



Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería

ISSN: 0718-3291

facing@uta.cl

Universidad de Tarapacá

Chile

Viveros, Pablo; Stegmaier, Raúl; Kristjanpoller, Fredy; Barbera, Luis; Crespo, Adolfo  
Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo  
Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería, vol. 21, núm. 1, abril, 2013, pp. 125-138  
Universidad de Tarapacá  
Arica, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=77225903012>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

## Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo

### *Proposal of a maintenance management model and its main support tools*

Pablo Viveros<sup>1</sup>   Raúl Stegmaier<sup>1</sup>   Fredy Kristjanpoller<sup>1</sup>   Luis Barbera<sup>2</sup>   Adolfo Crespo<sup>2</sup>

Recibido 1 de junio de 2011, aceptado 13 de noviembre de 2012

*Received: June 1, 2011   Accepted: November 13, 2012*

### RESUMEN

Este artículo presenta un modelo para la gestión integral del mantenimiento, teniendo en consideración la característica de mejora continua en el tiempo. A modo de introducción y contextualización, se explica la importancia que tiene la alineación de objetivos a todo nivel organizacional para lograr la integración y correcta gestión de la unidad de mantenimiento.

El modelo a presentar se compone de siete principales etapas, las cuales deben desarrollarse progresivamente según el escenario actual de la organización, haciendo énfasis en la gestión y optimización sostenida en el tiempo de procesos asociados a la planificación, programación y ejecución del mantenimiento. Adicionalmente, el modelo presentado complementa herramientas de apoyo para el desarrollo e implementación de las etapas, y características operacionales reales, las cuales podrían afectar el desempeño de la unidad de mantenimiento. Finalmente, se presentan algunas consideraciones generales y respectivas conclusiones.

Palabras clave: Gestión de mantenimiento, gestión de activos, procesos de mantenimiento, modelo de mantenimiento, herramientas de soporte.

### ABSTRACT

*This paper presents a model for the integrated management of maintenance, taking into account features of continuous improvement over time. As an introduction and contextualization, it explains the importance of aligning organizational goals at all levels in order to achieve proper integration and management of the maintenance unit.*

*The present model consists of seven main stages, which must be progressively implemented depending on the current scenario of the organization, focusing on management and sustained over time optimization of processes related to planning, programming and maintenance execution. Additionally, the model presented is supported by tools to develop and implement the stages, and provides a real operational context of the industrial maintenance management; which may affect performance. Finally, we present some general considerations and conclusions.*

*Keywords: Maintenance management, asset management, maintenance processes, maintenance model, support tools.*

### INTRODUCCIÓN

El desarrollo e implementación de un modelo real y factible para la gestión global del mantenimiento se ha convertido en un tema de investigación y discusión

fundamental para alcanzar un buen desempeño en la gestión de mantenimiento, cuyos objetivos están alineados al cumplimiento de los objetivos de la empresa [1].

<sup>1</sup> Departamento de Industrias. Universidad Técnica Federico Santa María. Avenida España 1680. Valparaíso, Chile. E-mail: pablo.viveros@usm.cl; raul.stegmaier@usm.cl; Fredy.kristjanpoller@usm.cl

<sup>2</sup> Departamento de Mantenimiento Industrial. Escuela de Ingenieros. Universidad de Sevilla. Sevilla, España. E-mail: lbm@esi.us.es; adolfo@esi.us.es

La moderna gestión del mantenimiento incluye todas aquellas actividades destinadas a determinar objetivos y prioridades de mantenimiento, las estrategias y las responsabilidades [2]. Todo ello facilita la planificación, programación y control de la ejecución del mantenimiento, buscando siempre una mejora continua y teniendo en cuenta aspectos económicos relevantes para la organización. Una adecuada gestión del mantenimiento, teniendo en cuenta el ciclo de vida de cada activo físico, debe cumplir con los objetivos de reducir los costos globales de la actividad productiva, asegurar el buen funcionamiento de los equipos y sus funciones, disminuir al máximo los riesgos para las personas y los efectos negativos sobre el medio ambiente, generando, además, procesos y actividades que soporten los objetivos mencionados. Por todo ello, la gestión del mantenimiento se transforma en un poderoso factor de competitividad cuya importancia en el ámbito empresarial crece día a día. Es por esta razón que existe la necesidad de conceptualizar y de entender los procesos mínimos necesarios para desarrollar una correcta gestión de mantenimiento en una organización. Además, se explica en detalle el objetivo y agregación de valor de cada una de las etapas propuestas, especificando el uso de herramientas de gestión que soportan y aterrizan en términos operativos la conceptualización y función de cada etapa.

## INGENIERÍA Y GESTIÓN DE MANTENIMIENTO

El concepto base que da lugar a la ingeniería de mantenimiento es la mejora continua del proceso de gestión del mantenimiento mediante la incorporación de conocimiento, inteligencia y análisis que sirvan de apoyo a la toma de decisiones en el área del mantenimiento, orientadas a favorecer el resultado económico y operacional global [3].

La ingeniería de mantenimiento permite, a partir del análisis y modelado de los resultados obtenidos en la ejecución de las operaciones de mantenimiento, renovar continua y justificadamente la estrategia y, por consiguiente, la programación y planificación de actividades para garantizar la producción y resultados económicos al mínimo costo global. También permite la adecuada selección de nuevos equipos con mínimos costos globales en función de su ciclo de vida y seguridad de funcionamiento (costo de ineficiencia o costo de oportunidad por pérdida de producción).

La gestión del mantenimiento no es un proceso aislado [4], sino que es un sistema linealmente dependiente de factores propiamente ligados a la gestión del mantenimiento, así como de factores internos y externos a la organización. De hecho, la situación más deseable es la completa integración de la gestión del mantenimiento dentro del sistema [5].

