

INTEGRACION DE MODELOS CUANTITATIVOS DE MANTENIMIENTO DENTRO DEL METODO RCM.

Adolfo CRESPO MARQUEZ

Grupo de I+DT “Organización Industrial”, ESI Sevilla, adolfo.crespo@esi.us.es

Antonio SANCHEZ HERGUEDAS(2)

Pedro MOREU DE LEON(1)

José Manuel FRAMIÑAN TORRES(1)

José Miguel LEÓN BLANCO(1)

(2) Director Técnico de Qualmaint, S.L y Estudiante de Doctorado en la ESI de Sevilla, asherdas@iies.es

(1) Grupo de I+DT “Organización Industrial”, ESI Sevilla, pedro@taylor.us.es

Resumen

Este artículo presenta distintas posibilidades para la aplicación de técnicas de investigación operativa dentro del campo del mantenimiento industrial. Más concretamente, centra su atención en como este conjunto de técnicas pueden integrarse en el proceso de planificación de las actividades de mantenimiento que lleva a cabo el RCM (Reliability Centered Maintenance – Mantenimiento Basado en la Fiabilidad).

La amplia implantación que existe en la actualidad, y en las empresas industriales de distinto tamaño, de sistemas de gestión de mantenimiento asistidos por ordenador (GMAO), hace que sea posible la aplicación de técnicas cuantitativas de manera casi automática en estas empresas, y de forma coordinada con el método RCM.

En el artículo se describe en primer lugar el proceso de planificación de las actividades de mantenimiento conforme al método RCM. Se analizan con detalle los pasos que componen el citado proceso, y se discute más tarde la posible utilización de técnicas de investigación operativa en cada uno de ellos.

El resultado es un enfoque más científico para la evaluación de las posibles estrategias de mantenimiento que pueden ser aplicadas para gestionar modos de fallo críticos de equipos críticos de una instalación industrial, conforme al método RCM.

Palabras Clave: Mantenimiento, Optimización, Modelos Probabilísticos, Fiabilidad.

INTRODUCCIÓN

Los distintos modelos globales de gestión del mantenimiento surgen como consecuencia de la necesaria organización de las distintas actividades que componen esta función. La optimización de estas actividades requieren de métodos y estudios cuyos objetivos sean la mejora continua de la fiabilidad, mantenibilidad y logística de mantenimiento. Esa optimización absoluta y duradera del mantenimiento de cualquier sistema en funcionamiento no es posible; el óptimo nunca se logra porque es un blanco móvil y porque los datos para su estimación nunca están bastante completos o actualizados y raramente son suficientes en número. Sin embargo, seguro que mediante la persecución activa se mantendrá más cercano este blanco móvil que la actitud pasiva referente al consejo de OEM (Original Equipment Manufacturer, Fabricante) o a los cálculos iniciales, y que los gastos de la persecución, incluyendo la recogida de los datos adecuados, “valen la pena”, particularmente en base al beneficio del ciclo de vida (LCP)

y quizás para varias generaciones de la planta (Sherwin, 2000). En la figura 1 se expone un gráfico de los distintos modelos globales de mantenimiento y su evolución en el tiempo.

