



GUÍA DE LA IALA

1035

DISPONIBILIDAD Y FIABILIDAD DE LAS AYUDAS A LA NAVEGACIÓN - TEORÍA Y EJEMPLOS

Edición 2.0

Diciembre de 2004



Puertos del Estado




REVISIÓN DEL DOCUMENTO

Las revisiones realizadas a este documento de la IALA se anotarán en el siguiente cuadro antes de la puesta en circulación de un documento revisado.

Fecha	Página / Apartado revisado	Motivo de revisión
Diciembre de 2004	Revisión completa y actualización	Mantenimiento del documento

La revisión de la traducción de este documento ha sido realizada por el grupo de trabajo de Puertos del Estado en el que han participado:

*Luis Martínez (Autoridad Portuaria de Vigo);
Enrique Abati (Autoridad Portuaria de Marín);
Juan Manuel Vidal (Autoridad Portuaria de Gijón);
Carlos Calvo (Autoridad Portuaria de Santander);
Cristina García-Capelo (Autoridad Portuaria de Bilbao);
José Luis Núñez (Autoridad Portuaria de Pasajes);
Juan Antonio Torres (Autoridad Portuaria de Huelva);*

*Septimio Andrés (Autoridad Portuaria de Sevilla);
Germán Gamarro (Autoridad Portuaria de Algeciras);
Santiago Tortosa (Autoridad Portuaria de Ceuta);
Jaime Arenas (Autoridad Portuaria de Baleares);
Antonio Cebrián y Guillermo Segador (Autoridad Portuaria de Barcelona);
José Carlos Díez (Puertos del Estado).*

Coordinación de la edición en español y edición final:

José Carlos Díez (Puertos del Estado)

NOTA: Puertos del Estado no se responsabiliza de los errores de interpretación que puedan producirse por terceros en el uso del contenido de este documento, que corresponde a una traducción del documento original de la Asociación Internacional de Ayudas a la Navegación Marítima y Autoridades de Faros (IALA) denominado según aparece en la carátula.



ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	6
1.1	Objeto y ámbito de aplicación	6
1.2	Aspectos económicos de la fiabilidad y la disponibilidad	6
1.3	Indicadores de funcionamiento	8
2	DISPONIBILIDAD	8
2.1	Introducción	8
2.2	Objetivos de disponibilidad	8
2.3	Cálculo de disponibilidad	9
3	FIABILIDAD DE SISTEMAS	10
3.1	Introducción	10
3.2	Tiempo medio entre fallos	11
3.3	Tratamiento de fallos prematuros (mejoras de diseño)	11
3.4	Tratamiento de fallos de desgaste (mantenimiento preventivo)	12
3.5	Tratamiento de fallos de vida normal (equipo de reparación)	12
3.6	Cálculo de la fiabilidad de los sistemas	12
3.7	Tiempo medio de reparación (MTTR)	13
3.8	Mejora de la fiabilidad	13
3.9	Evaluación de riesgos	14
4	MODELOS DE LA FIABILIDAD DE SISTEMAS	15
4.1	Modelización de la fiabilidad de los sistemas	15
4.2	Bloques en serie	16
4.3	Bloques en paralelo, redundancia pasiva	17
4.3.1	Redundancia pasiva. Sin reparación	17
4.3.2	Redundancia pasiva. Con reparación	17
4.4	Bloques en paralelo, redundancia activa	18
4.4.1	Redundancia activa sin reparación cuando sólo ha fallado un bloque	18
4.4.2	Redundancia activa con reparación de un elemento que ha fallado	18
5	EJEMPLOS	19
5.1	Metodología para evaluar el impacto del tiempo de respuesta ante fallos (FRT) en la disponibilidad de servicios	19
5.1.1	Cómputo del tiempo de respuesta a los fallos	19
5.1.2	Conclusión	20
5.2	Ejemplos que ilustran procedimientos de reparación selectiva	20
5.2.1	Bloques en serie	20
5.2.2	Redundancia pasiva - sin reparación	20
5.2.3	Redundancia pasiva, con reparación	21



ÍNDICE DE CONTENIDOS

5.2.4	Redundancia activa sin reparación	21
6	PROGRAMAS INFORMÁTICOS.....	21
7	Sistemas de gestión de calidad y la fiabilidad.....	22
7.1	Especificaciones	23
7.2	Datos de las especificaciones	23
7.3	Mantenimiento.....	23
7.3.1	Mantenimiento correctivo.....	23
7.3.2	Mantenimiento preventivo	23
7.3.3	Inspecciones	24
7.4	Selección de proveedor	24
7.5	Autoridades de señalización y balizamiento como suministradores	24
8	DEFINICIONES.....	25
9	ACRÓNIMOS.....	25
10	REFERENCIAS.....	25
ANEXO A	PRUEBAS DE LAS FÓRMULAS	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO B	INFORME GRÁFICO TÍPICO DE UN PROGRAMA INFORMÁTICO DE FIABILIDAD¡Error! Marcador no definido.	

Índice de Figuras

<i>Figura 1</i>	<i>Costes de adquisición y mantenimiento vs. mejora de la fiabilidad.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2</i>	<i>Cambios de la tasa de fallos durante la vida útil de una serie de elementos.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 3</i>	<i>El tiempo medio entre fallos (MTBF) sólo es constante durante la llamada parte normal del ciclo de vida</i>	<i>11</i>
<i>Figura 4</i>	<i>“Bloques” individuales funcionalmente interconectados.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 5</i>	<i>Bloques en serie.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 6</i>	<i>Presentación del tiempo de funcionamiento.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 7</i>	<i>Redundancia pasiva - sin reparación.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 8</i>	<i>Presentación de redundancia pasiva - sin reparación</i>	<i>17</i>
<i>Figura 9</i>	<i>Redundancia pasiva - con reparación.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 10</i>	<i>Redundancia activa - sin reparación cuando sólo ha fallado un bloque</i>	<i>18</i>
<i>Figura 11</i>	<i>Redundancia activa - con reparación cuando sólo ha fallado un bloque</i>	<i>18</i>
<i>Figura 12</i>	<i>Presentación de redundancia activa - con reparación</i>	<i>19</i>
<i>Figura 13</i>	<i>Diagrama de bloques de la fiabilidad de una ayuda a la navegación típica.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 14</i>	<i>Informe de fiabilidad tras una simulación.....</i>	<i>31</i>



ÍNDICE DE CONTENIDOS

Lista de ecuaciones

<i>Ecuación 1</i>	<i>Disponibilidad (1)</i>	<i>9</i>
<i>Ecuación 2</i>	<i>Disponibilidad (2)</i>	<i>9</i>
<i>Ecuación 3</i>	<i>Disponibilidad (3)</i>	<i>9</i>
<i>Ecuación 4</i>	<i>Disponibilidad (internacional)</i>	<i>9</i>
<i>Ecuación 5</i>	<i>Tiempo total</i>	<i>9</i>
<i>Ecuación 6</i>	<i>Porcentaje de disponibilidad</i>	<i>9</i>
<i>Ecuación 7</i>	<i>Tiempo medio entre fallos (1)</i>	<i>11</i>
<i>Ecuación 8</i>	<i>Tiempo medio entre fallos (2)</i>	<i>13</i>
<i>Ecuación 9</i>	<i>Tiempo medio de reparación (1)</i>	<i>13</i>
<i>Ecuación 10</i>	<i>La función de distribución exponencial</i>	<i>15</i>
<i>Ecuación 11</i>	<i>La función de fiabilidad</i>	<i>15</i>
<i>Ecuación 12</i>	<i>MTBF del sistema</i>	<i>16</i>
<i>Ecuación 13</i>	<i>MTTR del sistema</i>	<i>16</i>
<i>Ecuación 14</i>	<i>Tiempo medio entre fallos (MTBF) de un sistema pasivo sin reparación</i>	<i>17</i>
<i>Ecuación 15</i>	<i>MTBF de un sistema pasivo - con reparación</i>	<i>17</i>
<i>Ecuación 16</i>	<i>El tiempo medio entre fallos (MTBF) de un sistema donde los bloques X e Y son idénticos y con un índice constante de fallos</i>	<i>18</i>
<i>Ecuación 17</i>	<i>Redundancia activa con reparación cuando sólo ha fallado un bloque</i>	<i>19</i>
<i>Ecuación 18</i>	<i>Tiempo medio de reparación (2)</i>	<i>19</i>
<i>Ecuación 19</i>	<i>Composición del tiempo medio de reparación (MTTR)</i>	<i>20</i>



1 INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETO Y ÁMBITO DE APLICACIÓN

La disponibilidad es un indicador clave del funcionamiento, que puede utilizarse junto con otros como una herramienta de gestión para medir, analizar y supervisar el funcionamiento de ayudas a la navegación y/o sistemas y equipos concretos. La información que se obtiene puede emplearse para:

- La rendición de cuentas ante el gobierno y los grupos de interés;
- Demostrar la eficiencia y eficacia del servicio prestado;
- Comparar el funcionamiento de:
 - Sistemas o equipos similares en diferentes ubicaciones;
 - Contratar servicios y prestarlos internamente (cuando ambos se desarrollan en trabajos sustancialmente similares).
- Modificar:
 - Diseños de sistema;
 - Decisiones de compras;
 - Elecciones de equipos;
 - Procedimientos y prácticas de mantenimiento.
- Aumento o reducción del esfuerzo de mantenimiento;
- Ampliación de los intervalos de mantenimiento.

Con vistas a permitir a los miembros de la IALA que presten un servicio de ayudas a la navegación eficaz en cuanto a costes, esta Guía presenta un método para calcular dichos indicadores de funcionamiento. La podrán utilizar:

- Prestadores de servicios, para que calculen la disponibilidad y fiabilidad reales de las ayudas a la navegación;
- Diseñadores de sistema, para que definan la fiabilidad y disponibilidad esperadas del sistema y cualquier necesidad de redundancia, a fin de garantizar que los objetivos de disponibilidad fijados por la dirección se puedan cumplir;
- Gestores de mantenimiento, para que definan objetivos de funcionamiento de sistemas y subsistemas mensurables para garantizar que se cumplan los objetivos fijados por la dirección.

Podrá utilizarse la metodología que se expone para calcular la fiabilidad prevista de una única ayuda a la navegación consistente en varios subsistemas independientes en términos estadísticos, cada uno con su propio nivel de fiabilidad, expresado en el tiempo medio entre fallos (MTBF, del inglés, *Mean Time Between Failures*).

También se podrá emplear para calcular la fiabilidad prevista de un sistema de ayudas, que consiste en cierto número de ayudas individuales.

1.2 ASPECTOS ECONÓMICOS DE LA FIABILIDAD Y LA DISPONIBILIDAD

Mediante una combinación adecuada del mantenimiento, la logística y la fiabilidad, se puede alcanzar un objetivo de disponibilidad de una ayuda a la navegación, determinado en función de su papel operativo.

