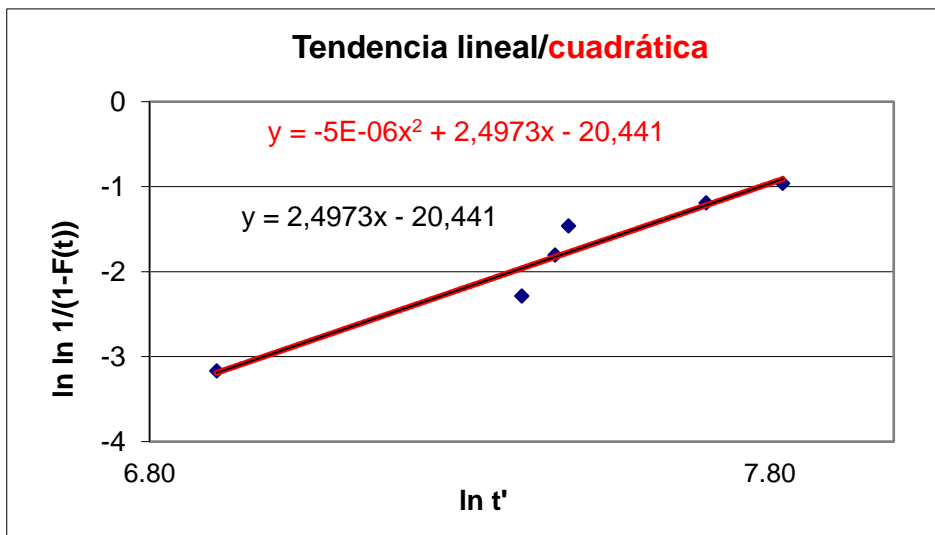


Figura 13. Obtención de los parámetros de la función Weibull (con $\gamma_2 = 1894,59$) para el segundo modo de fallo

Como se observa en Figura 13, para el modo de fallo 2, el parámetro de origen que ajusta la función cuadrática a la función lineal es $\gamma_2 = 1894,59$. Los parámetros de forma y escala que se obtienen son $\beta_2 = 2,49$ y $\eta_2 = 3587,605$, respectivamente.

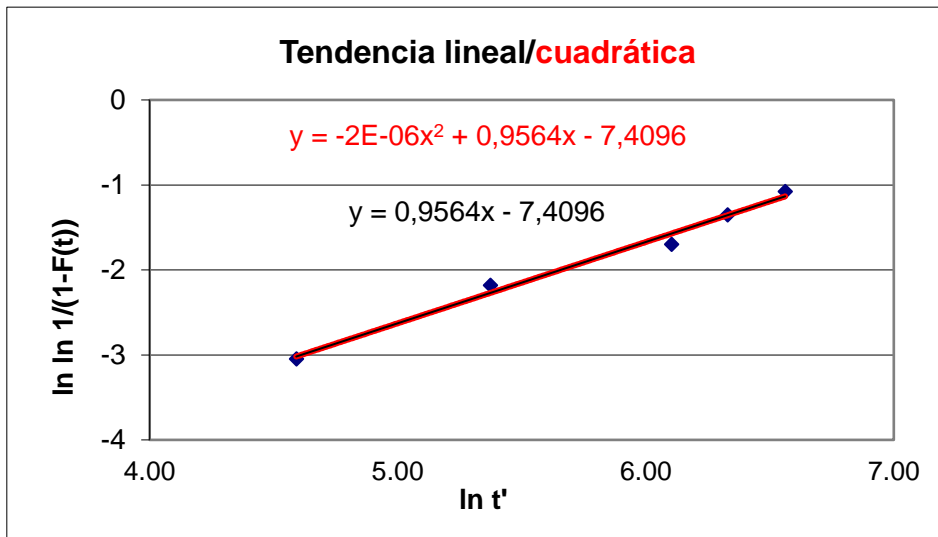


Figura 14. Obtención de los parámetros de la función Weibull (con $\gamma_3 = 3654,421$) para el tercer modo de fallo

Como se observa en la Figura 14, para el modo de fallo 3, el parámetro de origen que ajusta la función cuadrática a la función lineal es $\gamma_3 = 3654,421$. Los parámetros de forma y escala que se obtienen son $\beta_2 = 0,95$ y $\eta_3 = 2315,519$, respectivamente.

6.2.5 Paso 6 del algoritmo: Construcción función de Weibull

A continuación, para los dos posibles casos que hemos estudiado del parámetro de origen, se va a definir la fiabilidad de cada modo de fallo y la expresión de la fiabilidad total como producto de estas.

Para $\gamma = 0$

La función de Weibull de cada modo de fallo viene determinada por las siguientes expresiones:

- Para el primer modo de fallo la función fiabilidad queda definida como:

$$R_1 = e^{-\left(\frac{t}{5884,86}\right)^{4,89}} \quad (48)$$

- Para el segundo modo de fallo la función fiabilidad queda definida como:

$$R_2 = e^{-\left(\frac{t}{5104,73}\right)^{5,48}} \quad (49)$$

- Para el tercer modo de fallo la función fiabilidad queda definida como:

$$R_3 = e^{-\left(\frac{t}{4723,41}\right)^{12,24}} \quad (50)$$

Por tanto, la expresión de la fiabilidad total es:

$$R_T = R_1 * R_2 * R_3 = e^{-\left(\frac{t}{5884,86}\right)^{4,89}} * e^{-\left(\frac{t}{5104,73}\right)^{5,48}} * e^{-\left(\frac{t}{4723,41}\right)^{12,24}} \quad (51)$$

Para $\gamma > 0$

La función de Weibull de cada modo de fallo viene determinada por las siguientes expresiones:

- Para el primer modo de fallo la función fiabilidad queda definida como:

$$R_1 = e^{-\left(\frac{t}{5884,86}\right)^{4,89}} \quad (52)$$

- Para el segundo modo de fallo la función fiabilidad queda definida como:

$$R_2 = e^{-\left(\frac{t-1894,76}{3587,61}\right)^{2,49}} \quad (53)$$

- Para el tercer modo de fallo la función fiabilidad queda definida como:

$$R_3 = e^{-\left(\frac{t-3654,42}{2315,52}\right)^{0,95}} \quad (54)$$

Por tanto, la expresión de la fiabilidad total es:

$$R_T = R_1 * R_2 * R_3 = e^{-\left(\frac{t}{5884,86}\right)^{4,89}} * e^{-\left(\frac{t-1894,76}{3587,61}\right)^{2,49}} * e^{-\left(\frac{t-3654,42}{2315,52}\right)^{0,95}} \quad (55)$$

Como se puede observar, al considerar el parámetro de origen, los parámetros de forma y escala cambian, haciendo que la expresión de la función fiabilidad también varíe.

Calidad del ajuste

Una vez calculados los parámetros de la función distribución Weibull para dos y tres parámetros, es necesario determinar la calidad de los ajustes. Para ello, se recurre al error cuadrático medio definido en la Ecuación (56):

$$\text{Error Cuadrático Medio} = \frac{1}{N} * \sum (F_{\text{observada}} - F_{\text{teórica}})^2 \quad (56)$$

Para el primer modo de fallo, al ser el parámetro de origen cero, el error cuadrático es el mismo tanto para función distribución Weibull para dos parámetros como la de tres parámetros. El error cuadrático de la aproximación se observa en la Figura 15.

