

Desarrollo de sistemas informáticos de ayuda a la decisión en mantenimiento industrial

M^a Carmen Carnero Moya

Universidad de Castilla-La Mancha, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Avda. Camilo José Cela s/n, 13071 Ciudad Real, Carmen.Carnero@uclm.es

RESUMEN

En la actualidad, las decisiones relacionadas con el mantenimiento industrial tienen cada vez mayor influencia sobre la competitividad de las empresas. Por ello, se han diseñado varios programas informáticos no comerciales de ayuda sobre diferentes decisiones relacionadas con el mantenimiento; entre ellas se encuentran: la selección del sistema de Gestión del Mantenimiento Asistido por Ordenador más conveniente, la evaluación económica del mantenimiento predictivo mediante Costes Basados en Actividades y la evaluación de la viabilidad de la implantación de un Programa de Mantenimiento Predictivo.

Palabras clave: *Sistemas de Gestión del Mantenimiento Asistido por Ordenador, Mantenimiento Predictivo, Costes Basados en Actividades, Técnicas multicriterio.*

1. Introducción.

El mantenimiento considerado tradicionalmente como una cuestión táctica, debido a las funciones que le han sido asignadas, mantener, devolver al servicio y arreglar los activos industriales, ha adquirido, en la actualidad, dimensiones estratégicas, relacionadas con la obtención de la disponibilidad, seguridad y calidad necesarias en las plantas industriales. Por tanto, la estrategia empresarial tradicionalmente integrada con el departamento de operaciones, por ejemplo, debería también tener una conexión similar con la estrategia de mantenimiento [1].

Las decisiones estratégicas, caracterizadas por horizontes temporales a largo plazo e implicaciones relevantes en costes [2], también se desarrollan dentro del ámbito del mantenimiento industrial. Así, en [3] se caracterizan las decisiones estrategias del mantenimiento en:

- a) Decidir entre la aplicación de un servicio de mantenimiento interno o subcontratado.
- b) Organización de la función mantenimiento.
- c) Selección de políticas de mantenimiento.
- d) Diseño de la infraestructura de apoyo al mantenimiento.

Por tanto, la relevancia que está adquiriendo el mantenimiento industrial se traduce en el desarrollo de nuevos modelos matemáticos aplicados, como se puede apreciar en [4] y [5]. Estos modelos actúan como sistemas de ayuda a la decisión y, por tanto, pueden ser de utilidad en las tomas de decisiones, favoreciendo la selección de las mejores alternativas.

En esta comunicación se exponen las características básicas de varios sistemas de ayuda a la decisión informatizados que analizan diferentes cuestiones relacionadas con el mantenimiento industrial.

2. Sistemas informáticos de ayuda a la decisión en mantenimiento industrial.

Los programas informáticos de apoyo a la decisión en mantenimiento industrial que se exponen a continuación han sido diseñados en el área de Organización de Empresas de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Ciudad Real. Como se puede apreciar todos tienen en común la introducción de técnicas de decisión multicriterio para obtener una clasificación completa de alternativas en algún paso del sistema.

2.1 La selección del sistema de Gestión del Mantenimiento Asistido por Ordenador más conveniente.

La gestión del mantenimiento en instalaciones y equipos está adquiriendo cada vez mayor relevancia, debido a la necesidad de incrementar la disponibilidad de planta, seguridad, calidad, etc. Para ello, es necesario implantar herramientas informáticas con capacidad de gestión, denominadas Sistemas de Gestión del Mantenimiento Asistido por Ordenador (GMAO). Sin embargo, los implantadores no disponen de herramientas de ayuda en la toma de decisiones sobre el GMAO más conveniente en función de las condiciones particulares de la empresa, por lo que elevados porcentajes de GMAOs están infrautilizados desde su adquisición. Por estas razones, se ha desarrollado un Sistema de Evaluación para la selección de Software de Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador en plantas industriales. Este sistema puede facilitar las actividades del implantador del GMAO, así como podría evitar los problemas que conlleva la selección errónea del software.

