



Jorge Acuña, Phd

Doctor en Ingeniería Industrial de la Universidad de Purdue en Indiana, Estados Unidos. Master en Ingeniería Industrial de la Universidad de Nebraska en Lincoln, Nebraska, Estados Unidos. Ingeniero en Producción Industrial del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Profesor Catedrático pensionado de la Escuela de Ingeniería de Producción del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Director y profesor del Programa de Maestría en Sistemas Modernos de Manufactura del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Autor de los libros Control de Calidad, Fórmulas y Tablas Estadísticas, Ingeniería de la Confiabilidad y Mejoramiento de la Calidad en Servicios. Autor de numerosos artículos en diversas áreas de la ingeniería industrial. Profesor de la Maestría de Ingeniería Industrial de Universidad de Costa Rica. Vicerrector de Calidad y Desarrollo Académico de la Universidad Hispanoamericana.

Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) usando estimaciones experimentales

Este artículo presenta los conceptos básicos de mantenimiento centrado en confiabilidad cuando esta es estimada experimentalmente sobre la base de datos de tiempos de falla de equipos y maquinaria. El mantenimiento centrado en confiabilidad utiliza datos históricos de falla para tomar decisiones sobre una base científica y no solamente basadas en intuición o en experiencia. Los datos provienen de un estudio estadístico que refleja el comportamiento histórico de las fallas del equipo en estudio y se usan como un medio para identificar patrones de comportamiento que pueden ayudar a predecir mejor la ocurrencia futura de eventos de falla. Con el conocimiento de esos patrones se pueden establecer planes de acción para atacar esas fallas antes de que ocurran.

Esta práctica también es un medio de disminuir los costos asociados a las operaciones de reparación y de hacer más efectiva la gestión administrativa del mantenimiento sobre la base de un mantenimiento más proactivo.

Palabras clave:

El mantenimiento centrado en confiabilidad, estimación experimental, falla, papel exponencial.

Introducción

El mantenimiento es el medio de conservar en funcionamiento equipos y maquinaria sin que los paros frecuentes o periódicos, debido a fallas, afecten la productividad del sistema de manera integral. Además, el mantenimiento tiene un aporte importante pues la calidad de las condiciones de funcionamiento y disponibilidad de equipos, y, máquinas es un medio de lograr los niveles de producción y calidad requeridos.

El mantenimiento es una operación mediante la cual los sistemas son sometidos a rutinas de revisión, reparación y reemplazo con el fin de repararlos o sustituirlos cuando fallan o prevenir fallas cambiando partes o lubricando los mecanismos de acción. Las operaciones de mantenimiento se dirigen esencialmente a sistemas reparables, sea aquellos susceptibles de ser reparados cuando fallan. En los sistemas no reparables los equipos o sus repuestos simplemente se sustituyen por otros nuevos una vez que fallan.

La vida útil de repuestos y mecanismos puede ser prolongada si se aplican rutinas de mantenimiento con un enfoque correctivo, preventivo, predictivo o basado en confiabilidad. El mantenimiento correctivo es la acción mediante la cual se retorna un equipo o maquinaria que ha fallado a su posición de operación o estado de disponible con la meta de maximizar la eficacia, la eficiencia, la efectividad y la productividad de los activos. El mantenimiento preventivo es el medio que busca mantener el equipo o maquinaria en operación o en estado de disponible por medio de acciones que anticipen las fallas. Las labores que se ejecutan incluyen entre otras cosas limpieza, lubricación, e inspección de partes críticas y su reposición si es necesario (Acuña, 2003). El mantenimiento predictivo consiste esencialmente de un programa periódico de monitoreo del sistema o maquinaria utilizando instrumentación especial con el fin de evaluar sus condiciones de operación idóneas y diagnosticar potenciales problemas (García Garrido, 2010). El mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) es un proceso sistemático que se usa para determinar lo que debe hacerse para asegurar que un elemento físico continúe desempeñando las funciones deseadas en su contexto operacional presente, con base en el estudio científico de las fallas (Dhillon, 2007).

Concepto de confiabilidad

La confiabilidad denotada por $R(t)$, por ser una función del tiempo, es la probabilidad de que un equipo o máquina se desempeñe satisfactoriamente cumpliendo con su función durante un período dado y bajo condiciones previamente especificadas (Acuña, 2003). Se indica que es en un tiempo dado con lo que se afirma que el valor que se determina no es para siempre y que es por ello que la garantía es limitada. Se dice que es bajo condiciones fijadas con lo que es claro que se debe cumplir con las normas de uso y de funcionamiento que han sido establecidas por el diseñador.