En base a la Norma ISO 9001-2008 y características reales de las unidades de mantenimiento se puede establecer un diagrama reconocido como ciclo de trabajo de mantenimiento. De este modo, se distinguen claramente varios aspectos que deben ser considerados al momento de elaborar e implementar un modelo de gestión del mantenimiento. En la Figura 1 se presentan dos ciclos de trabajos muy representativos y necesarios en un buen modelo de gestión de mantenimiento. El primero, reconocido como el Ciclo Habitual de Mantenimiento [6] o bien ciclo de trabajo estándar, explica la secuencia lógica del proceso táctico-operativo de las actividades de mantenimiento, las cuales son: planificación, programación, asignación de tareas/trabajo y la ejecución correspondiente. El segundo, definido como Ciclo de Mejoramiento Continuo, agrega al ciclo habitual dos nuevas actividades, el proceso de análisis de lo ya ejecutado para la búsqueda respectiva de oportunidades de mejora (ej.: modificar el plan de mantenimiento) y el proceso de identificación de tareas necesarias para implementar la mejoras definidas anteriormente. Evidentemente, dependiendo del nivel de emergencia con que se requiera implementar la mejora, existirá la posibilidad de hacer un salto directamente al proceso de asignación de trabajo (línea diagonal en Figura 1).

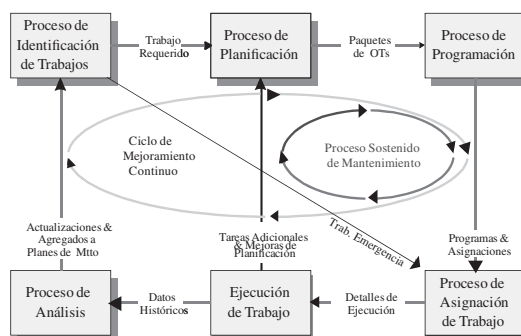


Figura 1. Ciclo de trabajo de mantenimiento [6].

Un modelo de gestión del mantenimiento debe ser eficaz, eficiente y oportuno, es decir, debe estar alineado con los objetivos impuestos en base a las

necesidades de la empresa, minimizando los costos indirectos de mantenimiento [7] (asociados con las pérdidas de producción). A su vez, debe ser capaz de operar, producir y lograr los objetivos con el mínimo costo (minimizando los costos directos de mantenimiento), generando a su vez actividades que permitan mejorar los indicadores claves del proceso de mantenimiento, asociados a mantenibilidad y confiabilidad. Además, para generar un modelo de mantenimiento robusto y eficaz se deben considerar factores relacionados con la disponibilidad de recursos y su respectiva gestión [8].

### ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL, NIVELES DE GESTIÓN Y OBJETIVOS

Los objetivos de mantenimiento [2] se pueden definir como metas asignadas y aceptadas, las cuales requieren de actividades de mantenimiento, cada una de ellas perteneciente a uno de los diferentes niveles de control, desde el estratégico hasta el nivel operativo de mantenimiento. En términos generales, las estrategias direccionan y definen el plan organizacional para lograr los objetivos [9], enfocándose en el “cómo” se lograrán.

La dirección de la unidad de mantenimiento debe ser coherente con los objetivos de producción y las metas estratégicas generales de la compañía y, del mismo modo, debe existir coherencia en la definición de estrategias, políticas, procedimientos, estructura organizacional y decisiones en los diferentes niveles (Planificación y Estructuración del trabajo de mantenimiento) [10-11].

Dando énfasis al nivel de Disponibilidad, éste se define a partir de un nivel de servicio o producción esperada (objetivo/meta), comprometida por la alta dirección de la empresa y en consonancia con el presupuesto real. De esta forma, el nivel de disponibilidad requerido es definido en función de la estrategia fijada. En consecuencia, la lectura de este indicador se transforma en un input para el siguiente nivel jerárquico (táctico), cuyas principales competencias apuntan a la eficaz asignación de los recursos disponibles (dinero, tiempo, personal de trabajo, etc.) y evidentemente la planificación de las actividades de mantenimiento. Consecuentemente, el nivel operativo, que tiene como input las decisiones tácticas, busca la eficiente utilización de los recursos, considerando aspectos técnicos y organizacionales [11].

En la Figura 2 se representa la jerarquía de los objetivos y metas definidos para cada nivel, indicando además otros aspectos fundamentales en el proceso de toma de decisiones. El flujo de decisiones para el cumplimiento de metas y objetivos estratégicos, tácticos y operativos sigue el formato Top-Down, es decir, se inicia desde el nivel superior (estrategia corporativa) hasta el nivel operativo y de ejecución [10]. Sin embargo, el flujo de información que alimenta la toma de decisiones comienza desde las bases, dando soporte empírico a las decisiones.

El uso eficiente y económicamente conveniente de los activos durante su ciclo de vida permite una óptima definición del nivel de disponibilidad de los activos y/o procesos, teniendo como meta un nivel de producción, o bien un indicador económico-financiero como el ROA [12].

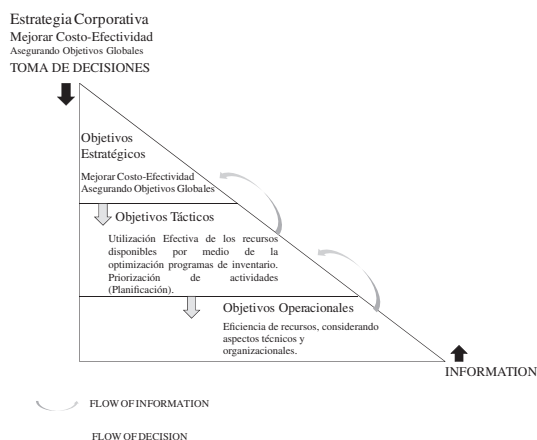


Figura 2. Objetivos según jerarquía organizacional.

La indisponibilidad de los sistemas (o equipos) genera costos de ineficiencia por no producción o por falta de servicio. En algunos sistemas industriales los costos de ineficiencia son tan elevados (ineficiencia en equipos críticos) que podría ser económicamente conveniente considerar equipos de respaldo (redundancia) para lograr la disponibilidad y nivel de servicio necesario [6].

### MODELO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO

A continuación se presenta un modelo avanzado para la gestión integral del mantenimiento en un ciclo de mejora continua, que se alinea a las estrategias, políticas e indicadores claves del negocio.