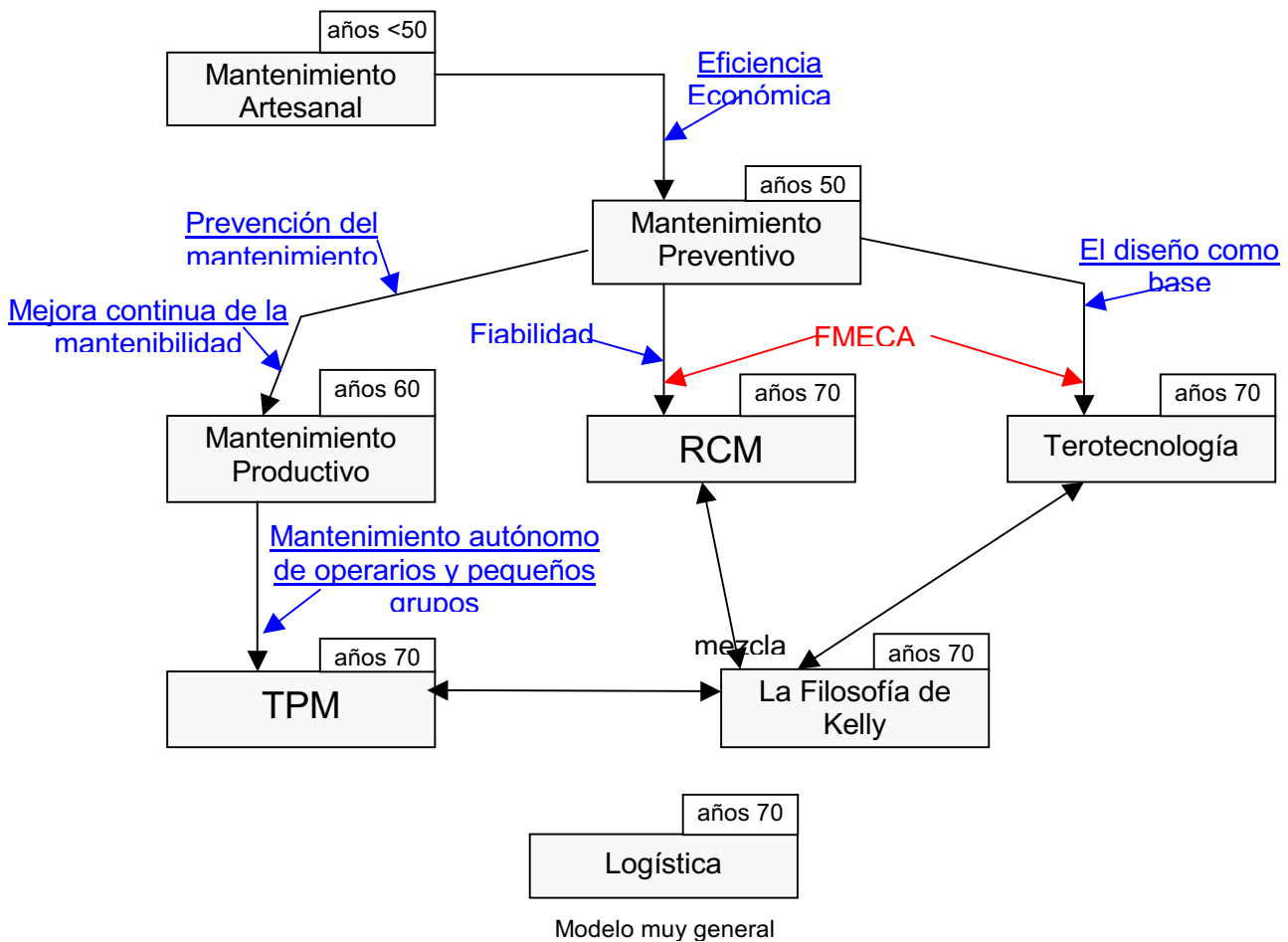


Figura 1. Modelos globales de Mantenimiento

RCM (Reliability Centered Maintenance)

Al igual que el TPM, el RCM no es una política de mantenimiento, sino un conjunto de comportamientos organizativos, reglas, métodos y procedimientos para la gestión económica del mantenimiento (Furlanetto, 1991) basado en técnicas de fiabilidad y acompañado de métodos de análisis como FMECA.

Según Moubray (1991), a través del RCM es normal llegar a situaciones de:

- Disminución del mantenimiento cíclico de 50 al 70%.
- Reducción del consumo de repuestos hasta el 50%.
- Mejora de las relaciones entre mantenimiento y producción.
- Eliminación total de las sustituciones programadas.
- Sensible disminución de trabajos que requieren especialización.

El RCM pretende ser un procedimiento para descubrir qué mantenimiento es requerido por un recurso en su contexto operativo, en particular que se debe hacer para asegurar la continuidad de las funciones de diseño del sistema. Kelly (1984), también

define el mantenimiento con el objetivo de sostener la fiabilidad de funciones. Sin embargo no debe ser el único objetivo, y ese mantenimiento es principalmente un problema económico en lugar de solamente un problema de fiabilidad.