El complemento de la confiabilidad es la función acumulada de la falla, entendiéndose falla como el momento en que un equipo o maquinaria termina su función u operación debido a un cambio paulatino o abrupto de su funcionamiento. La función de falla se denota matemáticamente como $f(t)$. Un término directamente asociado a la confiabilidad es el tiempo medio entre fallas (MTBF) que es el tiempo medio entre fallas sucesivas de un producto reparable.

Según Pérez, 2003, en un estudio realizado por la industria aeronáutica en los Estados Unidos se estudió el patrón de falla seguido por algunos sistemas. Se determinó que el 4% de los sistemas siguen una conducta de curva de la bañera, el 2% de los sistemas siguen un patrón de inicio constante con un fin en zona de desgaste, el 5% de los sistemas presenta una probabilidad de falla incremental con la edad y con el desgaste que no es claramente definida, el 7% de los sistemas tienen un patrón de falla que tiene una probabilidad de falla baja cuando está nuevo y luego constante, el 14% de los sistemas siguen un patrón de falla constante y el 68% de los sistemas tienen un comportamiento que presenta fallas tempranas y luego una conducta de falla constante.

La identificación del patrón de falla que sigue un equipo o repuesto es esencial para trazar el plan de mantenimiento basado en confiabilidad. Si se identifica el patrón se pueden establecer políticas para lograr un mantenimiento efectivo.

La confiabilidad puede ser cuantificada matemáticamente (Dhillon, 2007), para lo que se definen los siguientes conceptos:

Sea $R(t_0) = P(t > t_0)$ = Probabilidad de que un sistema (producto o máquina) opere sin falla por un período de tiempo t_0 .

Si $F(t_0) = P(t \leq t_0)$ entonces: $R(t_0) = 1 - F(t_0)$

También puede ser definida estadísticamente por medio de datos históricos de tiempos de falla de los equipos. De esta forma, se aplican pruebas de bondad de ajuste para determinar si los tiempos siguen el patrón de una distribución de probabilidad conocida tal como: normal, weibull, exponencial, lognormal, gamma, etc. (Acuña, 2003).

Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM)

La aplicación de este tipo de mantenimiento se caracteriza por un aumento importante en el nivel de mecanización y automatización con equipos cuyas fallas son más difíciles de atacar y de resolver en el corto tiempo pero que son capaces de guardar información valiosa sobre las causas de falla. Se desea tener una mayor necesidad de lograr altas disponibilidades de maquinaria y equipo pues el costo de los paros es cada día más alto.

Según Pérez, 2003, para el desarrollo de un adecuado sistema de mantenimiento basado en confiabilidad se deben contestar siete preguntas básicas para cada elemento físico basadas en las funciones y estándares de funcionamiento, la forma de falla, la causa de falla, el momento en que sucede la falla, los efectos de la falla, las formas de prevención y los efectos si la falla no puede prevenirse.

Lo esencial en el mantenimiento centrado en confiabilidad es la determinación de las causas de falla y para ello se identifican los modos de falla como medio de establecer el plan de prevención y se buscan las causas raíz u origen sin malgastar el tiempo en síntomas o efectos. Se estudia a fondo el deterioro o desgaste de componentes y los problemas de diseño del equipo o de los procesos donde estos están inmersos. Se identifican posibles errores humanos debidos a falta de entrenamiento.

Tradicionalmente el mantenimiento se ha llevado a cabo por intuición o por experiencia, pues no se analizan datos; en otras palabras se actúa más empíricamente que científicamente. En algunos casos se analizan datos de manera puntual, lo cual sabemos que desde el punto de vista estadístico predice poco sobre eventuales situaciones adversas y no permite observar tendencias o patrones extraños. La intención es cambiar esta práctica de manera

que el mantenimiento se pueda cuantificar a través del tiempo medio de reparación y de la función de falla que es la representación matemática del comportamiento de una falla en el tiempo.

Estimación experimental de la confiabilidad

En la estimación estadística de la confiabilidad el uso de la distribución de probabilidad más apropiada facilita el cálculo; sin embargo, la pregunta a realizar es de donde provienen los parámetros de la distribución. Bueno la respuesta es a través de la estimación experimental en la que se obtienen datos de tiempos falla y por métodos gráficos o analíticos se determinan los parámetros. Los métodos analíticos usan el mismo procedimiento de la estadística descriptiva para determinar los valores deseados para lo que se deben determinar muestras de tamaño adecuado.