El hecho de que la fiabilidad y los faros se hayan convertido en sinónimos puede atribuirse, en gran medida, a la relativa simplicidad de las ayudas y a la disponibilidad de mano de obra a un precio razonable para explotarlas y mantenerlas. A medida que avanza la tecnología, se dispone de mejores ayudas y servicios, que suelen ser más complejos desde el punto de vista de la ingeniería, dando como resultado una mayor dependencia de la fiabilidad

de los equipos en lugar de la humana. En los últimos años, la rápida subida de los costes de mano de obra asociados a la explotación de los faros y los buques faro ha dado lugar a la automatización de muchas de estas ayudas, haciéndolas más dependientes de la fiabilidad de los equipos.

En general, la fiabilidad cuesta dinero y el coste de adquisición de los equipos, incluidos los de diseño y fabricación, sube a medida que aumenta la fiabilidad. La fiabilidad se puede lograr aumentando la calidad de todo el proceso de diseño y fabricación, así como del mantenimiento preventivo, que es una práctica común entre las autoridades de señalización y balizamiento, y, además, dotando al sistema con redundancia en forma de uno o más equipos de respaldo, que puedan entrar en servicio en el caso de que falle el que esté en funcionamiento, o bien mediante la redundancia activa, en donde todos los medios para realizar una función concreta estén funcionando simultáneamente. Todo esto también aumentará los costes iniciales de capital.

No obstante, la falta de fiabilidad también conlleva una penalización de costes en términos de aumento de los costes de mantenimiento, de almacenamiento de repuestos y, cuando proceda, de la pérdida de ingresos y de otros costes derivados de un fallo. Esta relación es compleja, pero existe, por lo general, una situación de compromiso en la que se minimizan tanto el coste de la fiabilidad como el de los fallos.

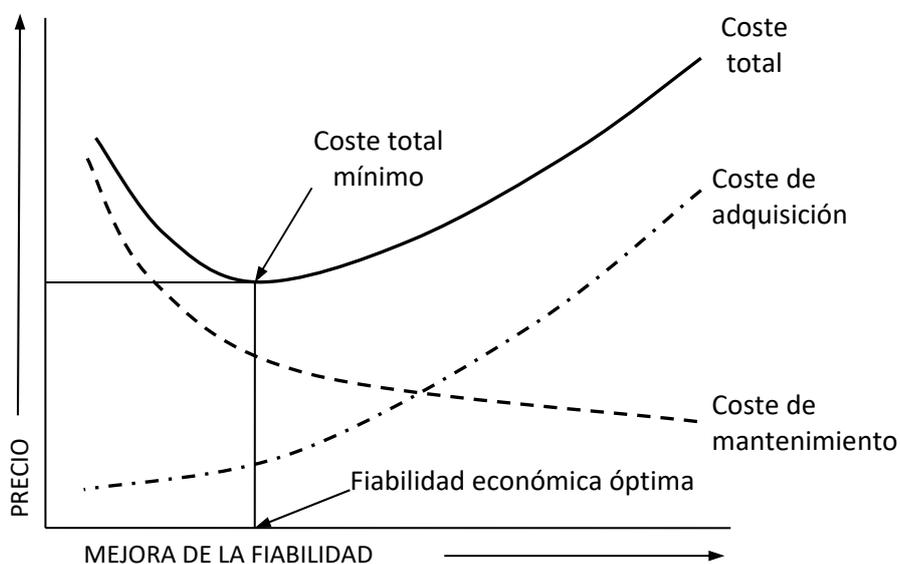


Figura 1 *Costes de adquisición y mantenimiento vs. mejora de la fiabilidad*

Esta situación se refleja en las curvas de la Figura 1, que muestra el aumento de los costes de adquisición a medida que se incrementa la fiabilidad y la caída correspondiente de los costes relacionados con el mantenimiento. Éstas se combinan para dar como resultado una curva de los costes total, o de la vida útil entera — que a veces se denomina el “coste de propietario” —, que tiene un óptimo valor mínimo a un cierto nivel de fiabilidad. Dicho coste mínimo no es necesariamente el factor esencial para determinar el grado de fiabilidad requerida, ya que existen otros factores, como la seguridad, que podría exigir, independientemente del aumento de costes, un nivel mayor de fiabilidad.

Inicialmente, unos altos niveles de fiabilidad/disponibilidad de las ayudas pueden ser caros, pero podrían resultar más económicos cuando se consideran los costes de vida útil. Por lo tanto, las autoridades de señalización y balizamiento deben considerar todos los factores relacionados con la cuestión. En algunas ocasiones, es posible que sea necesario retirar algunas ayudas a la navegación para concentrar los recursos disponibles en un número reducido de ayudas para que presten un nivel aceptable de servicio.



1.3 INDICADORES DE FUNCIONAMIENTO

Se consideran aplicables a los sistemas de ayudas a la navegación los siguientes indicadores de funcionamiento:

1 Disponibilidad

Se trata de la probabilidad de que una ayuda a la navegación, o un sistema de ellas, tal y como las defina la autoridad competente, esté realizando su función específica en cualquier tiempo elegido al azar. Se expresa como un porcentaje del tiempo total en que una ayuda a la navegación, o un sistema de ellas, debe realizar su función específica. Se trata de una medición del servicio prestado al navegante.

2 Fiabilidad

Se trata de la probabilidad de que una ayuda a la navegación, cuando esté disponible, realice una función específica sin fallos bajo unas condiciones concretas durante un tiempo concreto. Es una medición del funcionamiento de los equipos de ayudas a la navegación.

3 Tiempo medio entre fallos (MTBF, del inglés, *Mean Time Between Failures*)

Se trata del promedio del tiempo entre los fallos sucesivos de una ayuda a la navegación, sistema o parte de un sistema reparable. Es una medición de la fiabilidad.

4 Tiempo medio de reparación (MTTR, del inglés, *Mean Time to Repair*)

Se trata del tiempo que se tarda en restablecer una ayuda a su funcionamiento normal después de que falle. Es una medición de las disposiciones administrativas, recursos y capacidad técnica para reparar una avería. De hecho, es una medición del funcionamiento del equipo de reparación.

5 Continuidad

Se trata de la probabilidad de que una ayuda a la navegación o sistema realice su función específica sin interrupción durante un tiempo concreto y se emplea principalmente para sistemas de radionavegación.

2 DISPONIBILIDAD

2.1 INTRODUCCIÓN

La utilización del parámetro de “DISPONIBILIDAD” (A) es un buen método para definir el nivel de servicio que puede esperar un navegante, de una ayuda a la navegación. Además, el valor numérico de la disponibilidad puede utilizarse para definir, en términos cuantificables y precisos, la suma total de todas las características relevantes del diseño, la ingeniería, la adquisición y los procedimientos de certificación de calidad implicados en la prestación de ayudas a la navegación, además de la logística y los materiales necesarios.

En el marco de lo que se describe a continuación, cabe resaltar que la disponibilidad sólo se refiere a la capacidad de una ayuda para funcionar tal y como se indica en los documentos náuticos y no tiene en cuenta factores externos, tales como la reducción de la visibilidad meteorológica. Sin embargo, es cierto que, en la fase de diseño, la intensidad de una luz se elegirá en función de las condiciones predominantes de visibilidad en la zona.

También es cierto que una luz, digamos de 1.000 candelas (cd), que funciona tal y como se indica, tendrá la misma salida luminosa independientemente de la visibilidad, y que es responsabilidad del navegante ajustar sus expectativas y comportamiento en función de las condiciones meteorológicas.

Deben categorizarse las luces de navegación conforme a la Recomendación O-130 de la IALA sobre la Categorización y los objetivos de disponibilidad de las ayudas a la navegación de corto alcance.

2.2 OBJETIVOS DE DISPONIBILIDAD

La Recomendación O-130 de la IALA sobre la Categorización y los objetivos de disponibilidad de las ayudas a la navegación de corto alcance proporciona los objetivos recomendados para los objetivos de disponibilidad de las ayudas a la navegación.



Cabe señalar que estos objetivos de disponibilidad a largo plazo no son los adecuados para su presentación en publicaciones náuticas, ya que no pueden representar un compromiso por parte de las autoridades de señalización y balizamiento ante los navegantes en un corto periodo de tiempo concreto.

2.3 CÁLCULO DE DISPONIBILIDAD

El parámetro A puede calcularse dividiendo el tiempo total en que la ayuda ha estado funcionando correctamente (p.ej. Tiempo total – Tiempo de inactividad) partido por el tiempo total en que la ayuda debería haber funcionado correctamente. Se expresan todos los tiempos en horas y se miden a lo largo del mismo periodo de tiempo.

Puede calcularse la disponibilidad A, dividiendo el tiempo total en que la ayuda ha estado funcionando correctamente (p.ej. Tiempo total – Tiempo de inactividad) partido por el tiempo total en que la ayuda debería haber funcionado correctamente. Se expresan todos los tiempos en horas y se miden a lo largo del mismo periodo de tiempo.

$$A = \frac{\text{Tiempo total} - \text{Tiempo de interrupción}}{\text{Tiempo total}} (\text{horas})$$

Ecuación 1 Disponibilidad (1)

Puede expresarse de varias maneras, según las siguientes ecuaciones:

$$A = \frac{\text{Tiempo de funcionamiento}}{\text{Tiempo total}}$$

Ecuación 2 Disponibilidad (2)

$$A = \frac{\text{Tiempo de servicio} - \text{Tiempo fuera de servicio}}{\text{Tiempo de servicio}}$$

Ecuación 3 Disponibilidad (3)

La fórmula reconocida internacionalmente para el cálculo de la disponibilidad es la siguiente:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Ecuación 4 Disponibilidad (internacional)

El tiempo total para una ayuda a la navegación durante x años se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Tiempo total} = (365 \times 24 \times x) \text{ horas}$$

Ecuación 5 Tiempo total

Debe registrarse el tiempo de inactividad conforme a la Recomendación O-130 de la IALA sobre la Categorización y los objetivos de disponibilidad de las ayudas a la navegación de corto alcance.

Por ejemplo: Se tendrá en cuenta que, en cuanto a las luces, el tiempo de inactividad según el tiempo total de la fórmula no distingue entre los periodos de luz diurna y de oscuridad.

También se utiliza el porcentaje de disponibilidad, que se define como 100 veces la disponibilidad:

$$A_{\%} = 100A$$

Ecuación 6 Porcentaje de disponibilidad

De acuerdo con la Recomendación O-130 de la IALA sobre la Categorización y los objetivos de disponibilidad de las ayudas a la navegación de corto alcance, los objetivos de disponibilidad se calculan a lo largo de un periodo continuo de tres años, salvo que se especifique lo contrario.

3 FIABILIDAD DE LOS SISTEMAS

3.1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas se componen de subsistemas y los subsistemas, a su vez, de componentes, y todos tienen su propia fiabilidad individual. Por lo tanto, la fiabilidad total del sistema depende directamente de la de cada componente dentro del sistema, así como de la manera en que se ensamblan para formar los subsistemas.

El término “fiabilidad” significa la probabilidad de que un sistema, subsistema o componente realizará la función o funciones deseadas a lo largo de un periodo de tiempo concreto.

La tasa de fallo, también conocida como la tasa de peligro, que es el número de fallos de un elemento por unidad de tiempo en que ha estado realizando la función (o funciones) que se espera de él, es un indicador útil de la fiabilidad.

En la vida real, la tasa de fallo no es constante a lo largo de toda la vida útil de un sistema, tal y como se muestra en la Figura 2.