2-3 PARÁMETROS		
F. Teórica	F. observada	Error Cuadrático
-3,867	-3,678	0,036
-2,321	-2,823	0,252
-2,263	-2,356	0,008
-2,086	-2,029	0,003
-1,820	-1,774	0,002
ERROR CUADRÁTICO MEDIO		0,06

Tabla 22. Calculo error cuadrático del primer modo de fallo

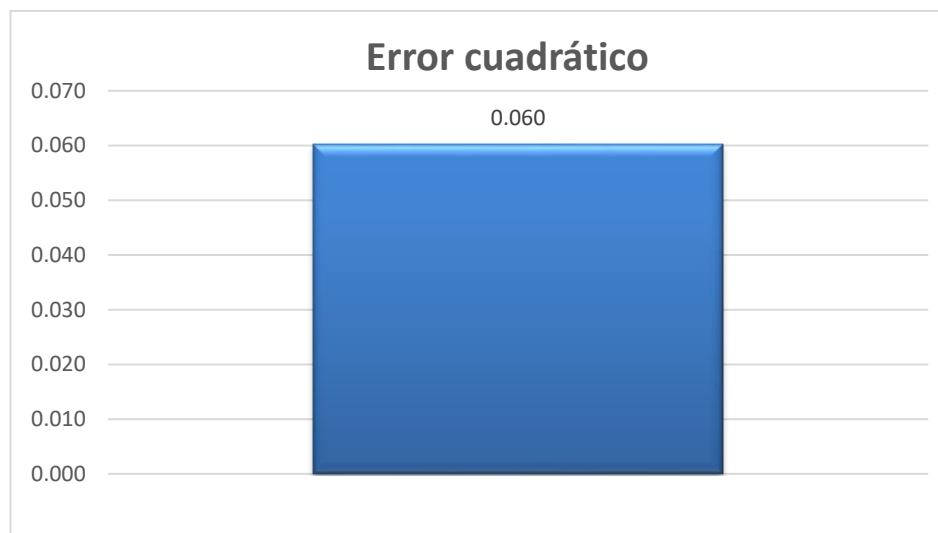


Figura 15. Error cuadrático del primer modo de fallo

Para el segundo modo de fallo, el error cuadrático medio de la función distribución Weibull de dos parámetros es mayor que el error cuadrático de tres parámetros. Esto implica que la mejor aproximación se ha realizado con la función distribución de tres parámetros como se observa en la Figura 16.

3 PARÁMETROS		
F. Teórica	F. observada	Error Cuadrático
-3,189	-3,168	0,000
-1,960	-2,289	0,108
-1,827	-1,805	0,000
-1,772	-1,462	0,096
-1,219	-1,191	0,001
ERROR CUADRÁTICO MEDIO		0,041

Tabla 23. Calculo error cuadrático del segundo modo de fallo con tres parámetros

2 PARÁMETROS		
F. Teórica	F. observada	Error cuadrático
-3,110	-3,168	0,003
-2,021	-2,289	0,072
-1,883	-1,805	0,006
-1,826	-1,462	0,132
-1,206	-1,191	0,000
ERROR CUADRÁTICO MEDIO		0,043

Tabla 24. Calculo error cuadrático del segundo modo de fallo con dos parámetros

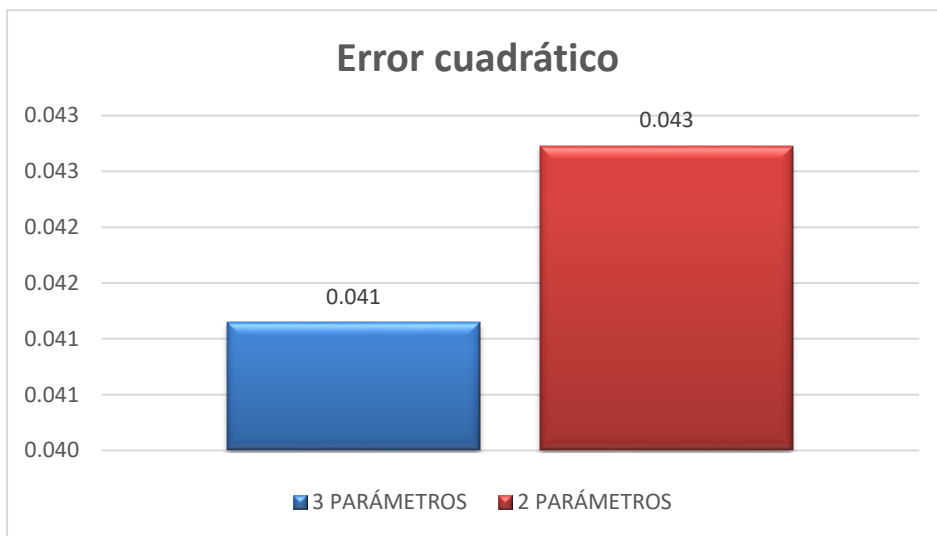


Figura 16. Comparación error cuadrático del segundo modo de fallo

Para el tercer modo de fallo, al igual que en segundo modo de fallo, el error cuadrático medio de la función distribución Weibull de dos parámetros es mayor que el error cuadrático de tres parámetros. Esto implica que la mejor aproximación se ha realizado con la función distribución de tres parámetros como se observa en la Figura 17.

3 PARÁMETROS		
F. Teórica	F. observada	Error cuadrático
-2,812	-3,046	0,055
-2,436	-2,180	0,066
-1,723	-1,697	0,001
-1,390	-1,352	0,001
-0,970	-1,078	0,012
ERROR CUADRÁTICO MEDIO		0,006

Tabla 25. Calculo error cuadrático del segundo modo de fallo con tres parámetros

2 PARÁMETROS		
F. Teórica	F. observada	Error cuadrático
-3,019	-3,046	0,001
-2,271	-2,180	0,008
-1,572	-1,697	0,016
-1,357	-1,352	0,000
-1,134	-1,078	0,003
ERROR CUADRÁTICO MEDIO		0,027

Tabla 26. Calculo error cuadrático del segundo modo de fallo con dos parámetros

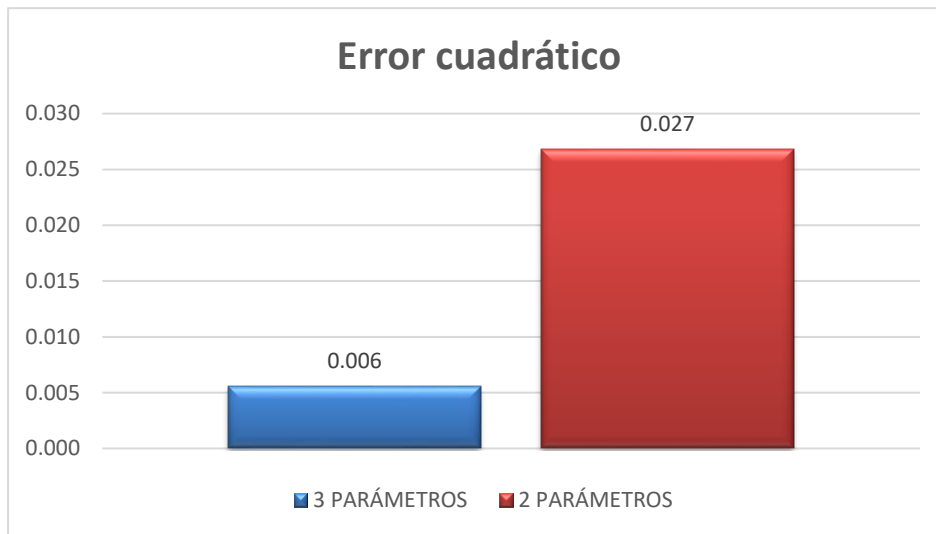


Figura 17. Comparación error cuadrático del tercer modo de fallo

Como se puede observar, en modo de fallo de la bomba salada (tercer modo de fallo) la diferencia apreciada entre los dos ajustes es importante, debido a cronología de aparición de los fallos vista anteriormente.

6.3 Otros métodos para obtener los parámetros de la distribución Weibull

En el apartado anterior, se han obtenido los parámetros de la distribución Weibull mediante el método de regresión del rango de medianas. Sin embargo, existen otros métodos para poder estimarlos. Los métodos más destacables para ello se exponen a continuación.

Estimación de máxima verosimilitud

El método de máxima verosimilitud MLE (conocido en inglés como “maximum likelihood estimation method”) permite estimar parámetros y la maximización de la probabilidad. Cuenta con cuatro algoritmos, los cuales son:

- 1) Algoritmo de Esperanza-Maximización (algoritmo EM)
- 2) Algoritmo de Esperanza-Maximización Estocástico
- 3) Algoritmo de Esperanza-Maximización Gradiente
- 4) Algoritmo de Newton-Raphson

De todos ellos, cabe destacar el primer algoritmo, el algoritmo de Esperanza-Maximización. Este algoritmo permite encontrar los indicadores de máxima verosimilitud de un problema con datos incompletos asociándolo a un problema con datos completos [20]. El método que se utiliza para llegar a ello es a través de dos pasos:

- Paso de esperanza (E-step)
- Paso de maximización (M-step)

Las iteraciones de este algoritmo se inician con unos valores iniciales en los parámetros. A partir de ahí, se iteran los pasos. El paso de esperanza determina la verosimilitud de los datos completos con el valor inicial de los parámetros y los datos incompletos que se disponen. En el segundo paso, el paso de maximización, se calcula nuevos valores de los parámetros para maximizar la verosimilitud del paso anterior. Una vez calculado, se vuelve a realizar el primer paso y así sucesivamente [20].

