

FIABILIDAD Y MANTENIBILIDAD EN LA INGENIERÍA NAVAL: ESTADO DEL ARTE Y NUEVO RETOS

Salvador Naya¹ y José Ángel Fraguela²

¹Area de Estadística e Investigación Operativa. Departamento de Matemáticas. Escuela Politécnica Superior. Universidad de A Coruña.
salvador.naya@udc.es.

²Departamento de Ingeniería Naval y Oceánica. Escuela Politécnica Superior. Universidad de A Coruña. jafraguela@udc.es.

RESUMEN

La fiabilidad (en muchas ocasiones llamada también confiabilidad), se suele definir como “la calidad a través del tiempo”. Una buena fiabilidad es, sin duda, una característica indispensable para tener la oportunidad de competir. Por lo tanto, un producto fiable es aquel que permanece con una buena calidad, lo que obliga a estar dentro de sus límites de especificación, durante su vida tecnológica. En el caso de la construcción naval la fiabilidad está presente en muchos aspectos de un buque, siendo mayor sus requerimientos en el caso especial de los submarinos. En este trabajo se propone una revisión sobre el uso de estas técnicas orientada a su aplicación en la construcción naval.

Palabras e frases clave: Fiabilidad, Mantenibilidad, tasa de fallo, ARM

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se produjo una revolución en el uso de métodos estadísticos para mejorar la calidad de productos y servicios, apareciendo nuevas filosofías como la metodología Seis Sigma, el modelo EFQM, el modelo TQM. Sin embargo no hubo una evolución de las técnicas de fiabilidad y mantenibilidad, y suelen aplicarse métodos clásicos aparecidos a mitad del siglo pasado. Hoy en día los ingenieros están convencidos de que una buena fiabilidad es una característica indispensable para tener la oportunidad de competir, siendo esta necesidad mayor en algunos casos, como en el de la construcción en los que es necesario un alto grado de eficacia y donde algunos fallos pueden resultar catastróficos.

Es resaltable que en el nuevo plan de estudios de ingeniería naval y oceánica, vigente en la Escuela Politécnica Superior de Ferro se puede cursar una materia específica sobre fiabilidad. También cabe resaltar, para destacar más si cabe el interés de estas técnicas en el sector naval, el hecho de que el último de los congresos que organiza la AEC (Asociación Española para la Calidad), se dedicase de forma monográfica a la fiabilidad en el sector naval, con interesantes ponencias que pueden verse en la propia web del congreso (www.aec.es).

Para el estudio de la fiabilidad y mantenimiento de los buques se emplean dos filosofías: el mantenimiento basado en tareas programadas y el mantenimiento orientado a la fiabilidad del sistema. En el caso de la ingeniería naval la fiabilidad está presente en muchos aspectos de un buque. Entre los que se puede destacar los estudios de fiabilidad sobre deformaciones en el casco de un buque (ver Lua y Hess (2006)), en problemas de corrosión del casco (ver Sun y Soares (2006)), problemas de fatiga de los materiales de construcción (ver Collette and Incecilk (2006)) o trabajos más generales sobre la fiabilidad en el control de calidad de embarcaciones deportivas (ver Ascaso, Naya, García, Carral (2003)).

Por otra parte, la Mantenibilidad es un concepto que hace referencia a la cantidad de esfuerzo requerida para conservar el funcionamiento normal o para restituirlo una vez se ha presentado un evento de fallo. En este contexto, se dirá que un sistema es "Altamente mantenible" cuando el esfuerzo asociado a la restitución sea bajo. Sistemas poco mantenibles o de "Baja mantenibilidad" requieren de grandes esfuerzos para sostenerse o restituirse.

La Mantenibilidad, por tanto, está inversamente relacionada con la duración y el esfuerzo requerido por las actividades de Mantenimiento. Puede ser asociada de manera inversa con el tiempo que se toma en lograr acometer las acciones de mantenimiento, en relación con la obtención del comportamiento deseable del sistema. Esto incluye la duración (horas) o el esfuerzo (horas-trabajador) invertidos en desarrollar todas las acciones necesarias para mantener el sistema o uno de sus componentes para restablecerlo o conservarlo en una condición específica. Depende de factores intrínsecos al sistema y de factores propios de la organización de Mantenimiento.