EL RCM proviene de la industria aeronáutica, y más particularmente de las aerolíneas civiles. Los aviones de transporte generalmente tienen equipos y sistemas del control redundante y sus estructuras se diseñan para tolerar ciertos daños sin peligro. Los operadores se dieron cuenta en los años cincuenta que aumentando la frecuencia de reparaciones generales a motores y otros equipos no aumentaba la fiabilidad a menos que hubiese un modo de fallo dominante. Esto no tiene sentido desde un punto de vista tecnológico y surge desde conceptos erróneos sobre la curva de la tasa de fallos (curva de la bañera). Moubray (1991), por ejemplo, da a entender varias veces que el sistema o curva de bañera de máquina es inherente a la política de mantenimiento pues es obviamente formada bajo su dominio y por lo tanto, no debería usarse para elegir políticas. Pero la popularidad de RCM probablemente radica principalmente en el no requerir cualquier entrada significativa o inversión procedente de la alta dirección. De hecho dicen sus defensores que las reducciones serán esperadas en el presupuesto de mantenimiento. El RCM trata de actuar con la fiabilidad y el mantenimiento aisladamente de los costes y ganancias. Contiene muchas ideas buenas, la mayoría también aparecen en otros métodos como FMECA, pero también algunos conceptos erróneos como el enigma de Resnikoff (Resnikoff, 1978), la mayoría de ellos son únicos del RCM, la notable excepción es la curva de la bañera interpretada equivocadamente y que desgraciadamente es demasiado común en modelos matemáticos difíciles y en los análisis simplistas de necesidades de mantenimiento.

EQUIPOS Y COMPONENTES CRÍTICOS

En el RCM, del conjunto de equipos y componentes a mantener se estudian con prioridad aquellos llamados críticos. Esta definición obedece a la importancia de sus fallos en el sistema completo. Los equipos y componentes críticos requieren un análisis de los modos de fallos y sus efectos para esclarecer la política más apropiada que garantice la disponibilidad o fiabilidad al mínimo coste. En la medida de lo posible, se intentará controlar las condiciones de funcionamiento del equipo, monitorizando aquellos parámetros de interés para su mantenimiento preventivo (Crespo y Sánchez, 1995). Los aspectos a considerar en esta fase de selección de equipos, por orden de prioridad podrían ser: la seguridad de la persona en caso de fallo, los fallos provocados en el entorno, las prescripciones legislativas en materia de control periódico y de verificación, la disponibilidad requerida al bien por el plan de producción, la existencia de equipos de reserva, etc.

POLÍTICA DE MANTENIMIENTO

La figura 2, ilustra los pasos a seguir a la hora de formular la política de mantenimiento para mejorar el comportamiento de un modo de fallo en particular.