Método de los momentos

El método de los momentos es un método muy utilizado para determinar las variables de las poblaciones debido a la simplicidad de cálculo, permitiendo su cálculo a mano. Sin embargo, los estimadores que se obtienen son muy sesgados, es decir, con muy poca precisión por alta variabilidad [21].

Dividiendo el parámetro de localización y la desviación estándar de la distribución, se obtiene una expresión en función del parámetro de forma. Esta expresión, junto con la relación que ofrece los parámetros de forma y escala, quedan definidos ambos parámetros de la distribución Weibull [22].

Método del percentil

El método de los percentiles es un método que también destaca por su simplicidad de cálculos, siendo idóneo para utilizar en determinadas situaciones. Este método necesita tener ordenados todos los datos que se disponen. El orden tiene que ser ascendente [23]. Una vez ordenado, se utiliza el parámetro p cuyos valores están comprendidos entre 0 y 1. Con este parámetro, se pueden estimar qué tanto por ciento de los datos que se utilizan están por encima o por debajo de ese valor.

Método de Montecarlo basados en cadenas de Markov

El método de Montecarlo, basado en cadenas de Markov (conocido en inglés como Markov chain Montecarlo), ha permitido calcular grandes modelos basados principalmente en un gran número de integraciones [24]. Las cadenas, las cuales están formadas por variables que varían en función del tiempo, se van moviendo entre los datos, dependiendo únicamente el valor obtenido del valor interior [25]. Independientemente de los datos con los que se inicie la cadena, esta va a converger [24].

Cabe destacar que para que se realice correctamente, el número de iteraciones debe ser alto [24].

6.4 Mantenimiento preventivo óptimo

A través de un procedimiento semi-Markov, en este documento se pretende optimizar el tiempo de mantenimiento preventivo. Este procedimiento se utiliza en modelos con un número de intervalos de funcionamientos determinados. Por ello, se va a determinar cómo se aplica en los tres modos de fallo expuestos anteriormente.

Por tanto, inicialmente tenemos que definir los tres estados que un equipo se puede encontrar (ver [16]). Los estados pueden ser:

- E_1 : Estado operativo
- E_2 : Estado correctivo
- E_3 : Estado preventivo

Tal como se explica en [16] en el estado operativo, el equipo funciona correctamente y genera ingresos. En el estado correctivo, el equipo sufre un fallo lo que supone costes por mano de obra por reparación, repuestos e indisponibilidad. En el estado preventivo, la revisión del equipo supone unos costes de mano de obra preventiva, repuestos e inactividad.

Además, el equipo a lo largo de su vida va evolucionando de un estado a otro. Los costes asociados por permanecer o evolucionar de un estado a otro son:

R_1 = Coste por unidad de tiempo por permanecer el sistema en el estado 1

R_2 = Coste por unidad de tiempo por permanecer el sistema en el estado 2

R_3 = Coste por unidad de tiempo por permanecer el sistema en el estado 3

R_{12} = Coste por pasar del estado 1 al estado 2

R_{21} = Coste por pasar del estado 2 al estado 1

R_{13} = Coste por pasar del estado 1 al estado 3

R_{31} = Coste por pasar del estado 3 al estado 1

Todas estas relaciones entre estados y costes que puede experimentar un equipo se pueden observar en la Figura 18.

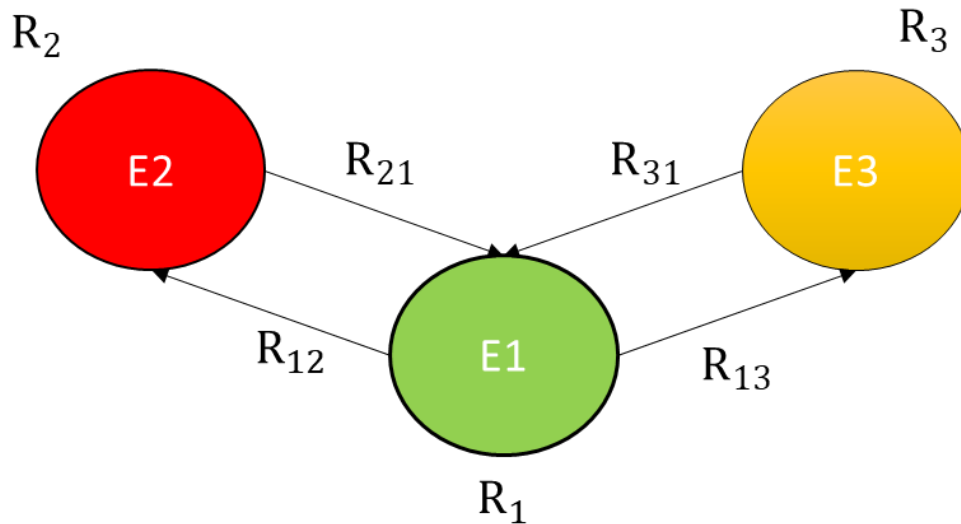


Figura 18. Relaciones y costes entre estados de un equipo

Para nuestro problema, en la Tabla 27 se recogen los ingresos por hora cuando el equipo se encuentra en estado operativo, los costes por hora cuando el equipo se encuentra en reparación o en correctivo y los costes que suponen que el equipo pase de un estado a otro. Como se puede observar, el coste de mano de obra por reparación y por correctivo se estima en 82€/h y 95€/h respectivamente. Se considera el coste de los repuestos para cada modo de fallo definidos en la Tabla 6 en la transición de los estados correctivo y preventivo al estado operativo (R_{21} y R_{31}).

COSTE	MODO DE FALLO 1 (TURBO)	MODO DE FALLO 2 (BOMBA REFRIGERANTE)	MODO DE FALLO 3 (BOMBA DE AGUA SALADA)
R_1	$5 \frac{\text{€}}{\text{h}}$	$5 \frac{\text{€}}{\text{h}}$	$5 \frac{\text{€}}{\text{h}}$
R_2	$-95 \frac{\text{€}}{\text{h}}$	$-95 \frac{\text{€}}{\text{h}}$	$-95 \frac{\text{€}}{\text{h}}$
R_3	$-82 \frac{\text{€}}{\text{h}}$	$-82 \frac{\text{€}}{\text{h}}$	$-82 \frac{\text{€}}{\text{h}}$
R_{12}	-4320€	-1310€	-2110€
R_{21}	-8222€	-1757€	-2672€
R_{13}	-1€	-1€	-1€
R_{31}	-763€	-835€	-813€

Tabla 27. Datos de costes para cada modo de fallo

Con todos los datos expuestos anteriormente, se utilizará la ecuación que calcula el tiempo de mantenimiento preventivo óptimo (teniendo en cuenta los 3 parámetros de la distribución Weibull de cada uno de los modos de fallo). La ecuación se define como:

$$(\tau - \gamma)^{\beta-1} = \frac{\eta^\beta}{\beta} \cdot \frac{-R_1}{R_{12} - R_{13} + \frac{2m-1 - (-1)^{m-1}}{2m+1+(-1)^{m-1}} (R_2B + R_{21} - R_3C - R_{31})} \quad (57)$$

donde:

m = es el número de pasos entre estados que experimenta el modo de fallo

B =Tiempo medio de permanencia en estado correctivo, definido como:

$$B = \int_0^{\infty} t_c g(t_c) dt_c \quad (58)$$

C = Tiempo medio de permanencia en estado preventivo, definido como:

$$C = \int_0^{\infty} t_p h(t_p) dt_p \quad (59)$$

Se estima que para los 3 modos de fallo, los tiempos medios son:

TIEMPO MEDIO	MODO DE FALLO 1 (TURBO)	MODO DE FALLO 2 (BOMBA REFRIGERANTE)	MODO DE FALLO 3 (BOMBA DE AGUA SALADA)
B	10h	8h	8h
C	7h	5h	6h