Para la elaboración del sistema de evaluación se ha llevado a cabo una caracterización de las empresas según diferentes escenarios. Así, se han considerado tres escenarios de empresa [6]:

- *Escenario A.* Pequeñas empresas, normalmente organizadas pero con escasos medios para el estudio y la investigación. El sistema informático empleado en la organización es escaso, solamente algunas aplicaciones concebidas y gestionadas por el servicio informático de la empresa para gestión de stock, contabilidad, etc. Aplican mantenimiento correctivo y algunas actividades preventivas. La gestión del mantenimiento está poco estructurada y a menudo depende completamente del departamento de producción.
- *Escenario B.* Medianas empresas que no han conseguido resolver completamente los problemas de mantenimiento aunque disponen de una política de mantenimiento preventiva y realizan algunas actividades esporádicas de mantenimiento predictivo. Disponen de algunas herramientas informáticas comerciales puntuales para realizar la gestión de stock o contabilidad.
- *Escenario C.* Empresas en búsqueda de la excelencia. En ellas existe una fuerte implicación del personal de mantenimiento en la productividad de las operaciones, existiendo actividades de inspección ejecutadas por algunos trabajadores de producción, aspecto habitual de los programas de mantenimiento productivo total (TPM). Cuentan con las

políticas de mantenimiento preventiva y predictiva de forma sistemática. La empresa dispone de un sistema informático avanzado que se integra en todos los departamentos de la empresa, similar a un *Enterprise Resource Planning* (ERP). Disponen de procedimientos operativos de la mayoría de las actividades. Se trata de empresas muy automatizadas y con sistemas de control de procesos.

Los criterios de decisión considerados para desarrollar la toma de decisiones son: registro de equipos e instalaciones, ordenes de trabajo, mantenimiento preventivo, mantenimiento correctivo, mantenimiento predictivo, inventario, compras, recursos humanos, análisis, funciones de administración del sistema, coste y soportabilidad del sistema.

Se han caracterizado las alternativas o GMAOs a seleccionar en las siguientes familias:

- GMAO 1. Disponen de un excelente tratamiento del mantenimiento predictivo, permitiendo actuaciones automáticas de acuerdo a las anomalías detectadas; son capaces de controlar parámetros de equipo mensurables y relacionarlos con la degradación del equipo, conexión con sistema de monitorización de instalaciones, capturando datos de forma automática, etc. Las actividades preventivas alcanzan un nivel adecuado aunque con menor intensidad que las predictivas. Tienen buen nivel con respecto al tratamiento de la información de equipos e instalaciones y administración del sistema con contraseñas, así como un buen tratamiento en otras utilidades como órdenes de trabajo y gestión y programación de los recursos humanos. La gestión de almacén se contempla aunque de forma muy general. Los recursos que requieren para su implantación y mantenimiento son elevados, requiriéndose personal muy cualificado, con elevados conocimientos informáticos.
- GMAO 2. Los programas informáticos dentro de esta familia no incorporan el mantenimiento predictivo entre sus funciones, tratando de forma regular las funciones de mantenimiento preventivo y orientándose sus actividades hacia las correctivas. Dispone de un nivel aceptable en lo referente a la información de equipos e instalaciones, así como, un buen tratamiento de otras utilidades como las órdenes de trabajo, aunque con un nivel inferior a la alternativa GMAO 1. Dispone de un módulo de almacén excelente, así como de compras e inventarios. Tienen un coste bajo de adquisición e instalación, así como, sencillez en su manejo.
- GMAO 3. Incorporan a nivel intermedio las funciones referentes al mantenimiento predictivo. Disponen de un aceptable tratamiento del mantenimiento preventivo y correctivo, así como, una buena organización referente a equipos, instalaciones y gestión de almacén, tratando de forma excelente otras utilidades como órdenes de trabajo. El coste de adquisición e instalación es considerado alto aunque inferior al GMAO 1. Requiere personal con conocimientos informáticos.
- GMAO 4. Contempla un tratamiento intermedio de todas las utilidades características de los GMAOs. Tienen un coste ligeramente inferior a los GMAO 3 y requieren un número inferior de recursos para su implantación que las alternativas GMAO 1 y GMAO 3. El mantenimiento predictivo es tratado de forma intermedia aunque superior que en las dos alternativas anteriores. En cuanto al tratamiento del mantenimiento preventivo es inferior al contemplado por el GMAO 3 y ligeramente superior al GMAO 2.