Para el desarrollo y elaboración del modelo que se presenta se han considerado numerosas propuestas que, ordenadas cronológicamente en el tiempo, son las mostradas en la Tabla 1.

El modelo propuesto integra además muchos de los modelos empleados en la práctica en empresas de amplia tradición y excelencia en este campo [4-5].

Tabla 1. Propuestas de gestión de mantenimiento.

Año	Autores
1990	Pintelon, L. & Van Wassenhove
1997	Riis, J., Luxhoj, J. & Thorsteinsson
1998	Wireman, T.
2000	Duffuaa, S., Raouf, A. & Dixon Campbell, J.
2001	Hassanain, M.A., Froese, T.M. & Vanier, D.J.
2001	Campbell, J. D. & Jardine, A.K.S.
2002	Tsang, A.
2002	Waeyenbergh, G. & Pintelon, L.
2001	Murthy, D.N.P., Atrons, A. & Eccleston, J.A.
2004	Cholasuke, C., Bhardwa, R. & Antony, J.
2005	Abudayyeh, O., Khan, T., Yehia, S. & Randolph, D.
2006	Pramod, V.R., Devadasan, S.R., Muthu, S., Jagathiraj, V.P. & Dhakshina Moorthy, G.
2006	Kelly, A.
2007	Tam, A., Price, J. & Beveridge, A.
2007	Söderholm, P., Holmgren, M. & Klefsjö, B.
2007	Crespo Marquez A.
2010	López, M., Gómez, J.F., González, V., Crespo A.

El modelo propuesto surge de la necesidad de contemplar en la gestión de mantenimiento el contexto estratégico y operacional existente. Esto se consigue atendiendo a una serie de aspectos reales (no contemplados en otros modelos) necesarios para convertir un modelo teórico en un modelo real de gestión del mantenimiento. Así, el modelo tiene en cuenta las restricciones reales que podrían limitar el diseño de los planes de mantenimiento preventivo y los recursos necesarios para ello. También considera el proceso de selección de repuestos críticos (costos de inventario vs costos por indisponibilidad de equipos críticos) y la afectación positiva de las e-tecnologías (e-maintenance) en la gestión moderna del mantenimiento a nivel global.

Por otra parte, este modelo ha sido diseñado teniendo en consideración la existencia de dos posibles puntos

de partida en el análisis e implementación: Si el proyecto está en fase de diseño, se debe partir con el Análisis del ciclo de vida LCCA<sup>3</sup>. Por otro lado, si el proceso ya existe y está en funcionamiento, el análisis comienza con la Jerarquización de equipos críticos, requiriendo de una evaluación para la respectiva optimización.

Adicionalmente, el modelo describe cómo gestionar y optimizar de una manera real y continua todos los procesos que tienen que ver con la planificación, programación y ejecución del mantenimiento. Todo ello contemplando un contexto operacional real ya que tiene en cuenta ciertas restricciones que pueden afectar en la eficiencia y/o eficacia de la gestión del mantenimiento industrial.

Cada etapa del modelo corresponde a una acción que precede a la siguiente, siendo el orden y el sentido de las acciones propuestas en el modelo, único (con dos puntos de partida en función de la situación inicial o de partida) y no invertible.

Es un modelo dinámico, secuencial y en bucle cerrado que determina de forma precisa el curso de acciones a llevar a cabo en el proceso de gestión para asegurar la eficiencia, eficacia y mejora continua del mismo. Además, tiene inmerso el concepto de ciclo de mejora continua.

Es importante aclarar que la organización debiera disponer de información suficiente de sus activos y organización para analizar y desarrollar cada una de las etapas que propone el modelo. En caso contrario, debieran agregarse otras actividades complementarias.

### DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS DEL MODELO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PROPUESTO

A continuación se exponen las etapas del modelo suponiendo que la organización ya gestiona, en menor o mayor medida, el mantenimiento.

**Etapas 1: Análisis de la situación actual. Definición de objetivos, estrategias y responsabilidades de mantenimiento:** En primer lugar, y como paso previo a cualquier actividad, es necesario realizar una evaluación de la situación inicial o existente en

<sup>3</sup> LCCA: Life Cycle Cost Analysis.