Tabla 28. Tiempos medios de los modos de fallo

Sustituyendo todos los datos en la ecuación anterior, para cada modo de fallo obtiene el tiempo preventivo óptimo acumulado en cada paso como se muestra en la Tabla 29, Tabla 30 y Tabla 31.

m	τ_0
1	6409,468
2	4911,936
3	5428,921
4	4911,936
5	5227,275
6	4911,936
7	5139,047
8	4911,936
9	5089,451
10	4911,936
11	5057,651
12	4911,936
13	5035,520
14	4911,936
15	5019,229
16	4911,936
17	5006,734
18	4911,936
19	4996,846
20	4911,936
21	4988,827
22	4911,936
23	4982,192
24	4911,936
25	4976,612
26	4911,936
27	4971,853
28	4911,936
29	4967,746
30	4911,936
31	4964,166
32	4911,936
33	4961,018
34	4911,936
35	4958,228
36	4911,936
37	4955,738
38	4911,936

Tabla 29. Valores óptimos de tiempo para cada paso (primer modo de fallo)

m	τ_0
1	13078,738
2	4787,921
3	6125,838
4	4787,921
5	5529,197
6	4787,921
7	5301,382
8	4787,921
9	5180,834
10	4787,921
11	5106,174
12	4787,921
13	5055,375
14	4787,921
15	5018,569
16	4787,921
17	4990,671
18	4787,921
19	4968,796
20	4787,921
21	4951,183

Tabla 30. Valores óptimos de tiempo para cada paso (segundo modo de fallo)

m	τ_0
1	3654,421
2	3654,421
3	3654,421
4	3654,421
5	3654,421
6	3654,421
7	3654,421
8	3654,421
9	3654,421
10	3654,421
11	3654,421
12	3654,421
13	3654,421
14	3654,421
15	3654,421
16	3654,421
17	3654,421
18	3654,421
19	3654,421
20	3654,421
21	3654,421

Tabla 31. Valores óptimos de tiempo para cada paso (tercer modo de fallo)

Analizando los datos de la Tabla 29, Tabla 30 y Tabla 31, se puede ver como cada dos pasos, para cada modo de fallo, el equipo vuelve a su estado operativo, determinando los siguientes tiempos óptimos:

- 4911,936h para el primer modo de fallo
- 4787,921h para el segundo modo de fallo
- 3654,421h para el tercer modo de fallo

A través de este método, se ha calculado los tiempos óptimos para diferentes modos de fallos con diferentes números de transiciones entre estados y distribuciones de fallos. Además, cabe destacar, cómo a medida que se va avanzando en el tiempo (valores crecientes de m , los valores de τ_0 se van aproximando al valor de la transición par. Sin embargo, en el caso del tercer modo de fallo, los valores de τ_0 son siempre los mismos. Esto es debido a que su parámetro de forma está próximo a 1, es decir, sus fallos son aleatorios. En esta situación, la realización de tareas de mantenimiento preventivo carece de sentido. Este es el motivo por lo que en la Tabla 29 todos los pasos calculan el valor óptimo a las 3654.421h. Gráficamente se representa en la Figura 19, Figura 20 y Figura 21.

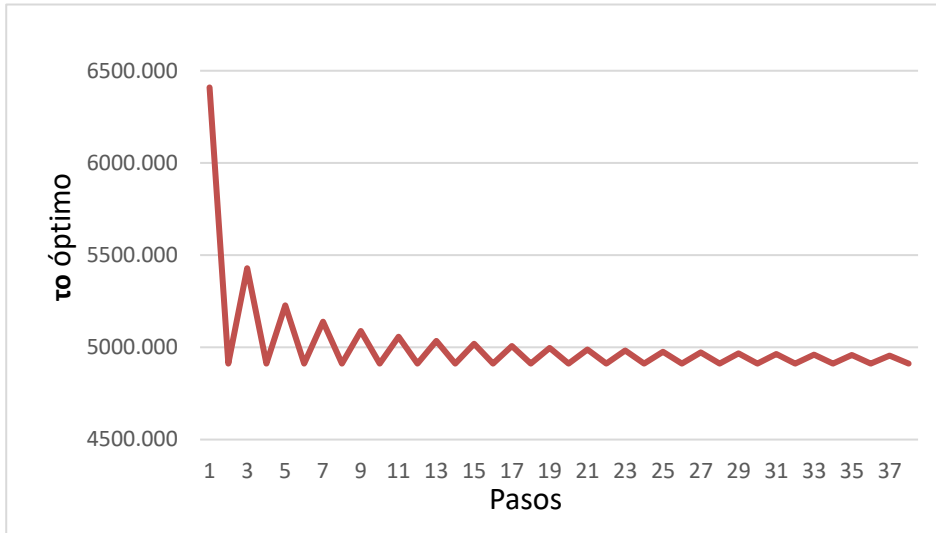


Figura 19. Valores óptimos τ_0 de cada paso para el primer modo de fallo

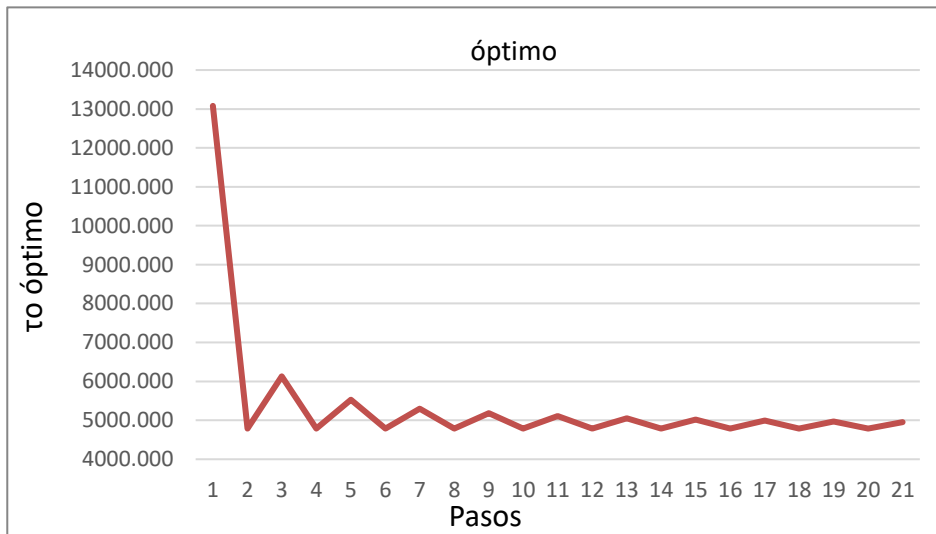


Figura 20. Valores óptimos τ_0 de cada paso para el segundo modo de fallo

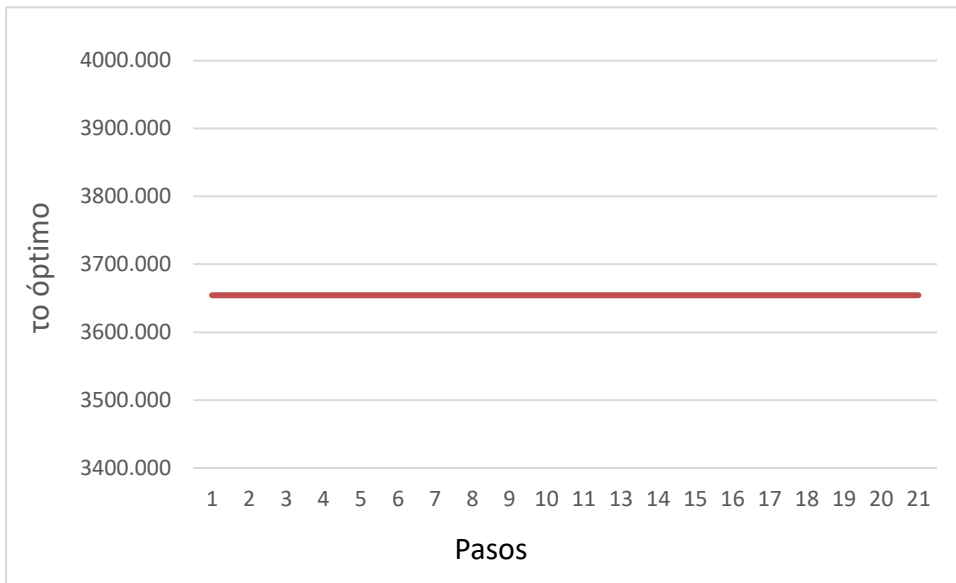


Figura 21. Valores óptimos τ_0 de cada paso para el tercer modo de fallo

Curva de envejecimiento

La curva de envejecimiento permite determinar el valor de la fiabilidad máxima que un equipo puede alcanzar en un momento determinado, si se dan las condiciones necesarias (realización de actividades de mantenimiento preventivo o correctivo). Esta curva muestra áreas donde la realización de tareas de mantenimiento apenas supone un incremento para la fiabilidad disminuyendo las opciones de beneficio por el funcionamiento del equipo. Por tanto, esta curva proporciona un indicador idóneo para determinar la ejecución de la reparación general (overhaul) del equipo.