Los anteriores escenarios, criterios de decisión y alternativas se incorporan en una jerarquía. A continuación se elaboran matrices de comparación por parejas para, posteriormente, estimar de cada una de ellas el conjunto de valores normalizados que se asignarán al criterio correspondiente, mediante tres procedimientos matemáticos:

- Método del autovalor máximo sugerido por Saaty (AM).
- Cálculo de medias geométricas (MG).
- Programación por metas ponderadas (PMP).

El programa informático desarrollado en MATLAB 5.1 incorpora los métodos de autovalor máximo, medias geométricas y programación por metas ponderadas. Este software compara las soluciones obtenidas en la aplicación de los tres métodos para cada uno de los escenarios de empresa.

En las figuras 1 y 2 se muestran los valores que alcanzan cada una de las alternativas en los escenarios A y B por los tres métodos (AM, MG, PMP) permitiendo ordenar por orden de preferencia dichas alternativas.

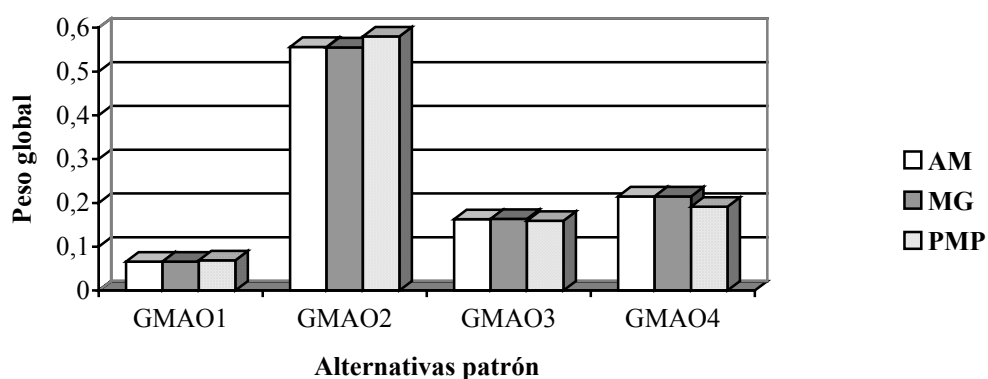


Figura 1: Representación gráfica de los pesos globales de las alternativas por cada uno de los métodos en el escenario A.

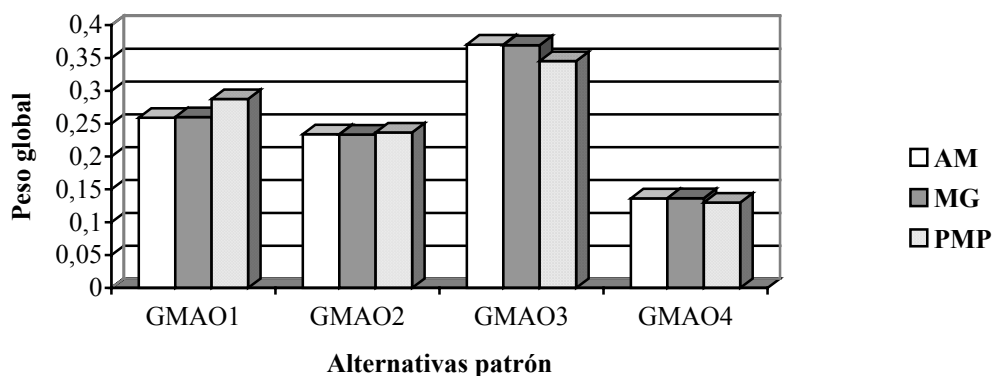


Figura 2: Representación gráfica de los pesos globales de las alternativas por cada uno de los métodos en el escenario B.