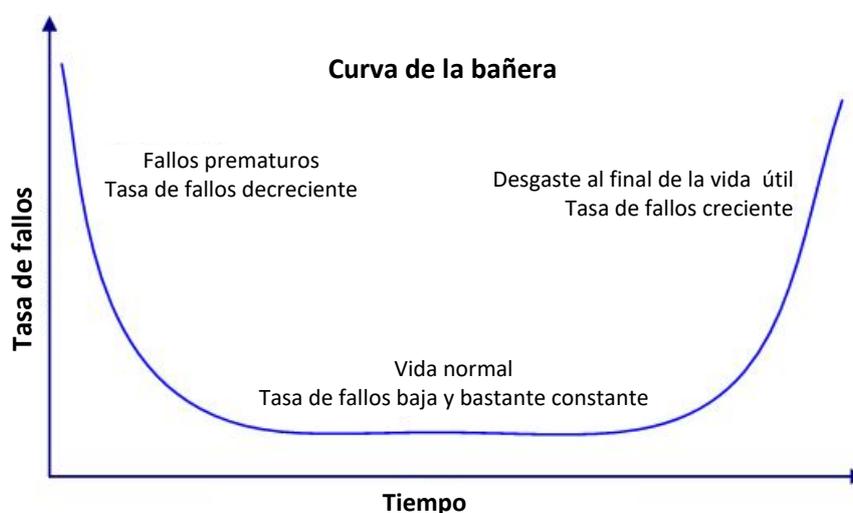


Figura 2 Cambios de la tasa de fallo durante la vida útil de una población de elementos

Esta curva se conoce como la curva de la bañera. No representa el índice de fallo de un único elemento o sistema, sino la tasa de fallo relativa de todo un conjunto de elementos o sistemas a lo largo del tiempo.

Algunos elementos individuales fallarán relativamente pronto (fallos prematuros), otros durarán hasta que se desgasten y algunos otros más fallarán durante un periodo relativamente prolongado, al que se refiere como la vida útil normal.

Por lo general, los fallos que se producen prematuramente son causados por defectos materiales, errores de ensamblaje, errores de diseño, componentes defectuosos, etc.

Se consideran los fallos de vida útil normal como casos aleatorios del “estrés superando la resistencia”. En algunos casos, un cierto número de fallos considerados como fallos de vida útil normal en las primeras etapas de la vida útil normal son, en realidad, fallos prematuros.

El desgaste es una realidad inevitable y se debe a la fatiga de los materiales, así como a la falta de engrase en los rodamientos, lámparas de filamento que alcanzan el final de su vida útil, etc.

Por lo tanto, la curva de la bañera muestra tres períodos clave, o modos de fallo, en la vida de un conjunto de elementos.

Es de vital importancia que los gestores comprendan cómo cambian el tipo de fallo y la tasa de fallo de un conjunto de elementos a lo largo del tiempo y de cómo deben interpretarse los datos recogidos sobre fallos de los equipos para llegar a un mejor conocimiento del comportamiento de dichos elementos.

3.2 TIEMPO MEDIO ENTRE FALLOS

El término tiempo medio entre fallos (MTBF, del inglés, *Mean Time Between Failures*) se suele utilizar (y utilizar mal) para dar una descripción de la fiabilidad de los productos y sistemas. Puede calcularse a partir de los datos de los fallos observados y se define básicamente como:

$$MTBF = \frac{1}{Tasa\ de\ fallos}$$

Ecuación 7 Tiempo medio entre fallos (1)

Entonces, si tenemos un conjunto de 100 elementos y se experimentan 50 fallos en un año, el tiempo medio entre fallos en esa serie de elementos sería 2 años. Durante la fase de diseño, se puede pronosticar el tiempo medio entre fallos de un sistema o producto mayor, basándose en el tiempo medio entre fallos de cada uno de sus subsistemas y/o componentes.

No obstante, el tiempo medio entre fallos y su definición, que figura en la Ecuación 7, sólo puede aplicarse cuando la función de distribución de fallos subyacente tenga una tasa de fallo constante (p. ej. distribución exponencial de fallos), lo que no es el caso durante las etapas tempranas y de desgaste del ciclo de vida. Este hecho puede mostrarse representando el tiempo medio entre fallos junto con la curva de la bañera:

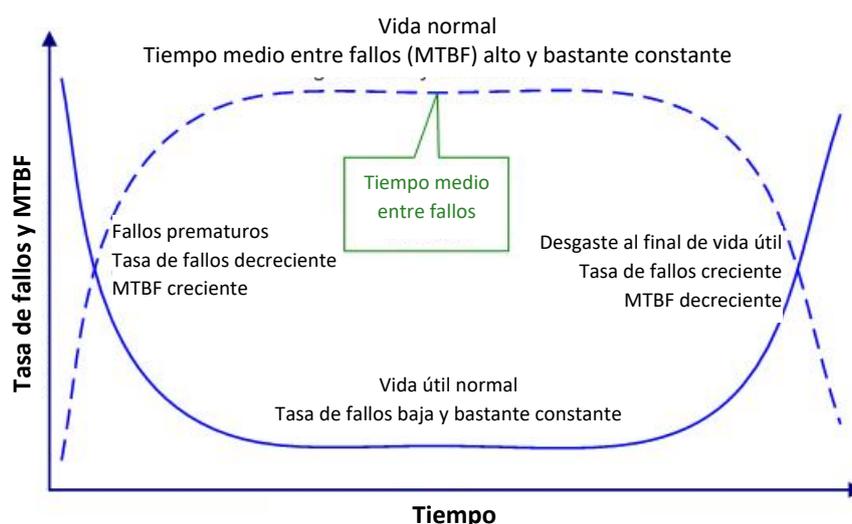


Figura 3 El tiempo medio entre fallos (MTBF) sólo es constante durante la llamada parte normal del ciclo de vida

Tal y como puede verse en la Figura 3, sólo tiene sentido emplear el tiempo medio entre fallos (MTBF) como un parámetro de medición y base para la planificación mientras la población se encuentre en la parte de “vida normal” de su ciclo de vida, cuando la tasa de fallo es constante.

3.3 TRATAMIENTO DE FALLOS PREMATUROS (MEJORAS DE DISEÑO)

Antes de la entrega de los equipos para su puesta en funcionamiento, corresponde a los fabricantes y a los diseñadores de sistemas adoptar las medidas oportunas, por medio de pruebas de diseño adecuadas y de control de calidad. Dichas medidas deben incluir pruebas de estrés y análisis de la causa raíz de cualquier fallo que se detecte, proporcionando una información adecuada a los diseñadores y/o fabricantes.



Durante la adquisición, las autoridades de señalización y balizamiento deben asegurarse de que el nivel mínimo de comprobación exigido se incluya en las especificaciones del producto.

Para poder calcular el verdadero tiempo medio entre fallos durante la vida normal de los elementos, el gestor de ayudas a la navegación será consciente del hecho de que, en los primeros años de vida de una serie de elementos, se producirán fallos prematuros y que los datos sobre dichos fallos deben identificarse y separarse de los de los fallos detectados en fases posteriores del ciclo de vida.

3.4 TRATAMIENTO DE FALLOS DE DESGASTE (MANTENIMIENTO PREVENTIVO)

Como ya se ha mencionado, los fallos de desgaste al final de la vida útil se producen, principalmente, a causa de la fatiga de los materiales. Un ejemplo de este tipo de fallos es el inevitable fallo final de una lámpara incandescente tras una vida útil satisfactoria. En muchos casos, es obvio que estos fallos pueden prevenirse mediante el mantenimiento preventivo, sustituyendo, antes de que se produzca un fallo real, elementos que podrían desgastarse.

Es evidente la importancia de un mantenimiento preventivo adecuado. Sin embargo, debe garantizarse un buen compromiso entre los recursos empleados para el mantenimiento programado y la consiguiente mejora de fiabilidad.

Por lo tanto, debe garantizarse una planificación minuciosa del mantenimiento preventivo, basada en unos conocimientos profundos de los mecanismos de desgaste que se producen en una serie de productos.

Los fabricantes deben declarar la denominada vida útil de sus productos, definiendo y describiendo los mecanismos predominantes de desgaste de los mismos y durante cuánto tiempo puede esperarse que el producto funcione, en las condiciones de funcionamiento especificadas, antes de fallar debido a algún tipo de desgaste.

Debe resaltarse que el parámetro de vida útil no es equivalente al tiempo medio entre fallos.

3.5 TRATAMIENTO DE FALLOS DE VIDA NORMAL (EQUIPO DE REPARACIÓN)

Como se ha mencionado anteriormente, los fallos de vida normal se producen principalmente debido a casos aleatorios del “estrés que supera la resistencia”, p. ej. cuando falla una lámpara de filamento a causa de una sobretensión transitoria del suministro de energía.

Debido a la naturaleza aleatoria de este tipo de fallos, el mantenimiento preventivo es inútil para su prevención.

La única manera de reducir el número de estos fallos aleatorios consiste en aumentar la fiabilidad del diseño en cuestión, modificándolo, bien optimizando la resistencia mecánica y eléctrica de algunas piezas del diseño o aumentando la refrigeración de otras para evitar el calentamiento excesivo, etc.

Dado el nivel de fiabilidad de una pieza o un subsistema concreto, que forma parte de un sistema más amplio, se puede mejorar la fiabilidad del sistema en su conjunto, introduciendo la redundancia funcional a nivel del subsistema. Se tratará esta cuestión más adelante en este documento.

Cuando un sistema en concreto falla debido a un fallo aleatorio de vida normal es importante disponer de los recursos adecuados de reparación para garantizar una recuperación puntual, a fin de alcanzar la disponibilidad deseada para el sistema.

3.6 CÁLCULO DE LA FIABILIDAD DE LOS SISTEMAS

Puede calcularse el tiempo medio entre fallos (MTBF), dividiendo el tiempo total menos el tiempo de inactividad, por el tiempo total, donde el tiempo medio entre fallos y todos los otros tiempos se expresan en horas (véase la Ecuación 1

$$A = \frac{\text{Tiempo total} - \text{Tiempo de interrupción}}{\text{Tiempo total}} (\text{horas}).$$



También se puede calcular la disponibilidad de una ayuda a la navegación dividiendo el tiempo medio entre fallos por la suma del tiempo medio entre fallos y el tiempo medio de reparación (MTTR, del inglés, *Mean Time to Repair*).

Si la Ecuación 3 ($A = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR}$) se reformula, se obtiene el $MTBF = MTTR \left(\frac{A}{1-A} \right)$

Ecuación 8 *Tiempo medio entre fallos (2)*

que es útil para los diseñadores de sistemas para calcular la disponibilidad (tiempo medio entre fallos, o MTBF) de sistemas y subsistemas a fin de garantizar que los objetivos de disponibilidad fijados por la dirección se puedan alcanzar con un tiempo medio de reparación (MTTR) concreto.