Como se vio en el Capítulo 5, existen dos tipos de mantenimiento: perfecto e imperfecto. Se va a representar la curva de envejecimiento perfecto e imperfecto para los tres modos de fallo definidos con los tres parámetros y el mantenimiento preventivo óptimo calculado anteriormente.

Con mantenimiento perfecto

Teniendo en cuenta las fiabilidades de cada modo de fallo y la fiabilidad total, la curva de envejecimiento suponiendo que el mantenimiento preventivo es perfecto (es decir, cada modo de fallo recupera al 100% su fiabilidad al realizar el mantenimiento) es:

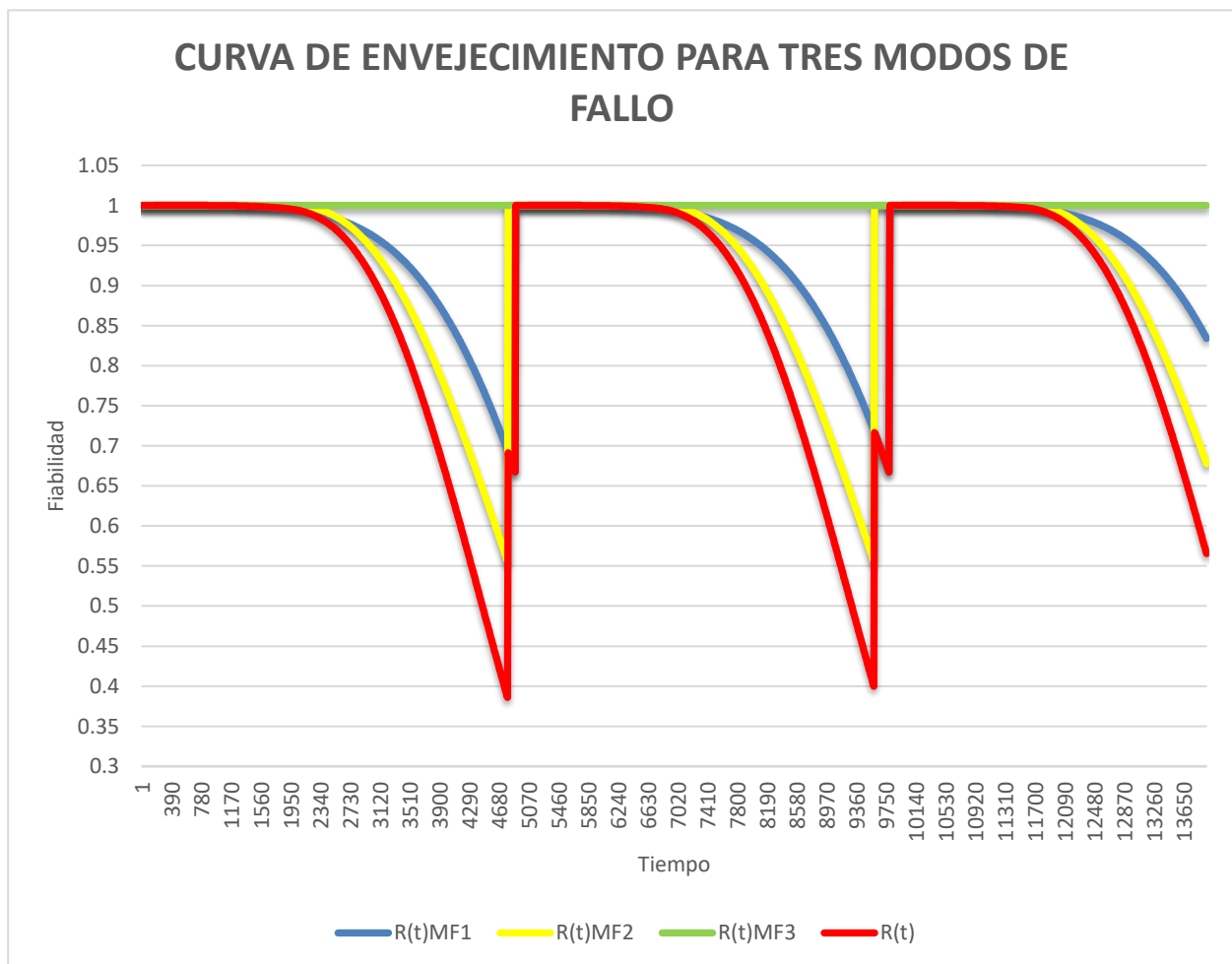


Figura 22. Representación curva de envejecimiento imperfecto

Como se puede observar, en el caso de la bomba de agua salada (tercer modo de fallo), al tratarse de fallos aleatorios, se obtuvo el óptimo justo antes de la aparición de estos fallos. Es de destacar que el valor del intervalo preventivo óptimo en este caso coincide con el parámetro de origen calculado para la Weibull. Es por ello por lo que se aplica un mantenimiento preventivo justo antes de la aparición de los fallos, haciendo que la fiabilidad sea siempre 1.

Con mantenimiento imperfecto

Teniendo en cuenta las fiabilidades de cada modo de fallo y la fiabilidad total, la curva de envejecimiento suponiendo que el mantenimiento preventivo es imperfecto (es decir, cada modo de fallo no recupera al 100% su fiabilidad al realizar el mantenimiento ya que existe un parámetro ϵ que simboliza el desgaste por el uso) es:

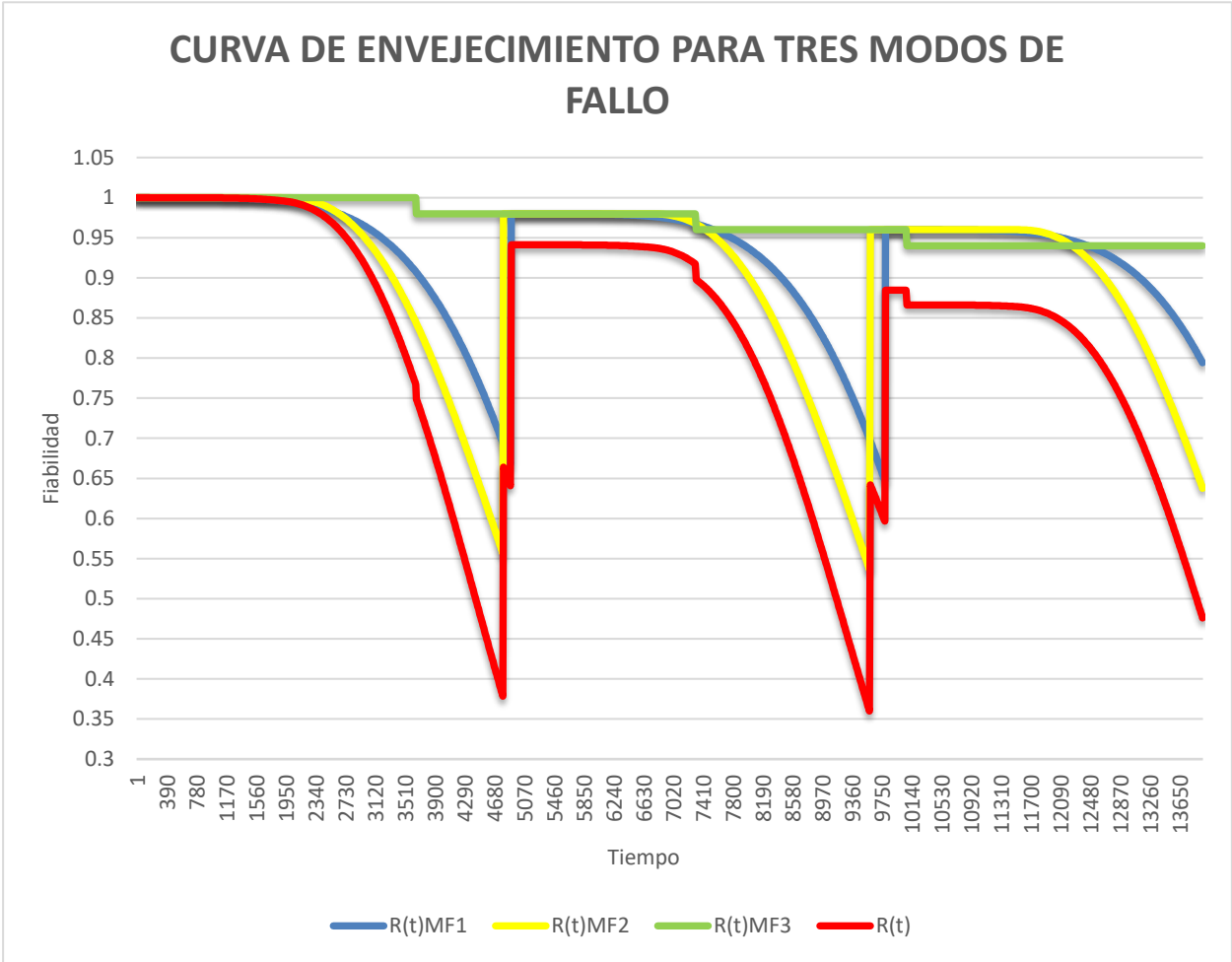


Figura 23. Representación curva de envejecimiento perfecto

Con ambas curvas de envejecimiento, se llega a la conclusión de que al incluir el parámetro de desgaste ϵ en la segunda curva de envejecimiento, la evolución de la fiabilidad total del equipo se reduce más rápidamente que en el primer caso. Esto produce que se asemeje poco a la realidad al no suponer un desgaste propio del equipo por el uso. Si no se tiene en cuenta, se considera al realizar el mantenimiento preventivo de cada modo de fallo se vuelve a un estado como si nuevo se tratase, con fiabilidad máxima, suposición que no es cierta. Es por ello, que con la expresión que se llegó en el Capítulo 5 para definir la curva de envejecimiento para mantenimiento imperfecto se acerca a la realidad de un equipo y nos permite obtener datos más fiables y exactos para determinar correctamente cuándo realizar un mantenimiento preventivo óptimo.

A continuación, con los parámetros obtenidos en el Capítulo 6, se va a representar la curva de envejecimiento perfecto en el caso de dos y de tres parámetros. El objetivo es calcular ambas fiabilidades totales y concluir qué curva es más favorable dependiendo del intervalo de tiempo que estemos, a través de la equidistancia entre sus puntos. En ambas curvas, el parámetro de envejecimiento será 0.02. Para el primer modo de fallo, se va a realizar un mantenimiento preventivo a las 5000h y para el segundo y tercer modo de fallo a las 4500h.

La curva de envejecimiento perfecto en el caso de dos parámetros queda representada en la Figura 24, cuyos datos se han calculado en la Tabla 32.

TIEMPO	R(t)MF1	R(t)MF2	R(t)MF3	RT(t)
500	1,000	1,000	1,000	1,000
1000	1,000	1,000	1,000	1,000
1500	0,999	0,999	1,000	0,998
2000	0,995	0,994	1,000	0,989
2500	0,985	0,980	1,000	0,965
3000	0,963	0,947	0,996	0,909
3500	0,924	0,881	0,975	0,794
4000	0,859	0,769	0,877	0,580
4500	0,763	0,980	0,980	0,733
5000	0,980	0,980	0,980	0,941
5500	0,980	0,980	0,980	0,941
6000	0,980	0,979	0,980	0,940
6500	0,979	0,974	0,980	0,934
7000	0,975	0,960	0,980	0,917
7500	0,965	0,927	0,976	0,873
8000	0,943	0,861	0,955	0,776
8500	0,904	0,749	0,857	0,580
9000	0,839	0,960	0,960	0,773
9500	0,743	0,960	0,960	0,685
10000	0,960	0,960	0,960	0,885
10500	0,960	0,959	0,960	0,884
11000	0,960	0,954	0,960	0,879
11500	0,959	0,940	0,960	0,865
12000	0,955	0,907	0,956	0,828
12500	0,945	0,841	0,935	0,743
13000	0,923	0,729	0,837	0,564
13500	0,884	0,940	0,940	0,781
14000	0,819	0,940	0,940	0,724
14500	0,723	0,940	0,940	0,639
15000	0,960	0,939	0,940	0,847
15500	0,960	0,934	0,940	0,843
16000	0,960	0,920	0,940	0,830
16500	0,959	0,887	0,936	0,796
17000	0,955	0,821	0,915	0,718
17500	0,945	0,709	0,817	0,548

Tabla 32. Datos obtenidos de la fiabilidad total en el caso de tres modos de fallos con dos parámetros

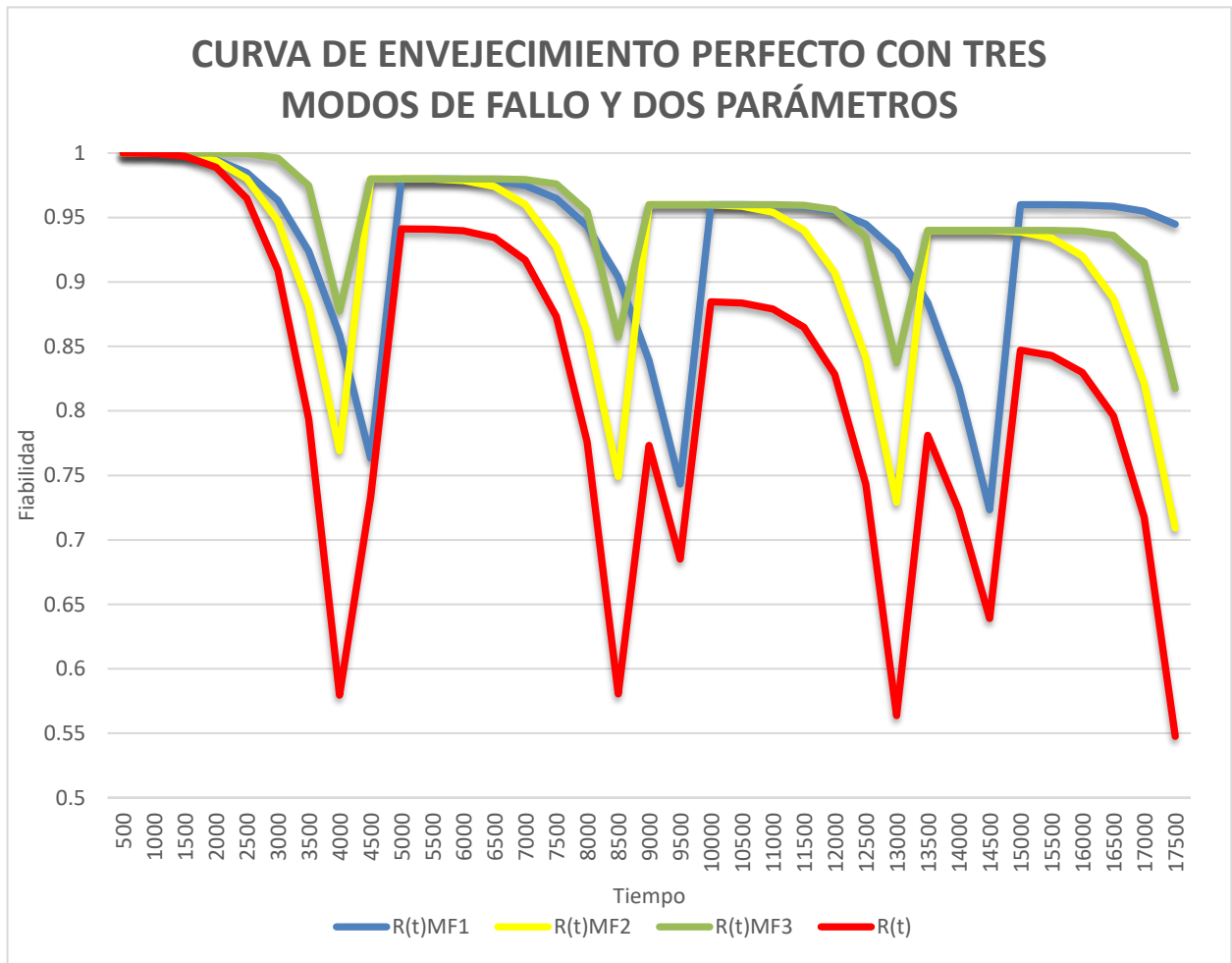


Figura 24. Curva de envejecimiento perfecto con tres modos de fallo con dos parámetros

La curva de envejecimiento perfecto en el caso de dos parámetros queda representada en la Figura 25, cuyos datos se han calculado en la Tabla 33.