Se ha efectuado una recopilación de información procedente de diferentes GMAOs comerciales de demostrada aplicación en empresas. A continuación, se ha procedido a asociar cada uno de los GMAOs patrón propuestos anteriormente con los 8 paquetes informáticos comerciales disponibles.

Se ha aplicado este programa informático sobre una empresa de servicios. Después de categorizar dicha empresa dentro de un escenario B, se aplica el software obteniéndose como mejor alternativa el GMAO 3. Se han encontrado dos paquetes informáticos comerciales de GMAO correspondientes a esta alternativa, con lo que cualquiera de ellos podría ser seleccionado como el GMAO más efectivo para dicha empresa.

2.2 La evaluación económica del mantenimiento predictivo mediante Costes Basados en Actividades.

El cálculo de Costes Basado en las Actividades (ABC) se fundamenta en el hecho de que los productos requieren que la empresa ejecute determinadas actividades y éstas a su vez requieren que la empresa incurra en unos costes. En una empresa se pueden encontrar dos tipos de costes: costes que se pueden imputar directamente al producto, tales como materias primas o servicios externos directos; y costes que no son directamente imputables al producto, tales como salarios o suministros. Estos últimos son los que se atribuyen a las actividades mediante unos factores denominados indicadores de coste. El sistema de cálculo de costes desarrollado se centra en las actividades asociadas a la política de mantenimiento predictivo, considerando las técnicas análisis de vibraciones, análisis de lubricantes y termografía. Se han incluido, además de las actividades relativas al mantenimiento del Programa de Mantenimiento Predictivo, las necesarias para la implantación de dichos programas.

Los indicadores de coste son los elementos del sistema que traducen y direccionan los costes a las actividades del sistema, y finalmente de las actividades al producto final. Para efectuar la conexión entre actividades y elementos de coste se han desarrollado matrices para cada una de las técnicas predictivas analizadas. Así, entre los indicadores de coste para la asignación de elementos de costes a actividades se encuentran: horas de mano de obra por categoría de personal, horas máquina por equipo industrial, horas de formación de personal, imputación directa, superficie ocupada, valor monetario y consumo por equipo.

El proceso de construcción del modelo de flujo de coste es la acumulación de todos los elementos componentes del coste objetivo mediante [7]:

- Obtención del valor monetario de los elementos de coste.
- Imputación del valor monetario de los elementos de coste a las diversas actividades de mantenimiento a través de los conductores de coste adecuados.
- Obtención del total acumulado de coste por actividad y su distribución al coste objetivo. En este paso se precisa el uso de dos elementos:
 - Los conductores de coste apropiados.

- La ruta de mantenimiento del producto, es decir, la secuencia de actividades de mantenimiento necesarias para la elaboración del producto o desarrollo del mantenimiento de equipos industriales.

De este modo se realiza la distribución del coste de las actividades (a través de los conductores de coste) al coste objetivo según la ruta de mantenimiento definida.

La obtención del coste objetivo es el último paso en la ejecución del modelo de flujo de coste donde se acumulan los factores definidos anteriormente, es decir, la acumulación de los costes directos y de los costes indirectos.