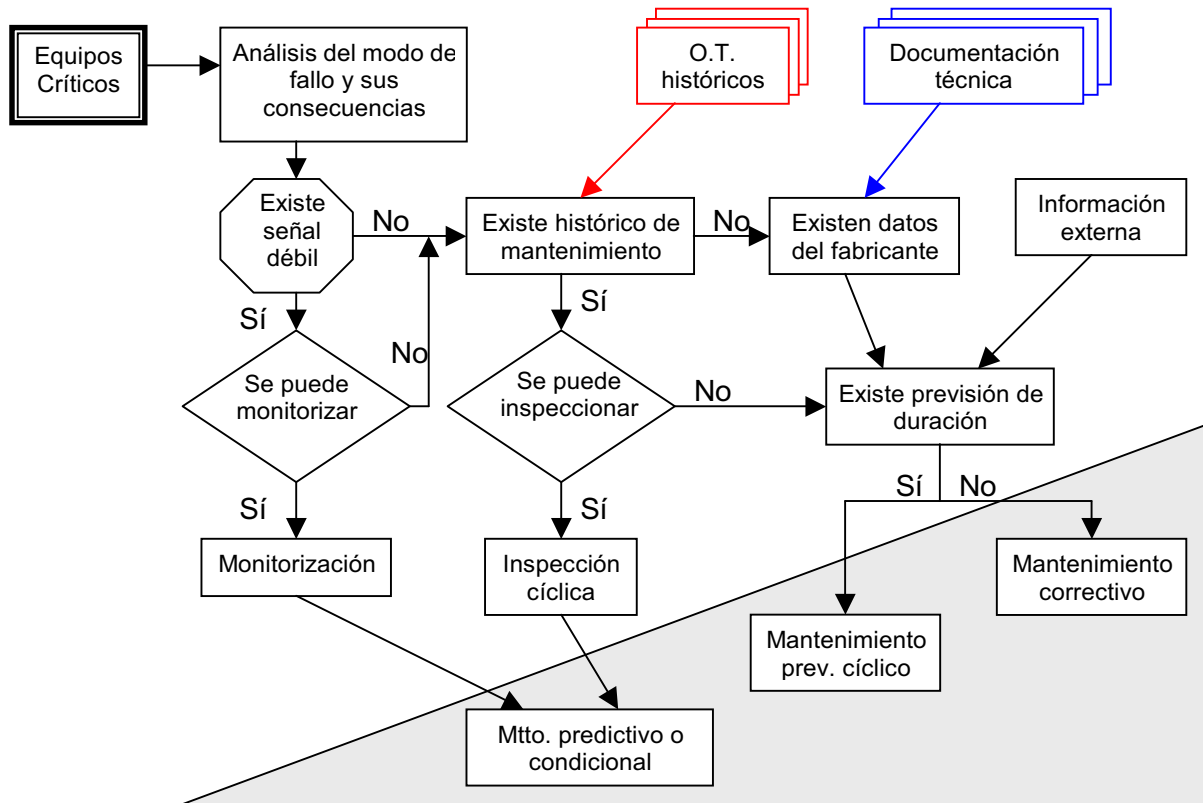


Figura 2. Formulación de la política de mantenimiento

FMECA (Análisis de los Modos de Fallo sus Efectos y su Criticidad)

El FMECA (Failure Mode, Effect and Criticity Analysis) es un método inductivo y cualitativo que apareció en los años 60 para analizar la fiabilidad de los sistemas y la criticidad de los fallos, en todas las fases del proyecto de un sistema, definiendo los tipos de fallo reales o potenciales, las causas posibles de los fallos, las consecuencias sobre la producción y los medios para evitar o eliminar esas consecuencias.

Su objetivo es identificar las causas iniciales y encontrar aquellas que no se han producido todavía, evaluando su criticidad, es decir teniendo en cuenta la frecuencia de aparición de los fallos y su gravedad. Para una mayor precisión se suele incluir un tercer parámetro, la probabilidad de detectar el fallo. El parámetro de frecuencia de aparición de fallos se determina por procedimientos de adquisición de datos estadísticos, en la comparación con materiales idénticos y cuidando de detallar las condiciones particulares de trabajo. Este procedimiento de análisis de los fallos permite una búsqueda sistemática del tipo de fallo, de la causa posible de fallo y de los efectos y consecuencias. La presencia de hojas, más o menos personalizadas en función de las aplicaciones, catalogando los fallos y las ponderaciones, permiten facilitar las acciones correctivas o preventivas que se deben emprender. Este método necesita ser desarrollado por un grupo de personas, que varía en función del período de vida en que se encuentre el equipo ya que varían los objetivos perseguidos.

MODELOS MATEMÁTICOS

Los equipos utilizados en los procesos de fabricación están sujetos a un deterioro progresivo debido al uso y la edad. El deterioro del sistema a menudo se refleja en un mayor coste de producción y una menor calidad del producto. El objetivo a alcanzar es disminuir los costes de producción mientras se mantiene una buena calidad. La realización de mantenimiento preventivo ayuda a conseguir estos propósitos en sistemas sujetos a deterioro. La importancia que toma el mantenimiento ha generado un creciente interés en el desarrollo de modelos de mantenimiento preventivo.