3.7 TIEMPO MEDIO DE REPARACIÓN (MTTR)

Puede calcularse el tiempo medio de reparación a partir del tiempo de inactividad, expresado en horas, dividido por el número de fallos.

$$MTTR = \left(\frac{\text{Tiempo de inactividad}}{\text{Número de fallos}} \right)$$

Ecuación 9 *Tiempo medio de reparación (1)*

La utilización de sistemas modulares, que permiten reparaciones rápidas mediante la sustitución de elementos defectuosos y el uso de dispositivos que facilitan la comprensión de los técnicos de reparación y la identificación rápida de componentes defectuosos, puede reducir el tiempo medio de reparación.

3.8 MEJORA DE LA FIABILIDAD

La utilización de componentes de equipo de buena calidad y la elección de una filosofía operativa adecuada pueden mejorar la fiabilidad de un sistema de ayuda a la navegación.

Los enfoques de mejora relacionados con los equipos afectan tanto a la parte del tiempo medio entre fallos (MTBF) como a la del tiempo medio de reparación (MTTR) de la ecuación de disponibilidad. La especificación de componentes de elevada fiabilidad y la aplicación prudente de la redundancia de aquellos componentes que sean menos fiables mejora el funcionamiento del sistema y la fiabilidad general de la ayuda. Un enfoque alternativo sería simplificar el sistema mediante la utilización de dispositivos con menos piezas, que son sencillos de comprender y sustituir, para que haya menos que pueda fallar, lo que da como resultado un tiempo medio entre fallos más elevado.

La respuesta del Departamento de Mantenimiento ante los fallos de las ayudas a la navegación afecta la parte del tiempo medio de reparación (MTTR) de la ecuación de disponibilidad. Tanto el desplazamiento inmediato de los equipos de reparación como la utilización de medios rápidos de transporte, tales como helicópteros o barcos de alta velocidad, pueden disminuir lo que suele ser la parte más importante del tiempo medio de reparación: el tiempo de desplazamiento a la ayuda. La supervisión electrónica puede utilizarse para detectar pautas que conduzcan a fallos, así como para permitir el mantenimiento programado y así evitarlos con antelación y mejorar la eficacia de los equipos de reparación.

La toma de decisiones sobre el funcionamiento del sistema es capaz de compensar, en cierta medida, un bajo tiempo medio entre fallos en el intervalo abreviado. El suministro de repuestos al emplazamiento para elementos reparables y la utilización de un sistema de gestión para mantener la integridad de los repuestos en el emplazamiento garantizan que las reparaciones se pueden llevar a cabo con un sólo desplazamiento a la ayuda.

Los métodos elegidos para el funcionamiento del sistema también pueden ayudar a determinar la infraestructura necesaria para la utilización y el mantenimiento del sistema de ayudas. La distribución de recursos (embarcaciones de servicio, vehículos, aeronaves, personas y talleres) y la política de respuesta ante fallos tienen un impacto directo en el tiempo medio de reparación.

El establecimiento de una programación de mantenimiento preventivo para cada ayuda y de un programa de formación para los técnicos y gestores de mantenimiento son vitales para lograr reducir al máximo el tiempo



medio entre fallos del hardware. Al fijar los requisitos operacionales, una autoridad de señalización y balizamiento debe simplificar los requisitos de funcionamiento tanto como sea factible; aunque los técnicos expertos puedan idear sistemas de energía, de control y de señalización muy complejos, es posible que no sean deseables en función de los costes, niveles de mantenimiento y la destreza técnica necesaria para lograr un funcionamiento fiable.

En el apartado 4 se presentan métodos de cálculo de la fiabilidad prevista de los equipos, basados en la fiabilidad de sus componentes. Puede comprobarse el cálculo del tiempo medio entre fallos previsto, comparando el objetivo esperado del tiempo medio entre fallos, derivado de dicho análisis, con una estimación bastante aproximada del de las ayudas existentes. Puede, entonces tomarse la decisión sobre si un equipo existente cumple el objetivo, si se debe retirar o añadir algún elemento o elementos de respaldo, si deben buscarse equipos más fiables y en qué medida no sería más ventajoso introducir procedimientos mejorados de mantenimiento.

La Recomendación E-105 de la IALA sobre la necesidad de cumplir normas nacionales e internacionales recomienda que:

- Las autoridades de señalización y balizamiento hagan el mayor uso posible de las normas nacionales e internacionales disponibles, ya que pueden proporcionar un nivel de calidad muy aceptable en la adquisición y las especificaciones de sus equipos.

Además, se debe dar preferencia a los proveedores que dispongan de algún tipo de certificación oficial de aprobación de sus procedimientos de certificación de la calidad otorgada por su autoridad nacional de normalización.

- También se recomienda a las autoridades de señalización y balizamiento que consideren la viabilidad de establecer sus propios procedimientos internos de certificación de la calidad.

Recordando el lema que dice que no puedes gestionar lo que no puedes medir, se debe prestar atención a la recogida de datos sobre la fiabilidad, que aporta una base mensurable para la evaluación del funcionamiento de una ayuda a la navegación. La Guía 1037 de la IALA sobre la Recopilación de datos para el cálculo del funcionamiento de ayudas a la navegación proporciona información adicional sobre la recogida y el análisis de datos de funcionamiento.

3.9 EVALUACIÓN DE RIESGOS

La evaluación de riesgos reconoce dos componentes – la probabilidad del fallo y sus consecuencias – y el nivel de riesgo es el producto de estos dos factores. Evidentemente, se aplican consideraciones distintas a incidentes menores relativamente frecuentes y de poca importancia y a un único incidente raro con consecuencias catastróficas.

Diversas configuraciones de ayudas a la navegación en una vía navegable concreta pueden proporcionar la misma cobertura efectiva. La solución “A” podría depender de un número relativamente reducido de ayudas, caras y muy fiables, mientras la solución “B” consiste en numerosas ayudas, menos costosas y menos fiables. Ambas soluciones serían igualmente eficaces para proporcionar al navegante la información de navegación necesaria. La solución “C” podría utilizar las mismas ayudas que la “A”, pero con una menor fiabilidad de cada ayuda debido a estrictos reglamentos que afectan a la formación y manejo de los prácticos. Por regla general, los prácticos experimentados tienen la capacidad de depender menos de las ayudas a la navegación prestadas que un navegante sin conocimientos locales.

Debido a la complejidad y la indeterminación de las variables implicadas, se han detectado numerosos problemas en la aplicación de la evaluación de riesgos a las ayudas a la navegación prestadas por parte de las autoridades de señalización y balizamiento. Sin embargo, para asistir en este proceso, existe un programa llamado “IALA Waterways Risk Analysis Program” (IWRAP), disponible en la IALA.

4 MODELOS DE LA FIABILIDAD DE LOS SISTEMAS

4.1 MODELIZACIÓN DE LA FIABILIDAD DE LOS SISTEMAS

Tal y como se muestra en la Figura 4, mediante un cierto número de “bloques” individuales interconectados funcionalmente, se puede modelizar un sistema más amplio durante la etapa de vida normal, o de tasa de fallo constante, de la curva de la bañera.

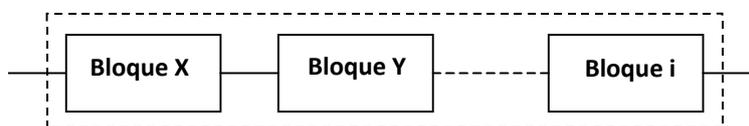


Figura 4 “Bloques” individuales funcionalmente interconectados

Modelización de la fiabilidad de los sistemas utilizando subsistemas individuales e independientes estadísticamente.

Durante la vida normal, puede suponerse que cada bloque tiene su propio nivel de fiabilidad, dado que los bloques son estadísticamente independientes entre sí.

Habitualmente, se modeliza la distribución estadística de los fallos de vida normal mediante la función de distribución exponencial dada por:

$$f(t) = \left(\frac{1}{MTBF} \right) e^{-(1/MTBF)t}$$

Ecuación 10 *La función de distribución exponencial*

La función de fiabilidad de esta función de distribución viene dada por:

$$R(t) = e^{-(1/MTBF)t}$$

Ecuación 11 *La función de fiabilidad*

La función de fiabilidad puede emplearse para calcular la probabilidad de que un bloque esté funcionando correctamente en un momento dado desde que comenzó a funcionar.

Se utiliza extensamente la función de distribución exponencial debido a su sencillez, y no necesariamente porque sea un modelo preciso de todo tipo de fallos aleatorios, que no lo es. Otras funciones de distribución, como la distribución de Weibull, son más versátiles y, en la actualidad, se utilizan con mayor frecuencia, pero, debido a su complejidad, suelen necesitar programas informáticos especializados.

Es importante comprender que el análisis de fiabilidad se basa en una función de distribución exponencial de fallos.

Al realizar los análisis de fiabilidad que figuran más adelante en este documento, es importante entender y recordar las siguientes suposiciones y limitaciones:

- Se pueden modelizar todos los sistemas mediante un cierto número de subsistemas (bloques), conectados en serie, en paralelo, o en ambos;
- Los distintos bloques son estadísticamente independientes;
- Cada bloque está funcionando en su vida normal y tiene un tiempo medio entre fallos (MTBF) constante;
- Para un bloque concreto, el tiempo medio de reparación (MTTR) es mucho menor que su tiempo medio entre fallos (MTBF);

- La diferencia entre el tiempo medio entre fallos (MTBF) y el tiempo medio de reparación (MTTR) es insignificante, dado que el tiempo medio de reparación (MTTR) es mucho menor que el tiempo medio entre fallos (MTBF);
- Se supone que la probabilidad de que un dispositivo de conmutación funcione correctamente es constante y equivalente a 1;
- Un elemento reparado es equivalente a uno nuevo en términos del tiempo medio entre fallos (MTBF);
- Un elemento que se pone en funcionamiento de vez en cuando (p. ej. un elemento de respaldo) tiene el mismo tiempo medio entre fallos (MTBF) que uno que funciona de manera continua.

En lo que resta de este apartado, se describen los métodos prácticos para calcular el tiempo medio entre fallos (MTBF) de los sistemas más amplios, basados en el de sus subsistemas individuales (bloques).

4.2 BLOQUES EN SERIE

El sistema funciona si, y solamente si, cada uno de los bloques está funcionando correctamente.

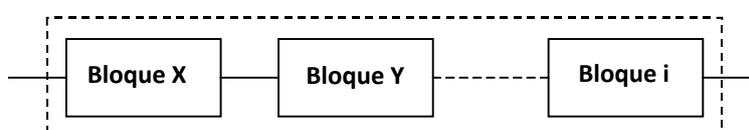


Figura 5 *Bloques en serie*

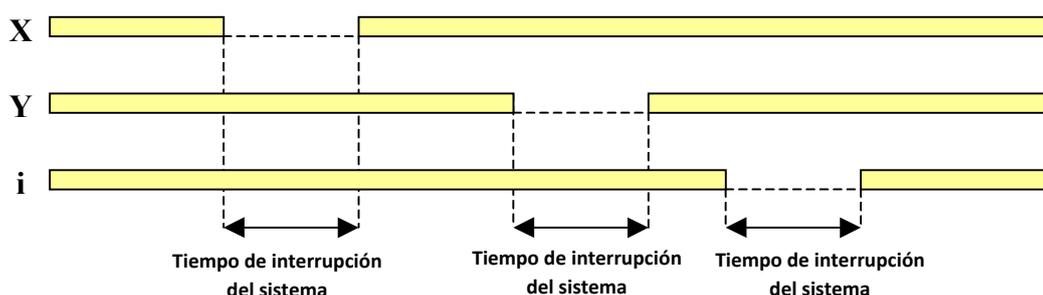


Figura 6 *Presentación del tiempo de funcionamiento*

El tiempo medio entre fallos del sistema ($MTBF_{SYS}$) se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$\frac{1}{MTBF_{SYS}} = \frac{1}{MTBF_X} + \frac{1}{MTBF_Y} + \dots + \frac{1}{MTBF_i}$$

Ecuación 12 *MTBF del sistema*

Donde

$MTBF_i$ es el tiempo medio entre fallos del bloque i.