TIEMPO	R(t)MF1	R(t)MF2	R(t)MF3	RT(t)
500	1,000	1,000	1,000	1,000
1000	1,000	1,000	1,000	1,000
1500	0,999	1,000	1,000	0,999
2000	0,995	1,000	1,000	0,995
2500	0,985	0,988	1,000	0,973
3000	0,963	0,948	1,000	0,913
3500	0,924	0,874	1,000	0,807
4000	0,859	0,767	0,850	0,560
4500	0,763	0,980	0,980	0,733
5000	0,980	0,980	0,980	0,941
5500	0,980	0,980	0,980	0,941
6000	0,980	0,980	0,980	0,941
6500	0,979	0,980	0,980	0,940
7000	0,975	0,968	0,980	0,925
7500	0,965	0,928	0,980	0,877
8000	0,943	0,854	0,980	0,789
8500	0,904	0,747	0,830	0,561
9000	0,839	0,960	0,960	0,773
9500	0,743	0,960	0,960	0,685
10000	0,960	0,960	0,960	0,885
10500	0,960	0,960	0,960	0,885
11000	0,960	0,960	0,960	0,884
11500	0,959	0,948	0,960	0,873
12000	0,955	0,908	0,960	0,832
12500	0,945	0,834	0,960	0,756
13000	0,923	0,727	0,810	0,544
13500	0,884	0,940	0,940	0,781
14000	0,819	0,940	0,940	0,724
14500	0,723	0,940	0,940	0,639
15000	0,940	0,940	0,940	0,831
15500	0,940	0,940	0,940	0,830
16000	0,940	0,928	0,940	0,820
16500	0,939	0,888	0,940	0,784
17000	0,935	0,814	0,940	0,715
17500	0,925	0,707	0,790	0,517

Tabla 33. Datos obtenidos de la fiabilidad total en el caso de tres modos de fallos con tres parámetros

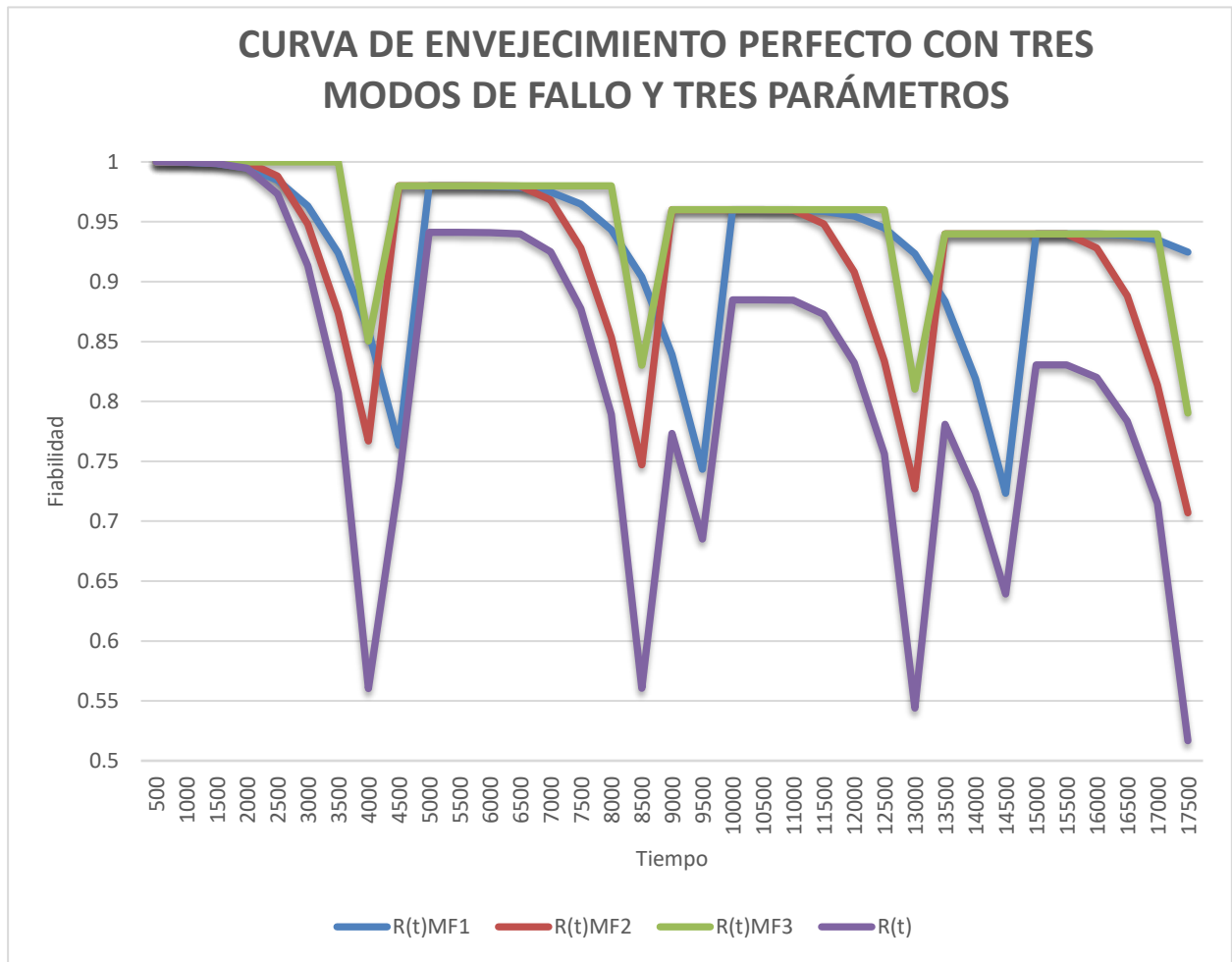


Figura 25. Curva de envejecimiento perfecto con tres modos de fallo con tres parámetros

En la Tabla 34 se puede observar como en los intervalos de 0h a 3500h, 6000h a 8000h y 10500h a 12500h, la curva de envejecimiento perfecto de tres parámetros tiene un comportamiento más favorable en términos de fiabilidad que la de dos parámetros. En punto más equidistante de ambas curvas se produce a las 17500h, con una diferencia de 0,03.