La dificultad de los modelos de mantenimiento preventivo ha ido creciendo en paralelo al crecimiento de la complejidad de los sistemas modernos. Desde comienzos del modelado de mantenimiento preventivo, varias revisiones bibliográficas se han sucedido: McCall, 1965; Pierskalla y Voelker, 1976; Osaki y Nakagawa, 1976; Sherif y Smith, 1981; Sherif, 1982; Valdez-Flores y Feldman 1989; Cho 1991; en esta revisión se presentan modelos de mantenimiento preventivo donde se trata de alcanzar la política óptima para una unidad o sistema individual. La clasificación está organizada en cuatro grandes grupos: modelos de inspección, modelos de reparación mínima, modelos de impacto y modelos diversos de sustitución.

MODELOS DE INSPECCIÓN

La óptima programación de las inspecciones para sistemas que se deterioran por el uso o la edad, ha sido extensamente investigado para sistemas sujetos a fallos aleatorios, las pérdidas ocasionadas por paradas debido a averías pueden ser reducidas variando la frecuencia de las inspecciones o chequeos. En los modelos de inspección generalmente se supone que el estado del sistema es totalmente desconocido a menos que una inspección sea realizada, esta inspección en la mayoría de los modelos, supone una simple revisión del estado con el objeto de determinar si su estado es operativo o de fallo, a veces un poco más detallada para determinar su grado de deterioro. Cada inspección se supone que es perfecta en el sentido que revela el estado del sistema sin error. En ausencia de acciones de reparación y sustitución el sistema evoluciona como un proceso estocástico no decreciente. En general se parte de que en cada decisión solo existen dos decisiones sobre que hacer. Una decisión es determinar que acción de mantenimiento realizar, donde el sistema sería reparado o reemplazado hasta dejarlo en un cierto estado o donde el sistema sería dejado tal cual está. La otra decisión sería determinar cuando se producirá la próxima inspección. Luego el espacio de decisiones del problema de la inspección del mantenimiento es bidimensional.

Diferentes autores han desarrollado interesantes modelos y han llegado a significativos resultados mediante variaciones de los modelos de inspección. Los diferentes modelos dependen de las suposiciones realizadas de acuerdo al horizonte de tiempo, la cantidad de información disponible, la naturaleza de las funciones de coste, el objetivo de los modelos, las restricciones de los modelos, etc. Los diferentes modelos son muy similares al modelo básico presentado por Barlow et al., 1963. Este modelo es un modelo de inspección pura de sustitución por edad, se supone que no existe mantenimiento preventivo y el sistema es reemplazado sólo cuando falla.

El modelo básico supone que:

- El fallo del sistema es conocido sólo tras una inspección.
- Las inspecciones no degradan el sistema.
- El sistema no puede fallar durante la inspección.
- Cada inspección tiene un coste c_1 .
- El coste de no actuar ante un fallo hasta la inspección es c_2 por unidad de tiempo.

El coste total por ciclo de inspección es dado por:

$$C(t, \mathbf{x}) = c_1 n + c_2 (x_n - t)$$

Donde t es el tiempo hasta el fallo, $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots)$ es la secuencia de los tiempos de inspección con $x_1 < x_2 < x_3 < \dots$, y n es tal que $x_{n-1} < t < x_n$. Generalmente la política de inspección óptima \mathbf{x}^* es aquella que minimiza la media del coste $E[C(T, \mathbf{x})]$ donde T , el tiempo de fallo del sistema, es una variable aleatoria supuesta no negativa.

MODELOS CON REPARACIÓN MÍNIMA.

En sistemas complejos formados por componentes individuales, cuando un componente de un sistema falla, el fallo a menudo se refleja en el sistema completo. En los sistemas sujetos a fallo se debe determinar si económicamente es aceptable sustituir el sistema, reparar o sustituir el componente que ha fallado. Si la reparación o sustitución del componente que ha fallado devuelve al estado de funcionamiento al sistema completo pero la tasa de fallos del sistema permanece igual que antes del fallo, entonces la reparación se llama reparación mínima. Ya que en la mayoría de los sistemas la tasa de fallos se incrementa con la edad, llegaría a ser caro mantener un sistema a base de reparaciones mínimas. La pregunta entonces es, ¿Cuándo es óptimo reemplazar el sistema completo en lugar de realizar reparaciones mínimas?