Entre los factores que influyen en el mantenimiento están, sin duda, el personal, su nivel de especialización, sus procedimientos y los recursos disponibles para la ejecución de las actividades (talleres, máquinas, equipos especializados, ...). Pero

además de estos factores, que son de tipo externo, existen también aquellos que se podrían denominar factores intrínsecos al sistema, como son el propio diseño del sistema o de los equipos que lo conforman. En este tipo de factores se puede afirmar que es el diseño quien determina los procedimientos de Mantenimiento y la duración de los tiempos de reparación.

CONCEPTOS BÁSICOS DE FIABILIDAD

El concepto central de la teoría de la fiabilidad es el estudio de la distribución del tiempo hasta la que tiene lugar un suceso puntual que, genéricamente, llamaremos fallo (en algún caso también se utiliza la expresión de falla). El tiempo hasta la que este se presenta se denomina tiempo de fallo.

Como las distintas unidades de un producto no fallan todas al mismo tiempo, llamando T al instante en el que falla una unidad, podemos considerar T como una variable aleatoria, y estudiar su distribución de probabilidad, con el que llegamos a la definición matemática de la fiabilidad como la probabilidad de que una unidad, escogida al azar, no haya fallado en un tiempo t . Así definida, la función de fiabilidad o supervivencia es una función decreciente de t , que denotaremos por $R(t)$. Además, si f y F son las funciones de densidad y de distribución de probabilidad de la variable aleatoria T , existe la siguiente relación:

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

Es decir, desde un punto de vista estadístico, la función de fiabilidad en un tiempo t representa la probabilidad de que un individuo (léase producto o sistema) experimente un fallo con posterioridad al tiempo t . También es habitual en este campo el uso de la función de riesgo o tasa de fallo:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{R'(t)}{R(t)} = -\frac{d \log R(t)}{dt}$$

La tasa o razón de fallo de un componente o sistema, permite estimar la proporción de unidades que fallan en un intervalo de tiempo $(t, t + dt)$, con respecto a las que siguen funcionando en un instante de tiempo t . Desde esta perspectiva, podría decirse que $h(t)dt$ es la aproximación de la probabilidad de que un individuo que no falló antes de un tiempo t lo haga en el siguiente período de tiempo dt .

Si por ejemplo, consideramos una variable de tipo exponencial (que sería una de las formas más simples de modelar la vida de un material) con densidad $f(t) = \lambda \exp(-\lambda t)$, la función de fiabilidad resultaría $R(t) = P(T \geq t) = \exp(-\lambda t)$ y su tasa de fallo sería:

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

En este caso la razón de fallo es constante y se dirá que esta variable carece de memoria, en el sentido de lo ocurrido hasta el instante de tiempo t no influye en lo que ocurra después.

La representación de la tasa de fallo frente al tiempo da lugar, en muchos casos, a una curva conocida como curva de la bañera. En esta curva aparecen una serie de fallos al principio del proceso conocidos como mortalidad infantil, que suelen ser debidos a los desajustes propios de productos con poco uso, luego aparecen fallos

que se distribuyen de forma aleatoria en el tiempo, rama constante de la curva, terminando con un incremento de fallos debido al desgaste o envejecimiento propio.

Cuando se hace un estudio cuantitativo, aparte de analizar las curvas de fiabilidad o supervivencia ($R(t)$), se suelen definir una serie de medidas características propias de esta materia como la vida media hasta el fallo (Mean Time To Failure, MTTF) o la media entre fallos (Mean Time Between Failures, MTBF). Un estudio cualitativo de la fiabilidad lleva a análisis modal de fallos y sus efectos (FMEA) o al análisis por árboles de fallos (FTA).

Existen métodos, tanto paramétricos como no paramétricos, que permiten estimar estos valores en función de las observaciones de los fallos de muestras de los productos analizados. Además, también se cuenta con guías de referencia para tasas de errores dependiendo del producto estudiado. Por ejemplo, una de estas guías es la elaborada por el Pentágono americano conocida como MIL-HDBK-217F o la MIL-STD-785 que indica los requisitos que deben cumplir los sistemas de fiabilidad.

CARACTERÍSTICAS DE LOS DATOS Y MODELOS USADOS EN FIABILIDAD

Cuando se examinan datos en trabajos de control de calidad, es habitual que si se inspecciona una muestra de 100 artículos, se obtienen 100 observaciones, estos datos desde el punto de vista estadístico se denominan datos completos. En el contexto de pruebas de fiabilidad, cuando se estudia una muestra de tamaño 100 es raro que se obtengan 100 observaciones completas, debido a que algunos de los artículos de la muestra pueden no fallar dentro de un período razonable de tiempo o la prueba puede detenerse antes de que fallen todas las unidades. Bajo estas circunstancias o cuando se desea un análisis en una etapa intermedia antes de que finalice la prueba, el resultado será de datos incompletos o de datos censurados.