El sistema de costes basado en las actividades hace uso de múltiples conductores de costes. La selección de los conductores de costes desde una colección de candidatos puede resultar compleja. Para una empresa es importante la identificación y el uso de los conductores de coste más apropiados para mejorar los factores que contribuyen a las relaciones de costes. La selección cuidadosa de las actividades y los conductores de costes en el sistema ABC es la clave para lograr los beneficios de este sistema de costes. La metodología actual para seleccionar conductores de costes se encuentra limitada, sin embargo, la decisión sobre la selección de conductores de costes pueden ser resueltas mediante la aplicación de un método multicriterio [8], como por ejemplo el proceso de jerarquía analítico o AHP (Analytic Hierarchy Process).

Así, se disponen tres alternativas de conductores de coste: número de horas de mano de obra totales (A), número de clases impartidas (B) y número de horas de clase impartidas (C), que se evalúan en base a tres criterios: coste de medida de los conductores, tiempo de medida de los conductores y correlación de los conductores con los costes de las actividades. La estructura jerárquica del problema se compone de tres niveles. En el primer nivel se dispone el propósito del problema, en el segundo los criterios de decisión y en el tercer nivel las alternativas o elecciones posibles.

Una vez obtenidos los estimadores de los pesos para los niveles jerárquicos 2 y 3, el último paso del método AHP consiste en obtener unos pesos globales para ambos niveles jerárquicos. Esto se realiza por medio de una agregación multiplicativa entre niveles jerárquicos. En la tabla 1 se muestran los pesos obtenidos en los niveles jerárquicos 2 y 3 y los pesos globales [9]. La selección del conductor A es la conclusión obtenida de la aplicación del método AHP.

Criterios Alternativas	Coste de medida 0,146	Tiempo de medida 0,197	Correlación con costes 0,657	Pesos globales
Conductor A	0,135	0,135	0,7	0,506
Conductor B	0,584	0,584	0,202	0,333
Conductor C	0,281	0,281	0,098	0,160

Tabla 1: Determinación de los pesos globales.

A partir de la base de datos de los costes unitarios de las actividades se puede realizar un análisis del valor de las mismas a partir del análisis de Pareto denominado análisis de Pareto-ABC. En dicho análisis se va a proceder a realizar tres diagramas, uno correspondiente a cada política de mantenimiento (correctivo, preventivo y predictivo). Cada diagrama incluye un histograma con el porcentaje del coste unitario de cada actividad y una curva de los porcentajes acumulados de los costes unitarios.

El sistema diseñado se ha implantado en un sistema informático mediante Visual Basic 5.0. En las figuras 3 y 4 se muestran algunos formularios del programa.

2.3 La evaluación de la viabilidad de la implantación de un Programa de Mantenimiento Predictivo.

A pesar del gran número de Programas de Mantenimiento Predictivo (PMP) implantados en la actualidad, un porcentaje importante es eliminado transcurridos breves períodos de tiempo o bien no se obtienen los beneficios esperados. La evaluación de la viabilidad previa de la implantación de dichos programas puede contribuir favorablemente al desarrollo adecuado de los PMPs. Por tanto, se ha diseñado un sistema que puede servir de ayuda en esta toma de decisiones.

Cálculo del Coste Total Mensual por Actividad									
Conductor 'Elemento Coste-Actividad'		Porcentaje Conductor		Coste Total por Actividad		Coste Unitario por Actividad			
Año: 2002 Mes: ENERO									
	Ec.01	Ec.02	Ec.03	Ec.04	Ec.05	Ec.06	Ec.07	Ec.08	E
	Cea.01	Cea.01	Cea.01	Cea.02	Cea.02	Cea.02	Cea.03	Cea.03	C
C.01	73,00	73,00		10,00	10,00				
C.02				25,00	25,00		30,00	30,00	
C.03	8,00	8,00		20,00	20,00				
C.04							30,00	30,00	
C.05							10,00	10,00	
C.06				65,00	65,00		200,00	200,00	
C.07				15,00	15,00		20,00	20,00	
C.08				10,00	10,00		10,00	10,00	
P.01									
P.02									
P.03	30,00	30,00		20,00	20,00				
P.04	40,00	40,00		40,00	40,00				
P.05							20,00	20,00	
P.06							10,00	10,00	
P.07				35,00	35,00		75,00	75,00	
P.08							10,00	10,00	
P.09							5,00	5,00	

Figura 3: Pantalla del programa informático con el elemento coste-actividad.