El primer trabajo donde se trata la reparación mínima data de 1960, perteneciente a Barlow y Hunter, ellos estudiaron un modelo de sustitución periódica con reparaciones mínimas entre sustituciones. El modelo básico de reparación mínima desarrollado por Barlow y Hunter ha sido generalizado y modificado por varios autores para adaptarse a situaciones más reales. El objetivo inicial del modelo era buscar una edad de sustitución t^* que minimizara el coste esperado por unidad de tiempo con sustituciones y reparaciones mínimas. Los fallos que ocurren antes de t^* son resueltos con reparación mínima, mientras que cuando alcanza esta edad el sistema es reemplazado. Una definición matemática de reparación mínima la dan Nakagawa y Kowada (1983).

El modelo de reparación mínima generalmente supone que:

- La tasa de fallos del sistema es una función creciente.
- Las reparaciones mínimas no afectan a la tasa de fallo del sistema.
- El coste de la reparación mínima c_f es inferior que el coste de sustitución el sistema completo c_r .
- El fallo del sistema es inmediatamente detectado.

El coste esperado por unidad de tiempo usando una sustitución por edad t para el modelo básico es dado por:

$$C(t) = \frac{c_f N(t) + c_r}{t}$$

Donde $N(t)$ representa el número esperado de fallos (reparaciones mínimas) durante el periodo $(0, t]$

MODELOS DE SUSTITUCIÓN DE SISTEMAS SUJETOS A IMPACTOS

Muchos modelos de impacto de mantenimiento imponen varias suposiciones que pueden ser descritas de una manera general como a continuación se especifica.

- El sistema esta sujeto a unos impactos que ocurren aleatoriamente.
- Cada impacto causa una cantidad aleatoria de daño.
- El daño se acumula aditivamente hasta la sustitución o el fallo.
- El tiempo entre impactos y el daño causado por el impacto son variables aleatorias cuyas funciones de distribución, $F_{X(t)}$ y $G_{X(t)}$, respectivamente, deberían depender del daño acumulado en el tiempo t , $X(t)$.
- Tras el fallo, el sistema es reemplazado por un sistema idéntico y nuevo, con un coste $c(\Delta)$, donde Δ implica estado de fallo.
- Además, el sistema puede ser reemplazado antes del fallo, con un coste $c(x) \leq c(\Delta)$, si el nivel de daño en el tiempo de sustitución es x .
- La función de coste de sustitución $c(x)$ se supone una función no decreciente del daño acumulado.
- Las sustituciones se supone que son realizadas en un tiempo despreciable. (4)
- Si el daño acumulado en el tiempo t es x , y un impacto de magnitud y ocurre en el tiempo t , la probabilidad de fallo es una función de $(x + y)$.

Desde el momento en que los sistemas dañados son sustituidos por nuevos sistemas con idénticas propiedades estocásticas, el comportamiento en cuanto a deterioro se repite infinitamente varios ciclos. Así, el coste esperado por unidad de tiempo tiene la expresión:

$$\psi(T) = \frac{P\{T < \zeta\} E[c(X(T))] + P\{T = \zeta\} c(\Delta)}{E[T \wedge \zeta]}$$

donde ζ es el tiempo de fallo, T es la (posible variable) tiempo de sustitución y la notación $(\zeta \wedge T)$ denota $\min\{\zeta, T\}$. Muchos modelos de impacto dan las condiciones bajo la cual la política óptima es tratada de la forma de una política con límite de control. Una política con límite de control es una regla en la que las sustituciones ocurren cuando el daño acumulado excede un nivel crítico α o se produce un fallo, cualquiera que ocurra primero, es decir, el tiempo de sustitución viene dado por:

$$T = \min\{\inf\{t > 0: X(t) > \alpha\}, \zeta\}$$

MODELOS DIVERSOS DE SUSTITUCIÓN

Existe otra variedad de modelos de sustitución que no cuadran bien en las otras secciones. Muchos de ellos consideran una reparación y una sustitución como equivalente, excepto que una reparación para un sistema en fallo es más cara que la sustitución de un sistema en funcionamiento.