El tiempo medio de reparación del sistema ($MTTR_{SYS}$) se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$MTTR_{SYS} = MTBF_{SYS} \sum_{n=1}^i \frac{MTTR_n}{MTBF_n} \quad (\text{Consulte el apartado A 1})$$

Ecuación 13 *MTTR de sistema*

Donde:

p es la probabilidad de que Y no comience a funcionar correctamente cuando falle X.

4.3 BLOQUES EN PARALELO, REDUNDANCIA PASIVA

4.3.1 REDUNDANCIA PASIVA. SIN REPARACIÓN

Sólo entra en funcionamiento el bloque Y si falla el boque X, y sólo se repara el bloque X tras un fallo del bloque Y.

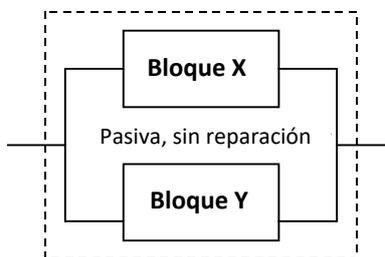


Figura 7 *Redundancia pasiva - sin reparación*

La sucesión de tiempos de funcionamiento y de interrupción es la siguiente:



Figura 8 *Presentación de redundancia pasiva - sin reparación*

$$MTBF_{SYS} = MTBF_X + (1 - p)MTBF_Y \quad (\text{Consulte el apartado A 2})$$

Ecuación 14 *Tiempo medio entre fallos (MTBF) de un sistema pasivo sin reparación*

Donde:

p es la probabilidad de que Y no comience a funcionar correctamente cuando falle X

4.3.2 REDUNDANCIA PASIVA. CON REPARACIÓN

Sólo entra en funcionamiento el bloque Y si falla el bloque X, y sólo funciona mientras se repara X.

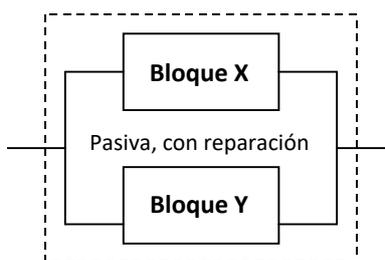


Figura 9 *Redundancia pasiva - con reparación*

El tiempo medio entre fallos del sistema ($MTBF_{SYS}$) se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$MTBF_{SYS} = \frac{MTBF_X + MTRR_X}{(p + (1-p)) \frac{MTRR_X}{MTBF_Y}} \quad (\text{Consulte el apartado A 3})$$

Ecuación 15 *MTBF de un sistema pasivo - con reparación*

4.4 BLOQUES EN PARALELO, REDUNDANCIA ACTIVA

4.4.1 REDUNDANCIA ACTIVA SIN REPARACIÓN CUANDO SÓLO HA FALLADO UN BLOQUE

X e Y funcionan al mismo tiempo cuando X o Y por sí solos serían suficientes para producir la función exigida del sistema S (un fallo del sistema se produce cuando X e Y estén averiados).

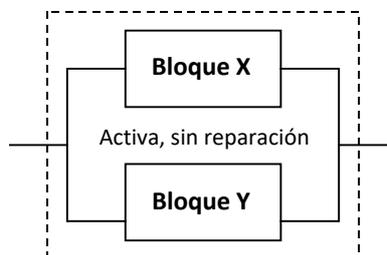


Figura 10 Redundancia activa - sin reparación cuando sólo ha fallado un bloque

Si X e Y son idénticos, entonces, si el tiempo entre fallos es fijo (p.ej. los fallos no se producen al azar), el tiempo medio entre fallos del sistema ($MTBF_{SYS}$) sería equivalente al tiempo medio entre fallos de X ($MTBF_X$) y la redundancia no aportaría ninguna ventaja.

La redundancia activa aportaría beneficios si la dispersión de los tiempos de funcionamiento tiene alguna importancia.

Si X e Y son idénticos y con una tasa de fallo constante, se obtiene el tiempo medio entre fallos del sistema ($MTBF_{SYS}$) mediante la siguiente fórmula:

$$MTBF_{SYS} = \frac{3-2p}{2} MTBF_X \quad (\text{Consulte el apartado A 4})$$

Ecuación 16 El tiempo medio entre fallos (MTBF) de un sistema donde los bloques X e Y son idénticos y con una tasa de fallo constante

Donde:

p es la probabilidad de que el segundo bloque se vuelva ineficaz tan pronto como se produzca un fallo en un bloque.

4.4.2 REDUNDANCIA ACTIVA CON REPARACIÓN DE UN ELEMENTO QUE HA FALLADO

X e Y funcionan simultáneamente cuando X o Y por sí solos serían suficientes para garantizar que la función exigida del sistema S se realice.

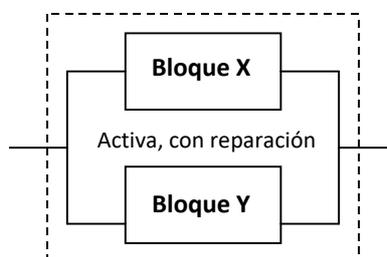


Figura 11 Redundancia activa - con reparación cuando sólo ha fallado un bloque

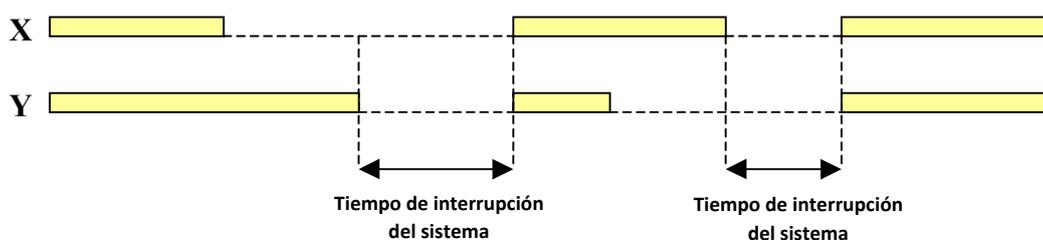


Figura 12 *Presentación de redundancia activa - con reparación*

Se obtiene el tiempo medio entre fallos del sistema ($MTBF_{SYS}$) mediante la siguiente fórmula:

$$MTBF_{SYS} = \frac{1}{\left(\frac{1}{MTTR_X} + \frac{1}{MTTR_Y}\right)} \left[\frac{1-IS}{IS}\right] \quad (\text{Consulte el apartado A 5})$$

Ecuación 17 *Redundancia activa con reparación cuando sólo ha fallado un bloque*

Donde:

$$IS = \frac{MTTR_X}{(MTBF_X + MTTR_X)} \times \frac{MTTR_Y}{(MTBF_Y + MTTR_Y)}$$

5 EJEMPLOS

5.1 METODOLOGÍA PARA EVALUAR EL IMPACTO DEL TIEMPO DE RESPUESTA ANTE FALLOS (FRT) EN LA DISPONIBILIDAD DE LOS SERVICIOS

5.1.1 CÓMPUTO DEL TIEMPO DE RESPUESTA ANTE FALLOS

Puede derivarse el tiempo de respuesta ante fallos (FRT, del inglés, *Failure Response Time*) de la relación de disponibilidad (A) entre el tiempo medio entre fallos (MTBF) y el tiempo medio de reparación (MTTR):

(véase la Ecuación 3 ($A = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR}$)), que nos da la Ecuación 8 ($MTBF = MTTR \left(\frac{A}{1-A}\right)$)

Resolviéndola para obtener el tiempo medio de reparación (MTTR), nos da:

$$MTTR = \frac{MTBF(1 - A)}{A}$$

Ecuación 18 *Tiempo medio de reparación (2)*

Tomando a título de ejemplo el siguiente caso, en donde se suponen los siguientes valores:

A	0,998
MTBF	= 14000 horas
Tiempo medio de notificación (<i>MTT Report</i>)	= 5 horas
Tiempo medio de preparación (<i>MTT Prepare</i>)	= 4 horas
Tiempo medio de desplazamiento (<i>MTT Transport</i>)	= 11,5 horas
(incluye la posible pérdida de tiempo debido a inclemencias meteorológicas)	
Tiempo medio de reparación en el emplazamiento (<i>MTT Repair on Site</i>)	= 2 horas

Reconociendo que:

$$MTTR = \text{Tiempo medio de respuesta ante fallos (MFRT)} + MTT \text{ Notificación} + MTT \text{ Preparación} + MTT \text{ Desplazamiento} + MTT \text{ Reparación in situ}$$



Ecuación 19 Composición del tiempo medio de reparación (MTTR)

Insertando los valores asumidos, nos da:

$$MTTR = 5 + 4 + 11,5 + 2 + MFRT$$

$$MTTR = 22,5 + MFRT$$

Sustituyendo este valor del tiempo medio de reparación (MTTR) en la Ecuación 18, nos da:

$$22,5 + MFRT = \frac{14.000(1-0,998)}{0,988}; 22,5 + MFRT = 28,1; MFRT = 28,1 - 22,5$$

$$MFRT = 5,6 \text{ horas.}$$

5.1.2 CONCLUSIÓN

Para los valores dados del tiempo medio entre fallos (MTBF) y los tiempos de reparación, un tiempo medio de respuesta ante fallos de 5,6 horas elegido por la dirección permitiría al servicio de faros mantener el nivel declarado de servicio ($A = 0,998$) para el navegante.

Si el valor computado del tiempo medio de respuesta ante fallos (MFRT) fuera negativo, significaría que el tiempo medio entre fallos (MTBF) es demasiado bajo o que el total del tiempo medio de reparación (MTTR) es demasiado elevado para poder ofrecer la disponibilidad declarada. La situación del tiempo medio entre fallos (MTBF) puede mejorarse, especificando equipos de mayor calidad, aumentando la redundancia de los equipos o incrementando el mantenimiento preventivo. Por su parte, la situación del tiempo medio de reparación (MTTR) puede mejorarse, reduciendo los diversos factores de tiempo en el total del tiempo medio de reparación (MTTR).

Es posible que una cierta ayuda a la navegación no parezca muy importante y, como resultado, se le haya asignado una disponibilidad baja y un tiempo medio de respuesta ante fallos (MFRT) elevado. Debido a un fallo de esta ayuda, un buque podría ser inducido a error, encallar, sufrir daños importantes y dañar gravemente al medio ambiente, con costes que pueden ser enormes. Al establecer un objetivo de disponibilidad, un servicio de faros debe tener en cuenta esto.