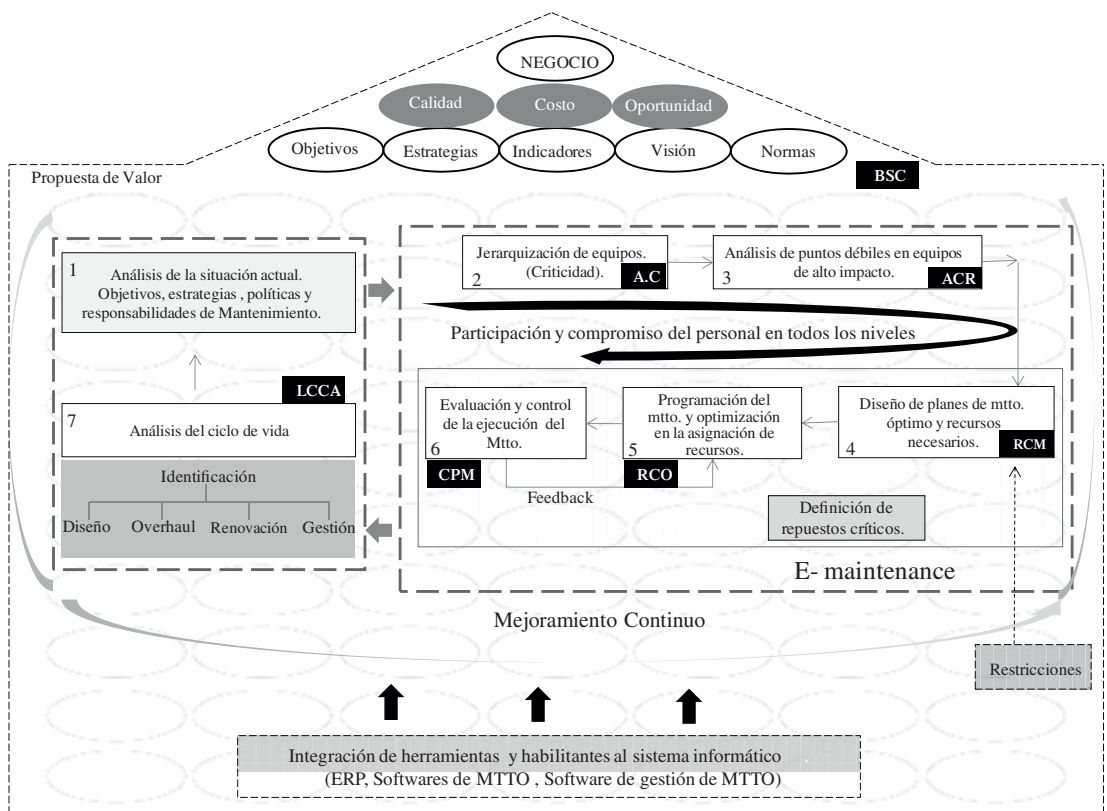


Figura 3. Modelo de gestión de mantenimiento.

relación a la gestión del mantenimiento. Este análisis debe realizarse en el caso de que la organización o planta ya disponga de un método más o menos definido de gestión, o más aún, en caso de que no exista algún método o procedimiento destinado a esta labor. Esta evaluación o diagnóstico de la situación actual debe considerar todos aquellos aspectos relacionados con el mantenimiento de equipos de los cuales se disponga información; por ejemplo, aspectos tales como la planificación, programación y ejecución de las tareas de mantenimiento, histórico de fallas, indicadores de tiempo medio entre fallas (MTTF) y tiempo medio de reparación (MTTR), recursos financieros asignados al mantenimiento, impacto económico o en producción (consecuencia de falla del equipo) por parada no programada de la planta (sistema) o subsistema, entre otros [12-13].

Para lograr un correcto desempeño en la gestión global del mantenimiento en una organización resulta imprescindible definir previamente los objetivos (metas) que se persiguen, estableciendo una estrategia orientada a esos objetivos y determinando

las responsabilidades del personal implicado a nivel operacional y gerencial. El proceso de definición de una estrategia de mantenimiento requiere (Figura 4):

- Determinar, en base a los objetivos corporativos del negocio, los objetivos de mantenimiento, por ejemplo: valores estimados y realistas para los siguientes indicadores de gestión: disponibilidad de equipos, confiabilidad, seguridad, riesgo, etc. Determinar el desempeño o rendimiento actual de las instalaciones productivas, comparándolas con sus respectivas capacidades nominales.
- Determinar los indicadores claves para la evaluación del rendimiento de las instalaciones (Key Performance Indicators-KPIs).

La gestión del mantenimiento debe conseguir alinear todas las actividades de mantenimiento con la estrategia definida a nivel estratégico o de dirección, táctico y operativo. Una vez que se han transformado las prioridades del negocio en prioridades de mantenimiento, se procederá a la elaboración de la estrategia, de acuerdo con los objetivos. De esta



forma se obtiene un plan de mantenimiento genérico en la empresa que se desarrollará y enfocará a aquellos activos considerados críticos, identificados por la etapa 2.

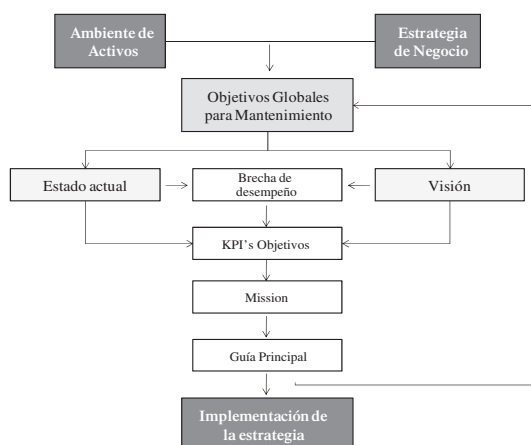


Figura 4. Modelo para la definición de la estrategia de mantenimiento [8].

Las acciones a nivel táctico determinarán la correcta asignación de los recursos (habilidades, materiales, equipos de pruebas y medida, etc.) para la consecución del plan de mantenimiento. El resultado final será la creación de un programa detallado con todas las tareas a desarrollar y con los recursos asignados para la realización de las mismas.

Las acciones a nivel operativo deben asegurar que las tareas de mantenimiento se llevan a cabo adecuadamente por los técnicos seleccionados, en el tiempo acordado, siguiendo los procedimientos reseñados y utilizando las herramientas adecuadas.

**Etapla 2: Jerarquización de equipos:** Una vez que se han definido los objetivos, las responsabilidades y se ha diseñado una estrategia de mantenimiento, resulta de vital importancia discretizar los activos físicos de la organización en base a su criticidad, es decir, su mayor o menor impacto en el sistema productivo global y/o seguridad del sistema (objetivos del negocio).

El análisis de criticidad es un conjunto de metodología que permite definir la jerarquía o prioridades de un proceso, sistema, equipos y/o, según el parámetro de valor conocido como “Criticidad” que es proporcional al “Riesgo”, generando una estructura que facilita la toma de decisiones acertadas y

efectivas, direccionando los esfuerzos y recursos técnico-económicos en áreas y eventos que tienen mayor impacto en el negocio.

Existen numerosas técnicas cualitativas, cualitativo-cuantitativas y cuantitativas que nos ofrecen una base sistemática sobre la cual clasificar un activo como crítico (C) / semicrítico (SC) / no crítico (NC), basadas en la evaluación probabilística del riesgo y la obtención del número/índice probabilístico de riesgo del activo (PRA/PRN) [14]. Los activos con índice mayor serán los primeros en ser analizados. En muchas ocasiones no existen datos históricos en base a los cuales obtener estos índices, en estos casos es posible utilizar técnicas de naturaleza más cualitativa con el objetivo de ir garantizando niveles iniciales adecuados de efectividad en las operaciones de mantenimiento.