En el sistema diseñado se combinan la estructura jerárquica y matemática del AHP con características bayesianas e información determinista. Este modelo proporciona la alternativa más adecuada, en la primera fase de implantación de un Programa de Mantenimiento Predictivo, o fase de diseño y planificación. Entre las alternativas que se contemplan se encuentran: implantar el Programa de Mantenimiento Predictivo internamente, subcontratarlo, no implantarlo o realizar una serie de actividades previas que aseguren el éxito de la implantación futura del Programa. Las consecuencias derivadas de la aplicación de la alternativa seleccionada, tienen repercusiones substanciales a largo plazo en diferentes sectores de la empresa, así como, suponen inversiones relevantes, por lo que constituye una decisión estratégica.

En el modelo de evaluación se tiene en cuenta la capacidad de la empresa para implantar este tipo de Programas y la necesidad que de esa implantación tiene la planta industrial. El modelo incorpora 47 criterios de decisión, entre los que se evalúan: los recursos humanos y técnicos asociados al Programa de Mantenimiento Predictivo, el apoyo realizado desde otros departamentos al programa, el estado del Departamento de Mantenimiento, el nivel de documentación existente, la eficiencia del GMAO, la información histórica, el nivel de los procedimientos de mantenimiento, el estado de las diferentes políticas de mantenimiento, evaluación de la seguridad requerida, consideraciones sobre la calidad del proceso y producto, número de equipos críticos en la planta industrial, disponibilidad de planta, etc.

Actividades	Conductores 2	Cantidad Registrada	Coste Unitario
C.01	Cac.01	43,00	20,16
C.02	Cac.01	20,00	25,80
C.03	Cac.02	6,00	30,20
C.04	Cac.02	10,00	54,00
C.05	Cac.01	2,00	129,99
C.06	Cac.01	20,00	133,15
C.07	Cac.03	4,00	78,10
C.08	Cac.01	10,00	15,56
P.01	Cac.01		
P.02	Cac.01		
P.03	Cac.01	8,00	53,58
P.04	Cac.04	25,00	25,29
P.05	Cac.02	14,00	30,72
P.06	Cac.01	2,00	92,49
P.07	Cac.01	32,00	31,48
P.08	Cac.05	22,00	9,36
P.09	Cac.06	26,00	5,35
P.10	Cac.03	2,00	56,26
P.11	Cac.07	7,00	32,14

Figura 4: Pantalla del programa informático para el cálculo del coste unitario por actividad.

Estos criterios de decisión se han dispuesto en una estructura jerárquica constituida por un total de 7 niveles que incluyen el objetivo, 5 niveles para variables de decisión y variables de niveles inferiores y en el último nivel las alternativas.

Sobre la jerarquía se aplica el proceso de jerarquía analítico (AHP) para obtener una clasificación completa de alternativas. Además, se incorporan 8 reglas de decisión y la posibilidad de obtener una alternativa para una empresa a partir de la información contenida en una base de datos que incorpora los resultados obtenidos de la evaluación a otras empresas.

Para el desarrollo del sistema ha sido necesario establecer unas condiciones normalizadas para la implantación de un PMP que permitan establecer patrones comparativos entre empresas y variables.

La bondad de este modelo se ha comprobado mediante su aplicación a un total de 19 empresas seleccionadas aleatoriamente.