5.2 EJEMPLOS DE POLÍTICAS DE REPARACIÓN SELECTIVA

Las siguientes cifras representan típicos tiempos medios entre fallos (MTBF) para los componentes de ayudas a la navegación_

Suministro de energía:	3 averías/año >4 segundos = 3.000 horas
Destellador:	80.000 horas
Generador diésel:	10.000 horas, cuando se realiza el mantenimiento prescrito
Motor giratorio de la óptica:	20 años (aproximadamente, 200.000 horas)
Lámpara:	2.000 - 4.000 horas

5.2.1 BLOQUES EN SERIE

Suministro de energía - Destellador - Lámpara

$$\text{De la Ecuación 12 } \left(\frac{1}{MTBF_{SYS}} = \frac{1}{MTBF_X} + \frac{1}{MTBF_Y} + \dots + \frac{1}{MTBF_i} \right)$$

$$\frac{1}{MTBF_{SYS}} = \frac{1}{3000} + \frac{1}{80000} + \frac{1}{2000} \Rightarrow MTBF_{SYS} = 1.182 \text{ horas}$$

5.2.2 REDUNDANCIA PASIVA - SIN REPARACIÓN

Generadores diésel

Otros ejemplos:



- Destelladores de respaldo
- Suministro de energía con generador diésel de respaldo
- Luz principal con luz de respaldo
- Cambiador de lámparas
- Lámpara de dos filamentos

De la Ecuación 14 ($MTBF_{SYS} = MTBF_X + (1 - p)MTBF_Y$)

Se supone que el generador diésel no arranca la 50ª vez. $P = 0,02$

$$MTBF_{SYS} = 10,000 + (1 - 0.02) \times 10,000 = 19.800 \text{ horas}$$

5.2.3 REDUNDANCIA PASIVA, CON REPARACIÓN

Generadores diésel

De la Ecuación 15 ($MTBF_{SYS} = \frac{MTBF_X + MTTR_X}{(p + (1 - p)) \frac{MTTR_X}{MTBF_Y}}$)

$$MTBF_{SYS} = \frac{MTBF_X + MTTR_X}{(p + (1 - p)) \frac{MTTR_X}{MTBF_Y}}$$

$$MTBF_{SYS} \approx \frac{N(MTBF_X + MTTR_X)}{N_{SYSApprox}}$$

Se supone que el tiempo medio de reparación (MTTR) = 40 horas

$$MTBF_{SYS} = \frac{10.000 + 40}{(0,02 + (1 - 0,02)) \frac{40}{10.000}} = 420.000 \text{ horas}$$

5.2.4 REDUNDANCIA ACTIVA SIN REPARACIÓN

El sistema de rotación de la óptica funciona con un motor giratorio duplicado, en el que un motor por sí sólo continuará accionando la óptica cuando falle el otro.

De la Ecuación 16 ($MTBF_{SYS} = \frac{3-2p}{2} MTBF_X$)

$$MTBF_{SYS} = \frac{3}{2} MTBF_X = \frac{3}{2} (200.000) = 300.000$$

6 PROGRAMAS INFORMÁTICOS

Hay disponibles muchos programas de software específicamente diseñados para calcular la fiabilidad y la disponibilidad de los sistemas y para realizar simulaciones de funcionalidad, con objeto de comprobar las características de disponibilidad de la configuración de los sistemas. En su origen, fueron diseñados para aplicaciones de elevado coste, como las industrias de defensa. En la actualidad, se emplean de modo más general, incluyendo la aviación, la generación de energía, la prospección de petróleo, así como para el análisis de procesos y sistemas de alto valor para minimizar las pérdidas de producción y los tiempos de inactividad de los sistemas. Al igual que en gran parte del software de ingeniería, un simulador de fiabilidad y disponibilidad de funcionalidad puede ser caro, y requiere una inversión considerable en recursos y formación para permitir el uso de la herramienta con soltura. La eficacia de dicho software o de los cálculos manuales depende de los datos con que se les alimenta y de la destreza del operador. Dado que los fabricantes de sistemas de ayuda a la navegación o de sus componentes rara vez especifican su fiabilidad en términos del tiempo medio entre fallos (MTBF), el punto anterior es la deficiencia principal cuando se utilizan.



Aunque el software puede resultar costoso, muchas empresas ponen a disposición versiones de evaluación, que se descargan gratis de Internet, algunas de las cuales sólo tienen restricciones menores. Por lo tanto, pueden ser eficaces para realizar investigaciones de sistemas a pequeña escala y, por consiguiente, de los sistemas de ayudas a la navegación. En el ANEXO B, se muestra la presentación de los datos de salida de una de estas versiones de evaluación gratis.

A falta de cifras publicadas del tiempo medio entre fallos (MTBF), se pueden calcular sobre la base del recuento de piezas, utilizando las cifras de los componentes electrónicos en el manual MIL-HDBK-217, una norma de predicción de fiabilidad desarrollada originalmente para las industrias aeroespacial y de defensa. Alternativamente, pueden hacerse suposiciones del tiempo medio entre fallos (MTBF) de un sistema basadas en datos históricos de cierto número de sistemas desplegados a lo largo de muchos años.

En los últimos años, se ha empleado una técnica adicional, que utiliza la teoría de la probabilidad para analizar un sistema en términos de la probabilidad de que se encuentre en cierto estado; en el caso de una ayuda a la navegación, por ejemplo, si una luz de navegación se encuentra en estado “Normal” o de “Fallo”. Una de estas técnicas es la conocida como la probabilidad bayesiana y puede resultar útil ante la falta de datos históricos o cuantitativos del tiempo medio entre fallos (MTBF). La probabilidad bayesiana permite realizar una afirmación sobre la creencia de que un sistema o componente se encontrará en un estado concreto en función de unos conocimientos específicos que podrían afectar a su probabilidad. Hay programas informáticos disponibles que utilizan esta técnica mediante la representación de un sistema como una red bayesiana (BN, del inglés, *Bayesian Network*), en términos de sus unidades o componentes individuales. Aunque no se precisen datos sobre el tiempo medio entre fallos (MTBF), es fundamental tener un buen conocimiento de la probabilidad de que un componente se encuentre en un estado u otro y, por consiguiente, las redes bayesianas suelen emplearse en sistemas expertos.

7 SISTEMAS DE GESTIÓN DE CALIDAD Y LA FIABILIDAD

No se pueden separar la fiabilidad y la disponibilidad generales de una ayuda a la navegación de las organizaciones que la diseña, fabrica, instala, mantiene y explota. Es, por lo tanto, importante que dichas organizaciones tengan implantado un sistema de gestión de calidad para garantizar un producto consistente y un servicio fiable. El sistema de gestión de calidad establecido en la norma internacional ISO 9000:2000 (o equivalente) propone definir las áreas que deben abordarse dentro de una organización para alcanzar estos objetivos.

Los principios fundamentales del Sistema de gestión de la calidad (Norma ISO 9000) son los siguientes:

- Estar atento a las necesidades de los clientes para cumplir con sus requisitos y expectativas;
- Liderar la organización, estableciendo una unidad de propósito y dirección, y crear un ambiente que estimule a las personas a comprometerse y a alcanzar los objetivos de la organización;
- Implicar a las personas en todos los niveles, estimulándoles y ayudándoles a desarrollar sus capacidades;
- Gestionar sus actividades y recursos de forma sistemática, utilizando procesos definidos;
- Garantizar que los procesos se interrelacionen entre sí dentro de un sistema;
- Fomentar la mejora continua de la organización para que mejore su desempeño y se convierta en más eficaz;
- Tomar decisiones basadas en el análisis de hechos y datos;
- Trabajar con proveedores y desarrollar una relación que sea mutuamente beneficiosa.

La implantación y el desarrollo de estos principios no sólo garantizarán un producto o servicio consistente, sino que desarrollarán la organización, mejorando su eficacia con el paso del tiempo.

No debe suponerse que un sistema formal de gestión de calidad, basado en estos principios, requiere una superestructura costosa que supervise a la organización existente. A menudo, sólo se trata de racionalizar y



documentar lo que ya se hace. Hay guías disponibles para ayudar a establecer los mecanismos necesarios, y estos se pueden adaptar a las necesidades y recursos de cada autoridad concreta.

7.1 ESPECIFICACIONES

Una especificación es “un documento y unos datos que definen las necesidades o expectativas que se declaran, que generalmente son implícitas u obligatorias”. Es un punto de partida clave en el camino para garantizar la satisfacción del cliente. Antes de redactar una especificación, es aconsejable preguntar a una organización de normalización nacional o internacional si ya existen normas que cumplan los requisitos. Si resultara necesario redactar una especificación nueva, es esencial seguir un método lógico. La definición de calidad abarca todos los aspectos de un producto o servicio y, por consiguiente, se deduce que la especificación debería cubrir todas las prestaciones y características. En la práctica, existe una gran diversidad de contenidos y detalles en las especificaciones y no puede darse por hecho que las especificaciones de todos los productos encuadrados dentro de la misma categoría siempre contengan, desde el punto de vista de la calidad, los mismos requisitos.

7.2 DATOS DE LAS ESPECIFICACIONES

Es posible que no sea fácil cuantificar algunos parámetros de la especificación. Uno de los más difíciles es la definición de las condiciones ambientales que deben cumplirse. Consideremos, por ejemplo, los equipos a utilizar en una boya de navegación; los valores de aceleración (desplazamiento vertical) variarán considerablemente entre los diferentes diseños de boya. Lo ideal sería la realización de ensayos para establecer los parámetros y así garantizar que la especificación no sea demasiado estricta o laxa.

Cabe resaltar que la especificación del objetivo contiene los requisitos de fiabilidad; en este punto, de nuevo, a falta de datos fundamentados, pueden ser muy difíciles de cuantificar. Se dispone de cifras sobre las tasas de fallo de los componentes, pero es fundamental asegurarse de que las condiciones bajo las cuales se obtuvieron las cifras son relevantes para el caso que se estudia. Se necesita un banco de datos de tasas de fallo y de fiabilidad, basado en la experiencia en condiciones de funcionamiento.

7.3 MANTENIMIENTO

Al redactarse unas especificaciones nuevas, los Departamentos de Explotación y Mantenimiento deben estar representados en el equipo implicado en la redacción y tener la oportunidad de comentar cualquier revisión de las especificaciones existentes. En particular, tendrán un efecto importante en la disponibilidad la facilidad de mantenimiento —es decir, la facilidad con la que el sistema se puede volver a poner en servicio tras un fallo— y la fiabilidad.

Para garantizar que el diseño del sistema sea un éxito, es fundamental la identificación del requisito de la facilidad de mantenimiento durante el ciclo de vida del sistema. Los factores que afectan a la contribución general que tiene la facilidad de mantenimiento en la disponibilidad del sistema incluirán la ubicación geográfica, la distancia de la ayuda a la navegación al centro de mantenimiento y la disponibilidad de transporte, recursos y recambios. Sin embargo, las prácticas y procedimientos de mantenimiento empleados por la autoridad de señalización y balizamiento pueden minimizar, hasta cierto punto, algunos de estos factores.

En general, el mantenimiento puede dividirse en tres tipos: el mantenimiento correctivo, el preventivo y las inspecciones.