El Método Cualitativo está basado en opiniones de especialistas, donde se combinan criterios técnicos y financieros para jerarquizar equipos. Se caracterizan por ser subjetivos y efectivos para procesos simples, por lo que se requieren en algunos casos métodos más rigurosos para validar la información. Por ejemplo, se utilizan como criterios la consecuencia (Alto-Medio-Bajo) y complejidad (Compleja-Mediana-Sencilla), en donde la escala numérica para cada criterio pudiese ser 1-5-10.

Para el caso de modelos de cualitativo-cuantitativo, en este se involucran datos objetivos para generar una guía de criticidad cuantificada según: frecuencia de falla, impactos en producción (por falla), costos de reparación, tiempo de reparación, impactos en seguridad personal e impacto ambiental. El factor cualitativo está representado en generar la escala o criterio que represente los resultados de cada ítem medible, y la definición final de la jerarquización de Criticidad. El riesgo o criticidad se define como el producto de la frecuencia por la consecuencia de la falla. La frecuencia es el número de fallas en un tiempo determinado. Para cuantificar la consecuencia de la falla se utiliza la ponderación de varios factores o criterios de importancia en función de las necesidades de la organización.

### Riesgo: Frecuencia x Consecuencia

- Frecuencia: Número de Fallas en un tiempo determinado.

- Consecuencia: (Impacto Operacional x Flexibilidad) + Costos de Mantenimiento + Impacto (Seguridad – Ambiente).

Una vez que los activos están jerarquizados en base a su criticidad, se obtiene la Matriz de Criticidad.

MATRIZ DE CRITICIDAD

FRECUENCIA	1	SC	SC	C	C	C	C	C
	2	SC	SC	SC	C	C	C	C
	.	NC	SC	SC	SC	C	C	C
	.	NC	NC	SC	SC	SC	C	C
	.	NC	NC	NC	SC	SC	C	C
	N	NC	NC	NC	NC	SC	SC	C
		1	2	.	.	.	.	M
		CONSECUENCIA						

Figura 5. Matriz genérica de criticidad.

El análisis cuantitativo tiene un enfoque numérico y probabilístico que busca cuantificar económicamente las variables que definen la criticidad del subsistema, equipo o componente. Se deben valorizar financieramente variables como: costos directos de mantenimiento (repuestos, H.H., insumos, etc.), impacto económico por indisponibilidad del sistema (pérdida de producción total o parcial según configuración lógica funcional), impactos en seguridad e impacto ambiental.

Esta perspectiva (cuantitativa) utilizada para jerarquizar subsistemas, equipos o componentes en un proceso, es aquella que considera el impacto directo sobre el sistema en términos de la disponibilidad esperada (en función de confiabilidad y mantenibilidad) y costos asociados (función de costos directos, indirectos y oportunidad por falla sistémica).

Existen otros métodos de jerarquización basados en indicadores de confiabilidad y mantenibilidad, tanto para hacer un ranking a nivel de modos de falla como también de equipos y subsistemas.

Conceptualmente, el método de análisis Jack-Knife [15] corresponde a un estudio multicriterio de las distintas variables involucradas, o que inciden en los modos de falla, tales como: frecuencia de ocurrencia de falla (tasa de falla promedio), número de fallas, tiempo fuera de servicio (MTTR), costos asociados,

entre otros. El mecanismo en sí de análisis, es un diagrama en dos o más dimensiones, en donde cada una de éstas corresponde a una variable de estudio. En el caso de trabajar con números de falla y tiempo fuera de servicio, en el gráfico se trazan líneas de referencia que denotan el número promedio de fallas y el tiempo promedio de reparación de los modos de falla, generando cuatro cuadrantes. Los modos de falla ubicados en el primer cuadrante son aquellos que poseen un número de fallas mayor al promedio (crónicos) y un tiempo fuera de servicio mayor al promedio (agudos), por lo que son candidatos importantes en la escala de criticidad.

Adicionalmente, se puede(n) trazar una(s) recta(s) de isoindisponibilidad de manera que se identifiquen los modos de falla que generen una indisponibilidad mayor a la planteada/esperada. Para esto, por lo general se utilizan escalas logarítmicas para que las líneas de isoindisponibilidad (D) sean rectas. Para mayor detalle, ver Figura 6, en donde se grafican (escala logarítmica) las coordenadas (Número de fallas y MTTR) de algunos modos de fallas.

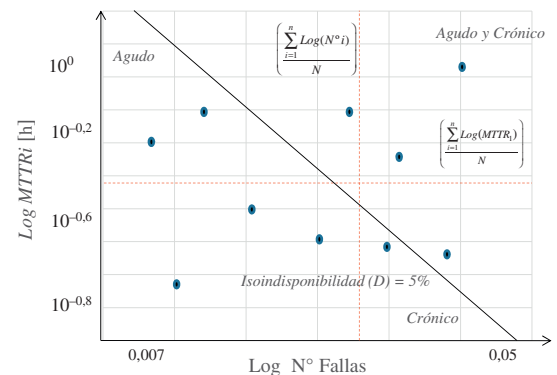


Figura 6. Representación gráfica de dispersión Jack-Knife.

Donde:

$MTTR_i$  = Tiempo Medio de Reparación del Modo de falla  $i$ .

$N^{\circ}i$  = Número de Intervenciones del Modo de falla  $i$ .

$N$  = Número de Modos de falla del Equipo/Sistema.

$$\left( \frac{\sum_{i=1}^n \text{Log}(N^{\circ}i)}{N} \right) \text{ Promedio del Logaritmo del Número de Intervenciones de los } N \text{ modos de falla}$$

$$\left( \frac{\sum_{i=1}^n \text{Log}(MTTR_i)}{N} \right) \text{ Promedio del Logaritmo del Tiempo Medio de Reparación de los } N \text{ modos de falla}$$



Las propuestas de mejora, según la distribución de los modos de falla/equipos/subsistemas en el gráfico, darán la pauta para enfrentar el problema desde el punto de vista de la confiabilidad, producto de la alta frecuencia de intervención, o bien desde la mantenibilidad, dados los altos tiempo medios de reparación.