TIEMPO	RT 2 PARAM	RT 3 PARAM	DIFERENCIA
500	1,000	1,000	0,000
1000	1,000	1,000	0,000
1500	0,998	0,999	-0,001
2000	0,989	0,995	-0,006
2500	0,965	0,973	-0,008
3000	0,909	0,913	-0,004
3500	0,794	0,807	-0,013
4000	0,580	0,560	0,019
4500	0,733	0,733	0,000
5000	0,941	0,941	0,000
5500	0,941	0,941	0,000
6000	0,940	0,941	-0,001
6500	0,934	0,940	-0,005
7000	0,917	0,925	-0,008
7500	0,873	0,877	-0,004
8000	0,776	0,789	-0,013
8500	0,580	0,561	0,020
9000	0,773	0,773	0,000
9500	0,685	0,685	0,000
10000	0,885	0,885	0,000
10500	0,884	0,885	-0,001
11000	0,879	0,884	-0,005
11500	0,865	0,873	-0,008
12000	0,828	0,832	-0,004
12500	0,743	0,756	-0,013
13000	0,564	0,544	0,020
13500	0,781	0,781	0,000
14000	0,724	0,724	0,000
14500	0,639	0,639	0,000
15000	0,847	0,831	0,017
15500	0,843	0,830	0,013
16000	0,830	0,820	0,010
16500	0,796	0,784	0,013
17000	0,718	0,715	0,002
17500	0,548	0,517	0,031

Tabla 34. Comparación de las fiabilidad total de tres modos de fallo con dos y tres parámetros con el mismo mantenimiento preventivo

7 CONCLUSIÓN

En este trabajo, ha quedado reflejado la importancia de la fiabilidad, y en nuestro caso, en el mantenimiento. Con la aplicación de un caso real a través de la distribución Weibull, se ha podido aplicar, por primera vez, la definición de la curva de envejecimiento imperfecto.

En el Capítulo 4 se define matemáticamente las fórmulas que describen la fiabilidad de un sistema constituido por tres modos de fallos y por n-fallos teniendo en cuenta varios escenarios.

En el Capítulo 5 se expresa matemáticamente por primera vez la fórmula que describe la curva de envejecimiento imperfecto para dos modos de fallo, teniendo en cuenta el parámetro de desgaste ε .

Finalmente, en el Capítulo 6, se analiza un caso real de un motor 12V diésel, observándose los siguientes aspectos:

- Se calculan los parámetros de la distribución Weibull, definiendo para los casos de tres componentes del motor (turbo, bomba refrigerante y bamba de agua salada) las funciones de distribución de distribución Weibull teóricas mediante dos o tres parámetros. Una vez obtenidos los parámetros, usando la técnica de minimización del error cuadrático medio, se comparan las distribuciones teóricas y la observada, concluyendo que las distribuciones con tres parámetros se ajustan mejor a la función observada que las de dos parámetros.
- En especial en el caso del modo de fallo de la bomba salada la diferencia apreciada entre los dos ajustes es importante, debido a cronología de aparición de los fallos.
- Se han calculado los intervalos de mantenimiento preventivo para cada componente mediante el uso de un sistema de tres estados (operativo, correctivo y preventivo) que evoluciona según un proceso semimarkoviano acumulando costes o ingresos. Los valores alcanzados para el intervalo preventivo proporcionan el mayor beneficio para el gestor de mantenimiento. En el caso de la bomba de agua salada, al tratarse de fallos aleatorios, obtiene el óptimo justo antes de la aparición de estos fallos. Es de destacar que el valor del intervalo preventivo óptimo en este caso coincide con el parámetro de origen calculado para la Weibull.
- Se incluye el parámetro de desgaste en las fiabilidades de cada modo de fallo y se observa el comportamiento de la fiabilidad total del equipo y su adecuación a la curva de envejecimiento.
- Se representan las curvas de envejecimiento perfecto e imperfecto para el caso de tres modos de fallo. En ellas se aprecia la evolución de la fiabilidad máxima alcanzable en cada momento.
- La fiabilidad total del equipo cuando se incluye el parámetro de desgaste se reduce más rápidamente que cuando no se incluye. Incluir el parámetro de desgaste en el cálculo de la fiabilidad total del equipo permite realizar un estudio más verídico, pudiendo así calcular, por ejemplo, mantenimientos preventivos más adecuados en cada caso.

8 REFERENCIAS

- [1] “Fiabilidad.” <http://etimologias.dechile.net/?fiabilidad#:~:text=La%20palabra%20fiabilidad%20tiene%20el,o%20pr%20estar%20algo%20en%20confianza%22>.
- [2] “Introducción a la fiabilidad mantenibilidad contenido,” 2011. [Online]. Available: <https://sistemasmanufactura.files.wordpress.com/2011/05/sesion-22.pdf>
- [3] Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales España, “NTP 316: Fiabilidad de componentes: la distribución exponencial Conceptos básicos.”
- [4] R. Corporation, “Life Data Analysis Reference.” [Online]. Available: <http://www.ReliaSoft.comhttp://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode>.
- [5] P. D.T. O’Connor and A. Kleyner, “Practical Reliability Engineering,” 2012.
- [6] “Norma Española, UNE-EN 13306=2018 Terminología”.
- [7] C. Arróspide Marambio, “Glosario de términos en la Gestión de Mantenimiento,” Jul. 25, 2017. <https://www.gestiopolis.com/glosario-terminos-la-gestion-mantenimiento/>
- [8] J. W. Carrillo, “Fiabilidad: Bases prácticas y teóricas,” 1973. [Online]. Available: <https://books.google.es/books?id=HdhZAAAACAAJ>
- [9] Real Academia Española, “Definición Varianza,” 2022, [Online]. Available: <https://dle.rae.es/>
- [10] “Bañera Curva: qué es y cómo ajustar el mantenimiento,” 2022. <https://blog.infraspeak.com/bathtub-curve/>
- [11] Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales España, “NTP 418: Fiabilidad: la distribución lognormal,” 1997.
- [12] F. Castela, “Mantenimiento Industrial. Funciones de distribución y fiabilidad,” 2016. <https://mantenimientoindustrialweb.wordpress.com/2016/06/22/funciones-de-distribucion-y-fiabilidad/>
- [13] F. I. Arce Nuñez, “FACULTAD DE CIENCIAS TRABAJO FIN DE CARRERA: Distribución Weibull geométrica aplicada a datos de supervivencia de pacientes diagnosticados con cáncer colorrectal a través de modelos aditivos generalizados de localización, forma y escala,” Dec. 2018.
- [14] Minitab, “Distribución de Weibull,” 2022. <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/21/help-and-how-to/probability-distributions-random-data-and-resampling-analyses/supporting-topics/distributions/weibull-distribution/>
- [15] M. Hodkiewicz, T. Bikaun, and M. Stewart, “RelOps-Disciplined practice for reliability engineering analysis.”
- [16] A. Sánchez-Herguedas, A. Mena-Nieto, and F. Rodrigo-Muñoz, “A new analytical method to optimise the preventive maintenance interval by using a semi-Markov process and z-transform with an application to marine diesel engines,” *Reliab Eng Syst Saf*, vol. 207, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.ress.2020.107394.
- [17] A. Sánchez-Herguedas, A. Mena-Nieto, F. Rodrigo-Muñoz, J. Villalba-Diez, and J. Ordieres-Meré, “Aplicación de enfoques semimarkovianos a la mejora de políticas de mantenimiento predeterminado en activos industriales.”
- [18] D. Plaza, “El motor diésel: funcionamiento y aplicaciones,” 2022. <https://www.motor.es/que-es/motor-diesel>
- [19] A. Sánchez Herguedas, A. Crespo Márquez, and F. Rodrigo Muñoz, “Optimizing preventive

- maintenance over a finite planning horizon in a semi-Markov framework,” *IMA Journal of Management Mathematics*, vol. 33, no. 1, pp. 75–99, Jan. 2022, doi: 10.1093/imaman/dpaa026.
- [20] J. José, A. Jiménez, P. José, and G. Laencina, “ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA PROYECTO FIN DE CARRERA: Combinación del aprendizaje multitarea y del algoritmo EM en problemas de clasificación con datos incompletos,” 2006.
- [21] K. O. Bowman and L. R. Shenton, “Estimator: Method of Moments,” *Encyclopedia of Statistical Sciences*, 1998.
- [22] J. M. Torres-Rojo, “Métodos para estimar los parámetros de la función Weibull y su potencial para ser predichos a través de atributos de rodal Community forest dvelopment View project Natural Resources Management and Forest Management Valuation View project,” *Agrociencia* 2(2):57-66, Jan. 1992. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/308141851>
- [23] E. Rus Arias, “Percentil,” *Economipedia.com*, Mar. 08, 2021.
- [24] C. Ausín, “Tema 8: Métodos de cadenas de Markov Monte Carlo,” CESGA, Nov. 2012.
- [25] A. Gelman and D. B. Rubin, “Inference from Iterative Simulation Using Multiple Sequences,” 1992. [Online]. Available: <http://www.jstor.org/about/terms.html>.