7.3.1 MANTENIMIENTO CORRECTIVO

El mantenimiento correctivo suele consistir en la reparación o sustitución de un componente/módulo del sistema para restaurarlo a su condición de funcionalidad plena lo antes posible. Implica la detección por el técnico de la avería, la sustitución o reparación del componente defectuoso y, finalmente, la realización de pruebas sobre el sistema para comprobar que funciona satisfactoriamente.

7.3.2 MANTENIMIENTO PREVENTIVO

El mantenimiento preventivo es el proceso en que los componentes o módulos se revisan o sustituyen antes de que fallen para dar apoyo al funcionamiento continuo sin fallos. Puede ser de gran importancia el efecto del



mantenimiento preventivo en la disponibilidad, ya que el tiempo de interrupción puede reducirse de forma significativa con un sistema de mantenimiento preventivo, porque no incluye el tiempo de desplazamiento al emplazamiento, sino sólo el tiempo de reparación in situ. La programación del mantenimiento preventivo se basa en las estadísticas de fiabilidad y los datos históricos para determinar los componentes clave del sistema que tienen más probabilidades de desgaste.

7.3.3 INSPECCIONES

El objetivo principal de la inspección es la detección del desgaste, la degradación de los componentes y los fallos ocultos. Si se detectan dichos fallos, entonces se realizará el mantenimiento correctivo para resolver el problema.

7.4 SELECCIÓN DE UN PROVEEDOR

La capacidad del proveedor de gestionar y entregar el proyecto es un factor importante para lograr la fiabilidad y la facilidad de mantenimiento. Durante el proceso de revisión de la licitación, deben considerarse los factores que se comentan a continuación. Además, se diseñará un sistema de puntuación para ayudar en la comparación de proveedores.

Se debe evaluar el proceso de comprobación y diseño del proveedor y, además, el comprador investigará los antecedentes históricos de la empresa en cuanto al diseño y las pruebas. Se preguntará si el proveedor ha sido capaz de diseñar equipos sin fallos importantes de diseño en el pasado. ¿Es adecuado el nivel de calidad del personal de diseño para trabajar en el contrato? ¿Son adecuados los procedimientos de diseño que se vayan a utilizar en el proyecto?

La fase de diseño del proyecto también se verá afectada por su complejidad. ¿Es la especificación clara e inequívoca? ¿Son los requisitos novedosos respecto a tecnologías no experimentadas? ¿Hay sistemas de control informáticos complejos? También la programación del tiempo permitido para el diseño tendrá un impacto en la fase de diseño del proyecto.

Aunque el proceso de producción no puede mejorar la fiabilidad y la facilidad de mantenimiento de un producto inherentes a su diseño, sí puede ejercer un efecto negativo. Al igual que el proceso de diseño, es necesario evaluar factores similares. Por ejemplo, ¿ha producido el fabricante equipos similares en el pasado? ¿Está el personal adecuadamente formado? ¿Tiene la experiencia suficiente? ¿Existe una función de certificación de calidad en el proceso de fabricación que incluya los ensayos y las inspecciones?

7.5 AUTORIDADES DE SEÑALIZACIÓN Y BALIZAMIENTO COMO PRESTADORES

Hasta ahora, este apartado se ha ocupado de la situación de la autoridad de señalización y balizamiento como comprador, pero también es conveniente considerarla como el prestador del servicio al navegante. Por definición, el control de calidad se aplica tanto a los servicios como a los productos y la Autoridad, en su papel de prestador, tiene el deber de asegurar la calidad del servicio prestado al navegante.

Rara vez se presenta la oportunidad de que el navegante pueda contribuir a la elaboración de una especificación, y no hay ninguna certeza de que desee hacerlo. Por lo tanto, la autoridad se encuentra en la situación de tener que redactar la especificación del servicio prestado, además de aplicar el pertinente control de calidad.

En un principio, estos comentarios pueden parecer superfluos, ya que todas las autoridades de señalización y balizamiento hacen grandes esfuerzos para mantener los más altos estándares. Sin embargo, en esta época de tecnología avanzada y compleja, merece la pena considerar la aplicación de técnicas adecuadas de control de calidad para garantizar el mejor uso de los fondos y recursos. Es, ni más ni menos, la ampliación lógica de las técnicas de fiabilidad y disponibilidad. El establecimiento de una estructura de control de calidad en una autoridad es similar al exigido a un fabricante y, en gran medida, es cuestión de definir la responsabilidad y ejercer el control necesario.

La tendencia actual hacia la responsabilidad del producto exige una consideración seria de los procedimientos formales de control de calidad como una forma de seguro. Puede ayudar de manera considerable a la



consecución del control de calidad el intercambio de especificaciones y normas entre autoridades de señalización y balizamiento

8 DEFINICIONES

La definición de los términos empleados en esta guía se encuentra en el Diccionario internacional de ayudas a la navegación marítima (Diccionario de la IALA) en <http://www.iala-aism.org/Wiki/diccionario>.

9 ACRÓNIMOS

A	(<i>Availability</i>) Disponibilidad
AtoN	(<i>Aid(s) to Navigation</i>) Ayuda/s a la navegación
BS	(British Standard) Norma británica
cd	Candelas
EN	(<i>English</i>) Inglés
FRT	(<i>Failure Response Time</i>) Tiempo de respuesta ante fallos
HDBK	(<i>Handbook</i>) Manual
IALA	International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities – AISM
ISO	(<i>International Standardization Organisation</i>) Organización Internacional de Normalización
IWRAP	(<i>IALA Waterway Risk Assessment Program</i>) Programa de Evaluación de Riesgos de Vías Navegables de la IALA
MIL	(<i>Military</i>) Militar
MoD	(<i>Ministry of Defence</i>) Ministerio de Defensa (del R.U.)
MFRT	(<i>Mean Failure Response Time</i>) Tiempo medio de respuesta ante fallos
MTBF	(<i>Mean Time Between Failures</i>) Tiempo medio entre fallos
MTTR	(<i>Mean Time to Repair</i>) Tiempo medio de reparación
p	Probabilidad
PCM	(<i>Process Capability Model</i>) Modelo de capacidad de procesos
R&M	(<i>Reliability and Maintainability</i>) Fiabilidad y facilidad de mantenimiento
SYS	(<i>System</i>) Sistema

10 REFERENCIAS

- [1] MoD R&M/6/4000/17.A “A Process Capability Model (PCM) for Reliability and Maintainability (R&M)”
- [2] BS EN ISO 9000:2000 “Quality Management Systems – Fundamentals and Vocabulary”



ANEXO A PRUEBAS DE LAS FÓRMULAS

A 1. BLOQUES EN SERIE (Ecuación 13)

Supongamos que todos los bloques dejen de funcionar cuando uno de ellos se averíe y los equipos hayan estado funcionando durante un periodo de tiempo muy largo T y hayan sufrido un gran número de fallos, N, que consiste en N₁ fallos del bloque 1, N₂ fallos del bloque 2... N_i fallos del bloque i.

El número total de fallos (N) en un sistema que consiste en i bloques, todos en serie, puede expresarse de la siguiente manera:

$$N = \sum_{n=1}^i N_n$$

El tiempo medio entre fallos (MTBF) del sistema es equivalente a

$$\frac{T}{N} = \frac{T}{N_1 + N_2 + \dots + N_i}$$

o sea, el tiempo total dividido por el número total de fallos.

Supongamos que el tiempo medio entre fallos MTBF_i sea el tiempo medio entre fallos del bloque número i

$$MTBF_i = \frac{T}{N_i}$$

entonces:

$$\frac{N}{T} = \frac{N_1}{T} + \frac{N_2}{T} + \dots + \frac{N_i}{T}$$

es decir:

$$\frac{1}{MTBF_{SYS}} = \frac{1}{MTBF_X} + \frac{1}{MTBF_Y} + \dots + \frac{1}{MTBF_i}$$

La inversión del tiempo medio entre fallos (MTBF) de un sistema con todos los bloques en serie es equivalente a la suma de las inversiones del tiempo medio entre fallos (MTBF) de cada bloque.

A continuación, se ofrece una demostración muy popular de esta fórmula:

La probabilidad de que dos sucesos independientes ocurran durante una prueba es equivalente al producto de la probabilidad individual de cada suceso. Entonces, la probabilidad de que un sistema con i bloques en serie no falle durante un periodo de tiempo T es equivalente a

$$R(t) = e^{-(\lambda_x t)} + e^{-(\lambda_y t)} + \dots + e^{-(\lambda_i t)}$$

Si cada bloque tiene una tasa de fallo constante.

A partir de la propiedad de la exponencial, resulta que

$$R(t) = e^{-\sum_{n=1}^i (\lambda_n t)}$$

por lo tanto, la tasa de fallo total λ_{SYS} del sistema es equivalente a

$$\lambda_{SYS} = \sum_{n=1}^i \lambda_n$$

Nota: Con las mismas notaciones de antes:



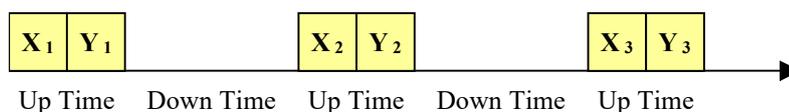
$$MTTR_{SYS} = \frac{\sum_{n=1}^i N_n MTTR_n}{N} = \frac{\sum_{n=1}^i \frac{T}{MTBF_n} MTTR_n}{\frac{T}{MTBF_{SYS}}}$$

Y por lo tanto:

$$MTTR_{SYS} = MTBF_{SYS} \sum_{n=1}^i \frac{MTTR_n}{MTBF_n}$$

A 2. REDUNDANCIA PASIVA SIN REPARACIÓN (Ecuación 14)

La sucesión de tiempos de funcionamiento y de interrupción es la siguiente:



Por definición

$$MTBF_{SYS} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^i (X_n + Y_n)$$

donde n es elevado y representa el número total de fallos del sistema. Entonces:

$$MTBF_{SYS} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^i X_n + \frac{1}{n} \sum_{n=1}^i Y_n = MTBF_X + MTBF_Y$$

Si Y tiene una probabilidad equivalente a p, de no comenzar a funcionar correctamente cuando X falla, entonces, es sólo en el 100 X (1-p) % de los casos que el tiempo de funcionamiento de Y se añadirá al de X.

Se deduce que:

$$MTBF_{SYS} = MTBF_X + (1 - p)MTBF_Y$$

A 3. REDUNDANCIA PASIVA, CON REPARACIÓN (Ecuación 15)

Pongamos que n sea el número de fallos de X durante un periodo de tiempo largo equivalente a $n \times (MTBF_X + MTTR_X)$.

El bloque Y tendrá que funcionar durante los tiempos de inactividad de X. El tiempo de inactividad total durante el periodo en cuestión será equivalente a $N_X = MTTR_X$, y habrá una media de un fallo de Y (y por lo tanto del sistema) cada $MTBF_Y$ horas (contadas según el tiempo de interrupción de X).