El programa que incorpora el modelo anterior se ha desarrollado en Microsoft Visual Basic 5.0. Entre sus utilidades se encuentra la evaluación de la implantación de los Programas de mantenimiento Predictivo [10]. Para desarrollar esta toma de decisiones deben rellenarse los cuestionarios que se incorporan en el software. En primer lugar, se muestra un cuestionario

con información general sobre la empresa, como el nombre, dirección, persona de contacto, número de trabajadores, etc. Al cumplimentar el cuestionario el programa asigna un código a la empresa que la identificará cada vez que se quiera acceder a la información de la empresa o actualizarla para realizar nuevas tomas de decisión o controlar las mismas. Este cuestionario inicial caracteriza a la empresa en un escenario concreto de entre los 9 disponible a través de 2 variables de escenario. Este cuestionario general permite el acceso a los diferentes cuestionarios temáticos (ver figura 5), obteniéndose como solución la alternativa más adecuada, como se puede apreciar en la figura 6.

Cuestionario Documentación de Mantenimiento

Borrar Cuestionario

Nivel de eficiencia obtenida del GMAD: ☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☒ 4 ☐ 5

Nivel del conocimientos informáticos del personal de mantenimiento: ☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☒ 4 ☐ 5

Nivel de informatización de los históricos de los equipos industriales: ☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☒ 5

Disponibilidad de la documentación del fabricante de los equipos industriales: ☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☒ 5

Nivel de utilización de las referencias a la documentación del fabricante en otros documentos de la empresa: ☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5

Calidad de la codificación asociada a los documentos de mantenimiento: ☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5

Calidad y cantidad de históricos de equipos industriales: ☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☒ 5

Calidad y cantidad de procedimientos disponibles sobre las tareas de mantenimiento: ☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☒ 4 ☐ 5

Figura 5: Cuestionario relativo a la documentación en mantenimiento.

EVALUAC Evaluación de la Implantación

AUTOVALOR: 0,900

EL RESULTADO DE LA EVALUACIÓN DE LA IMPLANTACIÓN ES: POSITIVO

Sugerencias

Comentarios:

Comentarios:

Figura 6: Pantalla con el resultado de la Evaluación de la Implantación de un Programa de Mantenimiento Predictivo.

Si la planta industrial debe efectuar una serie de actividades previas como requisito para la implantación de un PMP con éxito, el programa describe las actividades que deben mejorarse, así como, proporciona comentarios sobre algunas cuestiones concretas.

Referencias

- [1] Tsang, A. H. C., (1998) "A strategic approach to managing maintenance performance", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 4, No. 2, pp. 87-94.
- [2] Schroeder, R. G., (1992) "Administración de operaciones", McGraw-Hill.
- [3] Tsang, A. H. C., (2002) "Strategic dimensions of maintenance management", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 8, No. 1, 2002, pp. 7-39.
- [4] Crespo, A., Sánchez, A., Moreu, P., Framiñan, J. M., León, J. M., (2001) "Integración de modelos cuantitativos de mantenimiento dentro del método RCM", IV Congreso de Ingeniería de Organización, ADINGOR.
- [5] Sherwin, D. (2000) "A review of overall models for maintenance management", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 6 No. 3, pp. 138-164.
- [6] Novés, J. L., (2002) "Sistema de evaluación para la selección de software de gestión del Mantenimiento Asistido por Ordenador en plantas industriales mediante métodos multicriterio", Proyecto Fin de Carrera, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad de Castilla-La Mancha.
- [7] Pampín, J., (1997) "Evaluación de programas de mantenimiento productivo total mediante un modelo de costes basados en actividades", Tesis Doctoral, Universidad de Castilla-La Mancha.
- [8] Schniederjans, M. J., Garvin, T., (1997) "Using the Analytic Hierarchy Process and multi-objective programming for the selection of cost drivers in activity-based costing", *European Journal of Operational Research*.
- [9] Hidalgo, J. C., (2002) "Evaluación económica del mantenimiento de equipos industriales mediante costes basados en actividades", Proyecto Fin de Carrera, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad de Castilla-La Mancha.
- [10] Carnero, C., (2001) "Evaluación del ciclo de vida de un Programa de Mantenimiento Predictivo mediante técnicas multicriterio", Tesis Doctoral, Universidad de Castilla-La Mancha.