En general, existen diversos métodos de jerarquización o identificación de criticidades, en donde la mayoría de ellos evalúan, cualitativa y/o cuantitativamente, el comportamiento de las fallas y sus consecuencias [16-18]:

**Etapas 3: Análisis de puntos débiles en equipos de alto impacto:** Realizada la jerarquización de los activos físicos de la planta en función de su criticidad (equipos críticos, semicríticos y no críticos), el siguiente paso debe ser la realización de una inspección técnica-visual a detalle de todos los equipos clasificados como críticos para la planta. Los equipos semicríticos serán inspeccionados someramente, con un menor nivel de detalle mientras que a los activos no críticos no será estrictamente necesario asignarles recursos de inspección dado que su impacto en el sistema, en caso de falla, no es significativo y, por tanto, a los equipos no críticos se les permitirá operar hasta que tenga lugar la falla.

La inspección previa de los equipos C y SC permite conocer el estado actual de operación de los equipos, deficiencias en su funcionamiento, entorno de operación y toda la información relevante para determinar las necesidades específicas de mantenimiento.

En esta etapa, al igual que en las anteriores, es muy importante considerar la información aportada por cada uno de los operarios asignados al control y uso de los equipos C y SC.

En los equipos críticos, previo desarrollo de las acciones constituyentes de los planes de mantenimiento, es recomendable analizar los posibles fallos repetitivos y crónicos (a partir del histórico de los equipos) cuya frecuencia de aparición pueda considerarse excesiva.

La identificación de las causas raíces que provocan este tipo de fallos crónicos permitirá, en el mejor de los casos, eliminar el modo de falla o, si no

fuera posible debido por ejemplo a que el costo de eliminación supera en gran medida al costo por falla del equipo, se podría controlar dicho modo de falla. La eliminación o en su defecto el control de los modos de fallo contribuye a lograr un alto retorno inicial a la inversión en nuestro programa de gestión de mantenimiento, asimismo, facilita las fases sucesivas de análisis y diseño de planes de mantenimiento, que requieren de una importante inversión de tiempo y recursos.

Existen diferentes métodos para realizar análisis de puntos débiles en activos críticos, uno de los más utilizados es el Análisis Causa Raíz (ACR). Se trata de una metodología que permite de forma sistemática identificar las causas raíces primarias de las fallas, para aplicar posteriormente soluciones que las eliminen de forma definitiva. Las causas por las cuales las fallas aparecen pueden clasificarse en físicas, humanas o latentes/organizacionales [19].

La causa física es la razón por la que el activo falla, la explicación técnica del motivo por el cual el activo falló. La causa humana incluye los errores humanos (acción u omisión) que dan lugar a causas físicas de falla. Finalmente, las causas latentes incluyen a todas aquellas deficiencias organizacionales y de gestión que derivan en errores humanos y convierten en crónicas las fallas en sistemas y procedimientos, al no corregirse con el paso del tiempo.

En general, un árbol lógico de ACR comienza con la definición del evento inicial (ej. problema crónico de rodillos en cintas transportadoras), seguidamente se determinan los modos de falla (eje dañado, cojinete bloqueado, sellos dañados, banda dañada, rodillos doblados, cojinetes calientes), posteriormente se pasa al nivel de hipótesis (grasa solidificada en el rodamiento) y finalmente se llega al nivel de causas (exceso de grasa, etc.).

**Etapas 4. Diseño de planes de mantenimiento y recursos necesarios:** El diseño de los planes de mantenimiento preventivo se puede dividir en dos partes fundamentales:

- La información, la cual recopila los datos de los equipos a analizar. Se determinan las distintas funciones del equipo analizado en su contexto operacional. Posteriormente, se determinan para cada función las posibles fallas. A continuación

se identifican los modos de falla, es decir, el evento que precede a la falla. Por último, y solo si fuera necesario, se analizarían las causas raíces de las fallas que así lo requieran (ACR, etapa 3). Con todos estos datos, se realiza una evaluación de las consecuencias de cada falla en cada una de las escalas (Operacional, Seguridad, Medio ambiente y Costo).

- La decisión, donde se establecen tareas de prevenciones (técnicamente factibles y económicamente rentables) de las consecuencias de los modos de falla. Se determinan para cada modo de falla o causa raíz la tarea de mantenimiento a realizar, la frecuencia con que se va a llevar a cabo, el responsable de ejecutarla, así como el nuevo riesgo resultante de aplicar el plan de mantenimiento.

Una de las estrategias más utilizadas en la industria para el diseño de estrategias y planes de mantenimiento es la denominada como RCM<sup>4</sup>. Este método es de amplia utilización ya que permite determinar convenientemente las necesidades de mantenimiento de cualquier activo físico en su entorno de operación [14]. También se ha definido [19] como un método que identifica las funciones de un sistema y la forma en que esas funciones pueden fallar, estableciendo a priori tareas de mantenimiento preventivo aplicables y efectivas.

La metodología RCM propone la identificación de los modos de falla que preceden a las posibles fallas de los equipos y la ejecución de un proceso sistemático y homogéneo para la selección de las tareas de mantenimiento que se consideren convenientes y aplicables [14, 20]. El resultado será el conjunto de actividades de mantenimiento recomendadas para cada equipo. Se definirá el contenido concreto de las actividades específicas que deben realizarse y sus frecuencias de ejecución.

Concretamente, la metodología de análisis RCM propone un procedimiento [14-21], por medio de la formulación de siete preguntas que permiten identificar las necesidades reales de mantenimiento de los activos en su contexto operacional (Ver Tabla 2).

La aplicación del proceso RCM está reglado a través de la norma SAE-JA1011 [21] y SAE-JA1012

[22]. Una vez seleccionadas las actividades de mantenimiento consideradas más eficientes para cada equipo crítico, se establecerán las recomendaciones finales del análisis RCM y se llevará a cabo su implantación.

Tabla 2. Metodología RCM.