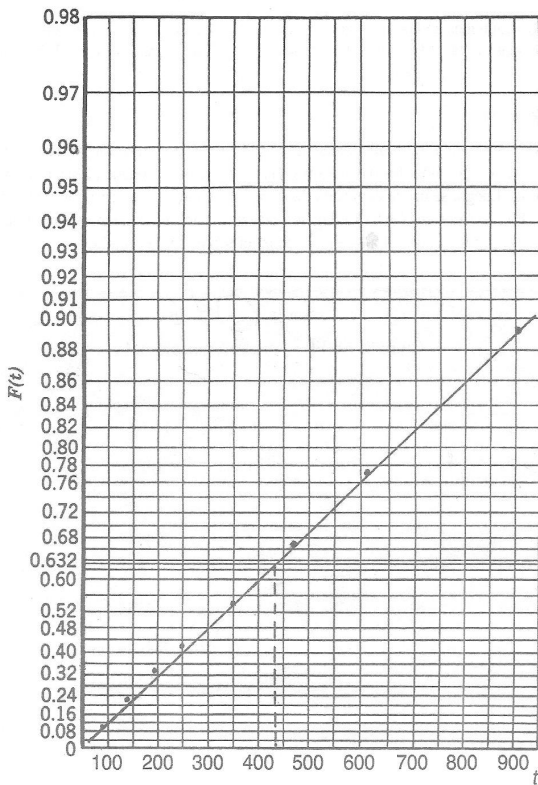
Los métodos gráficos se basan en la graficación de los datos en un papel perteneciente a una distribución conocida (normal, exponencial, lognormal o weibull). Si al graficar los datos de tiempos de falla éstos se distribuyen en línea aproximadamente recta sobre el papel usado, se concluye que estos datos se distribuyen según la distribución a la que pertenece el papel usado para construir el gráfico (Acuña, 2003).

En su aplicación se usa el siguiente procedimiento: (Acuña, 2003)

1. Recolectar la información de tiempos de falla en datos no agrupados para las N unidades seleccionadas para la prueba.
2. Calcular la función acumulada $F(t_i) = i/(N+1)$
3. Graficar en todos los papeles iniciando con exponencial (ver Figura 3). Si no hay tendencia se dice que la razón de falla es constante, lo cual es una característica de la distribución exponencial. Si hay tendencia se debe graficar en los otros papeles hasta lograr el mejor ajuste a una línea recta.
4. Determinar los parámetros de la distribución de mejor ajuste a una línea recta.

Figura 1. Papel exponencial

Para el caso de la distribución exponencial, se grafican los datos en el papel exponencial y se determina el valor de $1/l$ en el eje x para un valor de $F(t_i) = 0.632$ valor que se obtiene así:



$R(t) = e^{-\lambda t}$
 $\ln R = -\lambda t$
 $\ln(1/R) = \lambda t$
 $\ln(1/(1-F)) = \lambda t$
 Si $\lambda t=1$, entonces $1-F=e^{-1}$
 de donde $F=0.632$

Ejemplo (Acuña, 2003)

Los siguientes tiempos pertenecen a tiempos de falla en horas de ocho circuitos de control: 90, 144, 198, 250, 340, 460, 610 y 900. ¿Cuál es la confiabilidad a las 200 horas de operación?

Solución:

El Cuadro 1 muestra los cálculos de $F(t_i)$ basados en $N=8$. La Figura 2 muestra el gráfico correspondiente en el que se puede ver que el ajuste de línea recta parece ser adecuado, por lo que se concluye que los datos siguen la conducta de una distribución exponencial. Para determinar la confiabilidad a las 200 horas de operación se requiere primero determinar los parámetros de la distribución exponencial, sea el valor de λ . Luego, se usa la expresión matemática de $R(t)$.