Un dato está censurado cuando sólo se dispone de una cuota para el tiempo de fallo. Si esa cuota es inferior tendremos un problema de censura por la izquierda, si la cuota fuera superior, que es el tipo más frecuente, hablaremos de censura por la derecha. Cualquier estudio de fiabilidad debe tener presente como fueron obtenidos los datos, ya que cuando tenemos un dato censurado, el tiempo observado no corresponde a un tiempo de fallo; pero la información parcial proporcionada por esa observación de tiempo de censura, no debe ser rechazada para la obtención de modelos sobre el comportamiento de la variable. La elección de un determinado modelo es función de su flexibilidad para reproducir las características de las funciones de fiabilidad o de riesgo, y podrá abordarse desde dos perspectivas: la paramétrica y la no paramétrica.

Además, cabe resaltar que en los estudios de fiabilidad aparecen variables respuesta que son intrínsecamente no negativas: tiempos de fallo, niveles de degradación, resistencia de materiales, número de eventos (fallos) en un período de tiempo, etc. Por ello es común el uso de distribuciones de probabilidad como la exponencial, la lognormal, la Weibull, la de valores extremos, la Gamma, o la Poisson (ésta última para el número de fallos). Asimismo, es recomendable (aunque no muy habitual) usar análisis exploratorios de datos y estimaciones no paramétricas. El artículo de Lawless (2000) contiene una breve revisión sobre las técnicas estadísticas utilizadas en fiabilidad, así como los nuevos retos y líneas de

investigación en este campo. Entre estos retos destacan los ensayos acelerados para modelos físicos de degradación y fallo (ver Nelson (1990)), los modelos de riesgo en competencia (ver Crowder (2001)). En el caso concreto del sector naval, el campo de los sistemas complejos tiene una considerable importancia (ver, por ejemplo, Dumitrescu (2006)).

En el caso de la estimación paramétrica, el problema consiste en suponer que la función puede modelarse por una distribución concreta, que depende de un número finito de parámetros que será necesario estimar a partir de muestras de datos reales o simulados. Debido a que los valores observados en este tipo de problemas son positivos, la modelización usualmente supone una distribución de tipo no normal. Así, es común el empleo de distribuciones como la exponencial, la lognormal, la Weibull o la logística. Existen también modelos paramétricos específicos, como la relación de Arrhenius, que permiten modelar procesos en donde la duración de un material depende de la temperatura, que son usados en problemas de pruebas aceleradas.

La otra filosofía en la estimación de los modelos de riesgo, la estimación no paramétrica, no presupone ningún modelo a priori para la distribución, consiste en dejar que los datos decidan por sí mismos. En este contexto no paramétrico, los estimadores de Kaplan Meier (Kaplan e Meier 1985) para la razón de fallo, y el estimador de Nelson-Aalen (Nelson (1972) y Aalen (1978)) para la función de riesgo acumulado son los más utilizados, presentando muchas de las propiedades deseables desde el punto de vista estadístico. Para un estudio con detalle de esta temática el manual de Meeker y Escobar (Meeker y Escobar, 1998) representa un magnífico referente presentando no sólo los conceptos teóricos sino también una amplísima colección de aplicaciones a datos y problema reales de fiabilidad industrial en la que los autores tienen una contrastada experiencia. Para la manipulación de estos datos existen también distintos programas estadísticos que permiten el tratamiento de datos de fiabilidad, pero es sobre todo el paquete estadístico SPLIDA (SPlus Life Data Analysis) el que cuenta con más adeptos. SPLIDA es un conjunto de funciones de S-PLUS con una interface gráfica diseñada para el análisis de datos de fiabilidad. Muchas de estas funciones están también disponibles para el programa de Software libre R, que se puede descargar desde la dirección <http://cran.es.R-project.org/>.

FIABILIDAD DE SISTEMAS. MODELO ARM.

Existen dos áreas distintas en fiabilidad de sistemas: los sistemas reparables y los de componentes o unidades reemplazables. En general, el análisis y la modelización de datos de estas dos áreas requieren de diferentes supuestos acerca de los datos y de diferentes métodos de muestreo para obtenerlos.

En cualquier caso un sistema será aquel compuesto por un conjunto de dispositivos estructurados según una determinada configuración. Normalmente los sistemas complejos con los que cuentan los buques requieren de varias componentes en serie y en paralelo, la estimación de la fiabilidad conjunta de estos sistemas será la tarea esencial para estudiar el ciclo de vida.