1	¿Cuáles son las funciones que debe cumplir el activo y cuál es el desempeño esperado en su actual contexto operacional definido?
2	¿De qué forma puede fallar completa o parcialmente el equipo?
3	¿Cuál es la causa origen del fallo funcional?
4	¿Qué sucede cuando ocurre un fallo?
5	¿Cuál es la consecuencia de cada fallo?
6	¿Qué se puede hacer para prevenir o predecir la ocurrencia de cada fallo funcional?
7	¿Qué puede hacerse si no es posible prevenir o predecir la ocurrencia del fallo funcional?

A partir de dichas recomendaciones finales, se deberá proceder a la redacción del plan o estrategia de mantenimiento propuesta para la instalación, asignando los recursos necesarios para ello. La implantación del programa de mantenimiento preventivo generado permitirá [23] anticiparse a los fallos para subsanarlos con el mínimo impacto en el funcionamiento del sistema, eliminar las causas de algunos fallos e identificar aquellos fallos que no comprometan la seguridad del sistema.

**Etapa 5. Programación del mantenimiento y optimización en la asignación de recursos:** En esta etapa se debe realizar una programación detallada de todas las actividades de mantenimiento, considerando para ello las necesidades de producción en la escala temporal y el coste de oportunidad para el negocio durante la ejecución de las tareas. La programación de las actividades de mantenimiento pretende optimizar la asignación de recursos tanto humanos como materiales, así como minimizar el impacto en la producción. La programación del mantenimiento debe efectuarse a corto (< 1 año), medio (1-5 años) y largo plazo (> 5 años).

**Etapa 6. Evaluación y control de la ejecución del mantenimiento:** La ejecución de las actividades de mantenimiento (una vez diseñadas, planificadas y programadas tal y como se ha descrito en apartados anteriores) debe ser evaluada y las desviaciones

<sup>4</sup> RCM: Reliability Centered Maintenance.

controladas para perseguir continuamente los objetivos de negocio y los valores estipulados para los KPIs de mantenimiento seleccionados por la organización. El control de la ejecución permite realimentar y optimizar el diseño de los planes de mantenimiento mejorando de este modo su eficacia y eficiencia.

El diseño del sistema de información está encaminado a recoger y procesar los datos precisos para satisfacer las necesidades de información que lleven a alcanzar los objetivos básicos de la gestión de mantenimiento, que son el aumento de la eficacia y la disminución de costos.

Los datos que posteriormente se analizarán deben ser lo más fiables posible, es decir, el diseño de la hoja u orden de trabajo de mantenimiento ha de ser tal que los operarios y encargados la encuentren sencilla y estándar, ya que sólo así se podrán obtener datos útiles y fiables. Este problema de diseño es básico para el funcionamiento del sistema. Lo mismo ocurre con el resto de documentos de captación de datos que componen el sistema.

**Etapas 7. Análisis del ciclo de vida y de la posible renovación de equipos:** La gran cantidad de variables que se deben manejar a la hora de estimar los costos reales de un activo a lo largo de su vida útil, generan un escenario de alta incertidumbre [24]. A menudo el costo total del sistema de producción no es visible, en particular aquellos costos asociados con: la operación, el mantenimiento, las pruebas de instalación, la formación del personal, entre otros. El costo del ciclo de vida se determina identificando las funciones aplicables en cada una de sus fases (diseño, fabricación y producción), calculando el costo de estas funciones y aplicando los costos apropiados durante toda la extensión del ciclo de vida [25].

Mediante un análisis de costo de ciclo de vida se determina el costo de un activo durante su vida útil. El análisis de un activo típico podría incluir costos de planificación, investigación y desarrollo, producción, operación, mantenimiento y retirada del equipo [26]. Los costos de adquisición del equipo (que incluyen investigación, diseño, prueba, producción y construcción) son por lo general obvios, pero el análisis de costos de ciclo de vida depende crucialmente de valores derivados de la fiabilidad,

por ejemplo, del análisis de la tasa de fallas, del costo de las piezas de recambio, de los tiempos de reparación, de los costos de los componentes, etc. Un análisis de costos de ciclo de vida resulta necesario para una óptima adquisición de nuevos equipos (reemplazo o nueva adquisición) [23], ya que pone de manifiesto todos los costos asociados con un activo (además del precio de adquisición), permitiendo a la gerencia desarrollar predicciones con mayor precisión.

Para tomar este tipo de decisiones es necesario conocer la curva de costos globales (Figura 7).

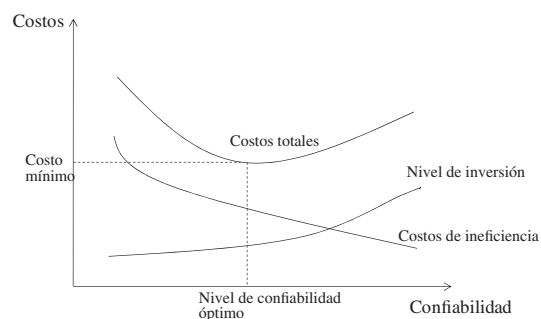


Figura 7. Curva de costos globales [6].

Los costos globales son la cuantificación de todos aquellos costos generados durante el ciclo de vida de un proyecto o instalación, y pueden determinarse utilizando la relación [6]:

**Costo global = Costo capital fijo + Costo operacional + Costo de ineficiencia**

El costo de capital fijo (o de inversión) queda determinado por el costo de los equipos e instalaciones asociados al proyecto. También puede considerarse el capital de trabajo requerido para la operación. A su vez, el costo operacional queda definido por la cuantificación de todos aquellos elementos propios de la operación de un sistema, tales como: insumos, energía, repuestos, entre otros. Finalmente, el costo de ineficiencia viene dado por el costo asociado a la indisponibilidad de la instalación durante el período de evaluación. Por lo tanto, los costos de ineficiencia se pueden representar de la siguiente manera [13]:

$$C. \text{ ineficiencia} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{(1+i)^k} \cdot H \cdot Ci \cdot (1 - A_{\text{sistema}})$$

En donde:

$C_i$ : Costos de ineficiencia por horario definido (\$/h; US/día; etc.).