Cuadro 1. Valores de $F(t_i)$

i	1	2	3	4	5	6	7	8
t_i	90	144	198	250	340	460	610	900
$F(t_i)$	0.111	0.222	0.333	0.444	0.555	0.666	0.777	0.888

Dado que $1/\lambda$ es aproximadamente igual a 430 horas, según la Figura 2 para $F=0.632$, entonces, la confiabilidad en $t=200$ es 0.628 obtenida de la siguiente expresión:

Figura 2. Gráfico de distribución exponencial

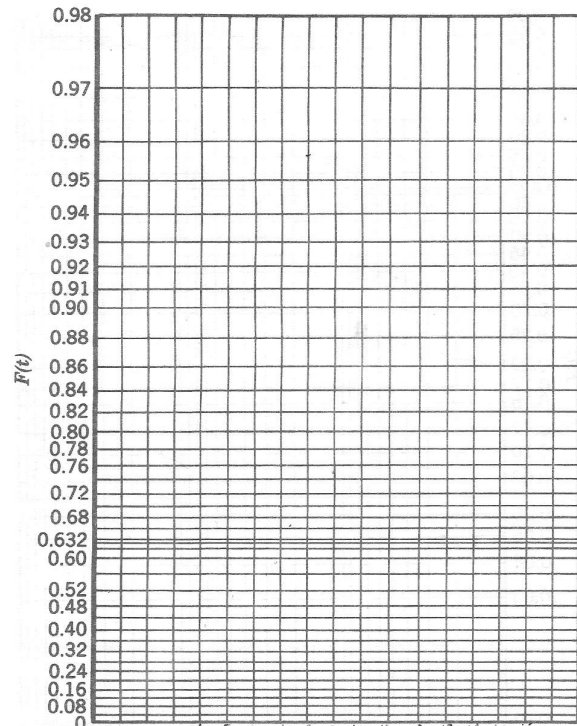
La respuesta es que a las 200 horas de operación solamente el 62.8% de los circuitos seguirán operando, sea el 37,2% ya han fallado. Este dato es muy importante para planificar el mantenimiento de estos circuitos.

Si al realizar el análisis de los datos se presenta una curvatura en su comportamiento se procede a graficarlos en un papel normal. Si en ese papel el comportamiento se asemeja a una línea recta, la distribución a ajustar es la distribución normal. Así, se deben estimar μ y σ . El valor de μ se obtiene del gráfico para $F(t_i)=0.5$, como es lógico dada la simetría de esta distribución. El valor de σ se obtiene restando al valor de $F(t_i)=0.84$ (valor de $\mu + 1\sigma$) el valor de $F(t_i)=0.5$ (Acuña, 2003).

La estimación de confiabilidad se realiza así:

$R(t) = 1 - F(t)$ donde $F(t) = N((t - \mu)/\sigma)$

$R(200) = e^{-\frac{1}{430} * 200} = 0.628$



Si en ese papel aún hay curvatura se continúa con weibull y se determinan los parámetros de esa distribución si ya no la hay. Si aún existe se continúa con otra distribución hasta que se encuentre una conducta de línea recta en los puntos graficados (Acuña, 2003).

Conclusiones

La aplicación de la estadística a los negocios es cada vez más amplia y en este artículo se logra demostrar la importancia de que las decisiones de mantenimiento se puedan tomar sobre la base de datos científicos, que combinados con experiencia van a llevar a decisiones más certeras.

El empleo de los conceptos de confiabilidad a las operaciones de mantenimiento de equipo y maquinaria es un medio de hacer que la gestión del mantenimiento sea más efectiva y se pueda convencer a la dirección de que el trabajo que se realiza es serio y se basa en el análisis detallado de datos y no en simple intuición.

Es importante que cada día más los profesionales dedicados al mantenimiento ahonden más en estos conocimientos para que su gestión sea realmente efectiva y los costos asociados tiendan a cifras que sean manejables para las empresas e instituciones. Se debe recordar que no es posible mejorar aquello que no ha podido cuantificar.

Referencias bibliográficas

- Acuña, J. (2003). *Ingeniería de Confiabilidad (Primera ed.)*. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- DeVore, J. (2008). *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias*. México: International Thomson Editores.
- Dhillon, B. (2007). *Quality Control, Reliability, and Engineering Design*. New York: Marcel Dekker INC.
- García, S. (2010, 12 de junio). Plan de mantenimiento basado en RCM. Obtenido de <http://mantenimientoindustrial.wikispaces.com>.
- Lewis, E. (1995). *Introduction to Reliability Engineering*. New York: John Wiley and Sons.
- Pérez, C. (2003, 7 de agosto). Mantenimiento centrado en confiabilidad: Aplicación e impacto. Obtenido de <http://www.noria.com/sp/cmcm/2k3/carlosm.pdf>.
- Pyzdek, T., & Berger, R. (2003). *Quality Engineering Handbook*. New York: Marcel Dekker INC.