Existen circunstancias en las cuales los sistemas pueden ser observados continuamente y el fallo detectado rápidamente. De todas formas, tras fallar un sistema no puede ser reparado y puesto a trabajar con una tasa de fallo descargada (reparación mínima); algo ha sido sustituido con un coste c_f . Si el sistema es reemplazado antes del fallo, entonces se incurre un coste de sustitución inferior $c_p < c_f$. Algunos modelos presentados en la literatura consideran la edad del sistema como el criterio para considerar la sustitución preventiva. También existen en la literatura variaciones de esta idea básica. Ansell et al. 1984 proponen una edad de sustitución fija para modelar un sistema con tasa de fallo creciente a lo largo de un horizonte de tiempo finito. Ellos demandan que el tiempo fijo para sustituir es fácil de computar usando este modelo en comparación a otros modelos similares, pero no prueban que su modelo sea mejor que un simple procedimiento asintótico que minimiza el coste esperado por unidad de tiempo. Pese a todo, su modelo resulta ser mejor que algunos otros modelos con horizonte de tiempo finito para los casos en que el horizonte de tiempo depende del número de sustituciones que han de ser realizadas, por lo que no se trata de un horizonte de tiempo finito y si de un horizonte de tiempo que varía.

BIBLIOGRAFÍA

- Ansell, J., Bendell, A. y Humbles, S. 1984. “Age Replacement Under Alternative Cost Criteria”, *Management Science*, **30**, 358-367 .
- Barlow, R. E., Hunter, L.C. y Proschan, F.1963. “Optimum Checking Procedures”, *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, **4**, 1978-1095.
- Cho D.I., Parlar M. 1991. “A Survey of Maintenance Models for Multi-Units Systems”. *European Journal of Operational Research*, **51**, 1-23.
- Crespo, A., Sánchez, A., “Diseño y Desarrollo de Políticas de Mantenimiento mediante Modelos Cuantitativos”.1995. *8th Congreso Iberoamericano de Mantenimiento*, Buenos Aires, Argentina.
- Furlanetto, L., Cattaneo, M. y Mastriforti, C. 1991. “Manutenzione Produttiva. L’esperienza del TPM in Italia”, *ISED I Petrini Editore*, Torino.
- Henley, E. J. y Kumamoto, H. 1992. “Probabilistic Risk Assessment”, *IEEE PRESS*, Piscataway, N.J., 1992.
- Kelly, A. 1984, “Maintenance Planning and Control”, Butterworths, Oxford.
- McCall, J.J. 1965, “Maintenance Policies for Stochastically Failing Equipment: A Survey”, *Management Science*, **11**, 493-521.
- Moubray, J. 1991, “Reliability-Centred Maintenance”, *Butterworth-Heinemann*, Oxford.
- Nakagawa, T. y Kowada, M. 1983. “Analysis of a System with Minimal Repair and its Application to Replacement Policy”, *European Journal of Operations Research*, **12**, 176-182.
- Osaki, S. y Nakagawa, T. 1976, “Bibliography for Reliability and Availability of Stochastic Systems”, *IEEE Transactions on Reliability*, **R25**, 284-287.
- Pierskalla, W. P. y Voelker, J. A. 1976, “A Survey of Maintenance Models: The Control and Surveillance of Deteriorating Systems”, *Naval Research Logistics Quarterly*, **23**, 353-388.
- Resnikoff, H. L. 1978, “Mathematical Aspects of Reliability-Centred Maintenance”, *Dolby Access Press*, Los Altos, CA.
- Sherif, Y. S. y Smith, M. L. 1981. ”Optimal Maintenance Models for System Subject to Failure. A review”, *Naval Research Logistics Quarterly*, **28**, 47-74 .
- Sherif, Y. S.1982. ”Reliability Analysis: Optimal Inspection and Maintenance Schedules of Failing Systems”, *Microelectronics and Reliability* **22**, 59-115.
- Sherwin, D. 2000. “A Review of Overall Models for Maintenance Management”, *Journal of quality in Maintenance Engineering* **6**, nº 3, 138-164 .
- Smith, D.J. 1993. “Reability Maintainability and Risk”, *Butterworth-Heinemann Ltd.*, Oxford.
- Valdez-Flores y Feldman, 1989. “A Survey of Preventive Maintenance Models for Stochastically Deteriorating Single-Unit Systems”, *Naval Research Logistics*, Vol.36, 419-446.