Entre las alternativas actuales para su estudio de estos sistemas complejos, está la simulación de los modelos mediante el uso de técnicas de Montecarlo, el empleo de

técnicas de apoyo logístico integrado (ALI), o el uso de la denominada metodología RCM asociada al estudio de la criticidad de los modos de fallo y su probabilidad de ocurrencia para estimar el riesgo. Estas acciones permitirán estimar la fiabilidad del sistema a partir del estudio de los árboles de los elementos que lo configuran.

Otra filosofía del estudio en la fiabilidad de sistemas es la llamada ARM (Availability, Reliability y Maintainability). Esta filosofía que engloba la disponibilidad, la fiabilidad y la mantenibilidad, busca mejorar el rendimiento del sistema al tiempo que reduce el alto costo del mantenimiento no programado, eliminar la pérdida de ingresos causada por mantenimiento no programado, y escapar de una cultura de mantenimiento reactivo. Para la aplicación de la técnica ARM será preciso conocer con detalle los diagramas de los sistemas de fiabilidad y su criticidad. Es esta técnica, sin duda, una solución integral que es de esperar sea empleada para llevar el mantenimiento preventivo de los sistemas del buque.

CONCLUSIONES

Como conclusión a lo anteriormente expuesto podría resaltarse que la fiabilidad y mantenibilidad en el sector naval son técnicas que están aún empezando a emplearse de forma habitual en problemas de ingeniería, por lo que como rama emergente presenta interesantes retos futuros. Uno de estos retos está relacionado con el concepto de ingeniería robusta. La robustez estadística puede definirse como la habilidad (de un producto o proceso) para realizar su función, de forma efectiva, bajo una variedad de condiciones operativas y ambientales (incluyendo desgaste o degradación a largo plazo). En este sentido el reto estaría en diseñar un producto que sea robusto a los ruidos ambientales.

La aplicación de métodos de nueva aparición en el campo de la fiabilidad y mantenibilidad, como es el caso de modelos de tipo no paramétrico, la simulación de sistemas complejos, o las técnicas ARM que relacionen la mantenibilidad y la fiabilidad de sus componentes, serán una de las líneas que, de seguro, más pronto que tarde, irán incorporándose en estos estudios. Por lo que se podría concluir, que dado que los problemas de fiabilidad generan interesantes y complejos retos para ser investigados, divulgados e implantados, parece claro que estas técnicas continuarán creciendo y evolucionando para conseguir productos más fiables en el campo de la ingeniería naval.

REFERENCIAS

1. Ascaso, A. G., Naya, S., García, A. y Carral, L. (2003). La fiabilidad en el Control de calidad de embarcaciones deportivas. *Revista de Ingeniería Naval*, 89-93.
2. Collette, M. y Incecilk, A. (2006). An approach for reliability-based fatigue design of welded joints on aluminum high-speed vessels. *Journal of Ship Research*, 50, 85-98.
3. Crowder, M. (2001). *Classical Competing Risks*. Chapman & Hall, New York.
4. Dumitrescu, M. (2006). Electric ship power system complex simulation and reliability analysis. 1st International Conference on Electrical and Control Technologies. *Electrical and Control Technologies, Proceedings*, 13-16.
5. Kaplan, E. L. and Meier, P. (1958). Nonparametric estimation from incomplete observations. *Journal of the American Statistical Association*, 53, 457-481.
6. Lawless, J. (2000). Statistics in Reliability. *Journal of the American Statistical Association*, 95, 989-992.

7. Lua, J. y Hess, P.E. (2006). First-failure-based reliability assessment and sensitivity analysis of a naval vessel under hogging. *Journal of Ship Research*, 50, 158-170.
8. Meeker, W. and Escobar, L. (1998). *Statistical Methods for Reliability Data*. John Wiley & Sons, New York.
9. Nelson, W. (1990). *Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses*. John Wiley & Sons, New York.
10. Nelson, W. (2003). *Recurrent Events Data Analysis for Product Repairs, Disease Recurrences, and Other Applications*. ASA-SIAM Series on Statistics and Applied Probability.
11. Petinov, S.V. (2000). Life-cycle fatigue reliability of ship structures: A proposed system. *Journal of Ship Research*, 44, 33-39.
12. Sun, H.H. y Soares, C.G. (2006). Reliability-based inspection of corroded ship-type FPSO hulls. ,50, 171-180.