Entonces el número de fallos N_{SYS} del sistema S será muy cercano a:

$$N_{SYSApprox} = \frac{N_X(MTTR_X)}{MTBF_Y}$$

Por definición:

$$MTBF_{SYS} = \frac{N_X(MTBF_X + MTTR_X)}{N_{SYS}} \approx \frac{N_X(MTBF_X + MTTR_X)}{N_{SYSApprox}}$$

Por lo tanto, se deduce que si X y Y tienen las mismas características:



$$MTBF_{SYS} \approx \frac{MTBF_X^2}{MTTR_X} + MTBF_X$$

Si se supone que hay una probabilidad p que el bloque Y no arranque cuando se active, entonces la misma demostración que antes nos conduce a la siguiente fórmula:

$$N_{SYSApprox} = Np + \frac{N(1-p)MTTR_x}{MTBF_Y}$$

y

$$MTBF_{SYS} \approx \frac{N(MTBF_X + MTTR_X)}{N_{SYSApprox}} = \frac{MTBF_X + MTTR_X}{(p + (1-p)) \frac{MTTR_X}{MTBF_Y}}$$

A 4. REDUNDANCIA ACTIVA SIN REPARACIÓN (Ecuación 16)

Si $p = 0$, la prueba es bastante sencilla:

Siendo X e Y estadísticamente independientes, entonces $P(S \leq t) = P(X \leq t) \times P(Y \leq t)$

Si, además, X e Y son idénticos con una tasa de fallo constante, entonces:

$$P(S \leq t) = (1 - e^{-\lambda t})(1 - e^{-\lambda t}) = 1 - 2e^{-\lambda t} + e^{-2\lambda t}$$

Por consiguiente, la función de fiabilidad $R(t)$ es equivalente a:

$$R(t) = 2e^{-\lambda t} + e^{-2\lambda t}$$

y:

$$MTBF_{SYS} = \int_0^{\infty} (2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}) dt = \frac{2e^0}{\lambda} - \frac{e^0}{2\lambda} = \frac{3}{2} \times \frac{1}{\lambda}$$

Donde:

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

Es decir:

$$MTBF_{SYS} = \frac{3}{2} MTBF$$

Si $d \neq 0$, la prueba es más compleja y sólo se presenta a continuación para aquellos familiarizados con la teoría de la probabilidad.

Pongamos que FX y FY sean, respectivamente, los estados en que X e Y estén funcionando correctamente en t .

El suceso "el fallo de un elemento no provoca el de los otros" se denotará como FB .

$$\overline{FX}, \overline{FY} \text{ y } \overline{FB}$$

Supuesto que \overline{FX} , \overline{FY} y \overline{FB} sean los sucesos complementarios a FX , FY FB , respectivamente.

Entonces, por la aplicación del teorema de las "probabilidades totales", se deduce que la probabilidad $P(S \leq t)$ de un fallo del sistema que ocurra antes de t viene dado por:

$$P(S \leq t) = P(FB)P(\overline{FX} \cup \overline{FY}) + P(\overline{FB})P(\overline{FX} \cap \overline{FY})$$

$$P(\overline{FB})[P(\overline{FX}) + P(\overline{FY}) - P(\overline{FX})P(\overline{FY})] + P(FB)P(\overline{FX})P(\overline{FY})$$

$$P(\overline{FB}) = p \text{ y } P(FB) = (1 - p)$$

$$P(\overline{FX}) = (1 - e^{-\lambda t}) \text{ y } P(\overline{FY}) = (1 - e^{-\lambda t})$$



$$\int_0^{\infty} P(S \leq t) dt = MTBF_{SYS}$$

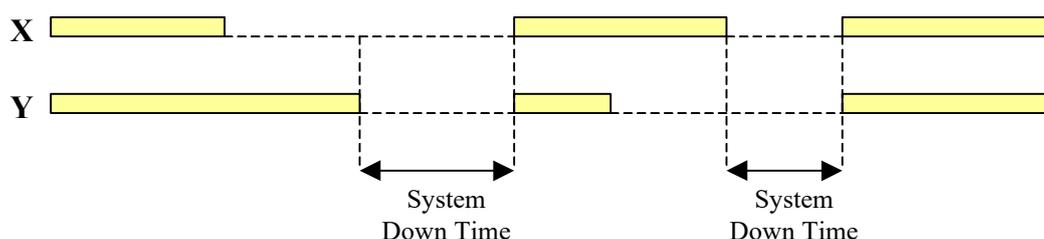
un cálculo sencillo muestra que:

$$(MTBF_{SYS} = \frac{3-2p}{2} MTBF_X)$$

Cabe señalar que el mismo método permitiría el cálculo del tiempo medio entre fallos del sistema $MTBF_{SYS}$, cuando los dos bloques no tengan la misma tasa de fallo.

A 5. REDUNDANCIA ACTIVA CON REPARACIÓN DE UN ELEMENTO QUE HA FALLADO (Ecuación 17)

Los tiempos de funcionamiento podrán representarse de la siguiente forma:



El cálculo de $IS = (1 - A_{SYS})$, donde A_{SYS} es la disponibilidad del sistema

$$IS = \frac{MTTR_X}{(MTBF_X + MTTR_X)} \times \frac{MTTR_Y}{(MTBF_Y + MTTR_Y)}$$

Como, por definición:

$$IS = \frac{MTTR_{SYS}}{(MTBF_{SYS} + MTTR_{SYS})}$$

al ver el diagrama de funcionamiento, puede apreciarse que el modelo para el cálculo del tiempo medio de reparación $MTTR_{SYS}$ es igual al de uno con bloques en serie, donde se sustituye el tiempo de reparación por el tiempo de funcionamiento y, viceversa, en donde se supone que un bloque continúa funcionando cuando el otro ha fallado.

Habiendo hecho eso, las hipótesis básicas no se mantienen, ya que el tiempo medio de reparación es mayor que el tiempo medio entre fallos (MTBF) y, entonces, no se puede aplicar la demostración ofrecida en el apartado 2.1.

Sin embargo, se puede demostrar que la siguiente fórmula sigue siendo válida

$$\frac{1}{MTTR_{SYS}} = \frac{1}{MTTR_X} + \frac{1}{MTTR_Y}$$

y entonces:

$$MTBF_{SYS} = \frac{1}{\left(\frac{1}{MTTR_X} + \frac{1}{MTTR_Y}\right)} \left[\frac{1-IS}{IS}\right]$$

Si X e Y son idénticos, entonces:

$$MTTR_{SYS} = \frac{MTTR_X}{2}$$

y

$$MTBF_{SYS} = \frac{MTTR_X}{2} \left[\left[1 + \frac{MTBF_X}{MTTR_X} \right]^2 - 1 \right]$$



Se puede generalizar la fórmula anterior al caso en que los bloques i estén en redundancia activa.

Si los bloques i son idénticos, las fórmulas serían:

$$MTTR_{SYS} = \frac{MTTR_X}{i}$$

y

$$MTBF_{SYS} = \frac{MTTR_X}{i} \left[\left[1 + \frac{MTBF_X}{MTTR_X} \right]^i - 1 \right]$$

Notas

- 1 Si se aplica en general una política más eficaz, entonces el sistema S entero ha fallado; la $MTTR_{SYS}$ anterior debe considerarse únicamente como una manera de calcular $MTBF_{SYS}$.
- 2 Según la hipótesis básica, se puede demostrar que la probabilidad de que el sistema S siga funcionando en tiempo t es cercana a $e^{-\frac{t}{MTBF_{SYS}}}$

A 6. RELACIÓN ENTRE EL MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y LA FIABILIDAD

Para aquellos familiarizados con la teoría de probabilidad, la prueba es sencilla:

Por definición:

$$P_0 = \int_0^t F(t) dt$$

Supuesto que P_0 sea la probabilidad de que los equipos fallarán tras haber sido sustituidos q veces, entonces:

$$P_q = P_0(1 - P_0)^q$$

Si se han cambiado q componentes tras haber estado funcionando correctamente durante T horas y el componente $Q + 1$ ha fallado antes de T horas de funcionamiento.

$$MTBF_0 = \frac{\int_0^T t f(t) dt}{\int_0^T f(t) dt}$$

y

$$\sum_0^{\infty} (iT + MTBF_0) P_i = MTBF_0 \sum_0^{\infty} P_i + T \sum_0^{\infty} iP_i$$

En esta expresión

$$\sum_0^{\infty} P_i = 1$$

y

$$\sum_0^{\infty} iP_i = P_0 \sum_0^{\infty} i(1 - P_0)^i = \frac{1 - P_0}{P_0}$$

Se deduce que:

$$MTBF = MTBF_0 + T \left[\frac{1 - P_0}{P_0} \right]$$

ANEXO B INFORME GRÁFICO TÍPICO DE UN PROGRAMA INFORMÁTICO SOBRE LA FIABILIDAD

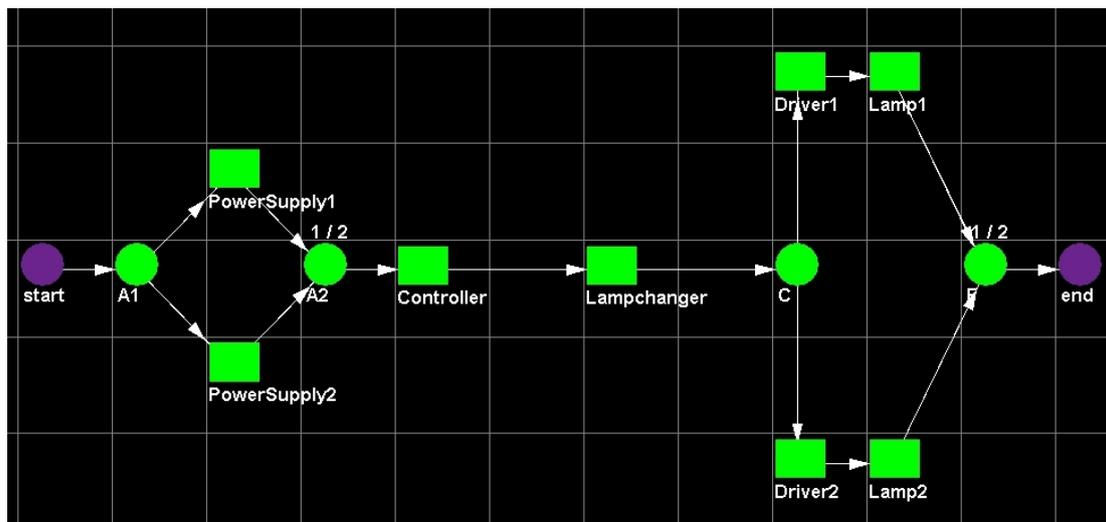


Figura 13 *Diagrama de bloques de la fiabilidad de una ayuda a la navegación típica*

Final Results

Results from 10 run(s):

PARAMETER	MEAN	MIN	MAX	ST DEV
Ao	0.993672081	0.984393892	1.000000000	0.005140701
MTBDE	>7796.353529	3281.312976	>10000.000000	n/a
MDT (7 runs)	52.828292	51.294133	54.931356	1.212934
MTBM	763.312332	555.555556	1236.442327	194.017785
MRT	19.426566	13.075631	31.228104	5.151837
% Green Time	96.928465	94.768458	98.375058	1.058740
% Yellow Time	2.438743	0.540328	4.175222	1.016958
% Red Time	0.632792	0.000000	1.560611	0.514070
System Failures	1.200000	0	3	0.979796

R(t=10000.000000) =0.300000

Figura 14 *Informe de fiabilidad tras una simulación*