$H$ : Periodo de evaluación dentro del horizonte del proyecto.

$A_{sistema}$ : Disponibilidad esperada del sistema.

$i$ : Tasa de costo de capital de la empresa.

$n$ : Años de operación.

$k$ : Índice para el periodo de evaluación

El sumatorio representa la actualización de los flujos de dinero, producto de los costos de ineficiencia por cada período  $H$  de análisis.

Una vez definidos los costos globales, se pueden analizar las distintas alternativas de equipo y de configuraciones del sistema de forma que la alternativa técnica más recomendable será aquella que tenga el mínimo costo global.

## CONSIDERACIONES DEL MODELO

El modelo propuesto considera, además de las restricciones reales, la aplicación de las nuevas tecnologías TIC en todas las etapas dentro de un ciclo de mejora continua. Con la aplicación de nuevas tecnologías de mantenimiento, el concepto “e-maintenance” emerge como componente del concepto “e-manufacturing” [27-28], el cual promueve el beneficio de las nuevas tecnologías de la información y comunicación para crear entornos corporativos y distribuidos multiusuario. “E-Maintenance” puede ser definido como un soporte de mantenimiento que incluye recursos, servicios y/o gestión, factores necesarios para desarrollar la correcta ejecución de un proceso proactivo de toma de decisiones en el área de mantenimiento. Este soporte no sólo incluye tecnologías como Internet, sino también actividades “e-maintenance” (operaciones y procesos) como es el caso del “e-monitoring”, “e-diagnosis”, “e-prognosis, entre otras.

Otro aspecto importante en el modelo propuesto es el entrenamiento técnico e implicación del personal a todos los niveles dentro de la organización. La participación activa y comprometida de todo el personal involucrado en el área del mantenimiento será un factor crítico para el éxito y mejora continua. La información capturada de las diferentes unidades

del proceso debe estar completa y debe permitir su interpretación y análisis.

**Herramientas (software) avanzado de apoyo a la gestión del mantenimiento:** A continuación se justifica la necesidad de implantación de una herramienta software que dé soporte a la gestión global del mantenimiento y se exponen las principales ventajas que se pueden obtener:

- Disponibilidad de información para la toma de decisiones: control de costos, equipos críticos, repuestos, proveedores, personal o sobre cualquier otro parámetro relevante.
- Gestión de recursos, planificación y control de la ejecución del mantenimiento.

Un software de gestión del mantenimiento posibilita la captura y utilización de una gran cantidad de datos y parámetros. Las principales características operativas que debe tener cualquier herramienta software de gestión del mantenimiento son:

- Creación o conexión con base de datos de las instalaciones: datos técnicos, situación operativa, costos asociados y valor del inmovilizado.
- Almacenamiento y análisis del histórico de operaciones: fecha, duración, costo, operarios, equipos, repuestos, etc.
- Establecimiento de niveles de alarma para determinados parámetros.
- Planificación y gestión de tareas, recursos e inventario.
- Jerarquización de sistemas y equipos.
- Control del estado de cada orden de trabajo y de la ejecución de los programas de mantenimiento preventivo.
- Generación de informes.
- Análisis de las fallas.

**Integración de herramientas de soporte al sistema informático:** Es necesario generar una política común de integración a todos los niveles de la organización, de este modo todas las herramientas/software de apoyo a las diferentes unidades y procesos del negocio se deben integrar en un lenguaje común que facilite su utilización multiusuario, la generación de conocimiento, el análisis de gestión de las unidades y evaluaciones económicas globales de impacto sobre el negocio, entre otras.

Por ello, la capacidad de integración de estas herramientas software con la base de datos existente en la organización (CMMS y otros sistemas EAM) es clave para el éxito de su implantación.

**Selección de repuestos críticos:** En el área industrial, las empresas satisfacen con su actividad una demanda de productos. La respuesta a esta demanda se realiza con criterios de eficiencia (rentabilidad), que suelen incluir: mínimos costos y máxima satisfacción del cliente. Esto, traducido a mantenimiento, significa minimizar el inventario de repuestos, garantizando la disponibilidad requerida de los equipos, no obstante, la complejidad de los sistemas hace que la satisfacción de ambos criterios sea difícil, e incluso a veces contrapuesta.

Desde el punto de vista técnico, cuantas más piezas de repuesto se dispongan en stock más se asegurará la disponibilidad de los equipos y, desde el punto de vista económico, cuantas menos piezas haya almacenadas, menor capital inmovilizado existirá. Así, resulta evidente la importancia del inventario de repuestos, ya que supone un alto costo de almacenamiento cuando se tiene, y cuando no se tiene puede acarrear costes de indisponibilidad tremendamente altos. Por ello, resulta necesario buscar fórmulas que permitan asegurar el nivel deseado de disponibilidad de los equipos con el mínimo capital inmovilizado posible.

Los aspectos principales que deben tenerse en cuenta a la hora de seleccionar los repuestos críticos son: Criticidad de los equipos (jerarquizar), tasa de consumo, plazos de aprovisionamiento (nivel de cobertura) y el costo unitario.

En el esquema principal (Figura 3), la definición de repuestos críticos se presenta como un proceso y resultado de la integración de tres principales etapas, diseño de planes, programación y ejecución del mantenimiento, información que debiera ser un input para abastecimiento, gestión y políticas de compra de repuestos y partes principales. De este modo, se puede entender como son estas tres etapas retroalimentadas las que determinan los repuestos críticos. Es necesario indicar que también los análisis de criticidad y puntos débiles es un proceso fundamental para definir repuestos críticos, considerando también todas las posibles variables que, según el contexto de operación, puedan afectar de una u otra manera a la gestión óptima de los repuestos en una organización.

## CONCLUSIONES

El escenario actual de las organizaciones con alta dotación de activos indica que las necesidades de mantenimiento han ido aumentando durante los últimos años, por lo cual se estima conveniente que la evaluación de estrategias de mantenimiento, la selección de tareas y por ende la gestión global del mantenimiento en la organización se deba manejar de manera formal y responsable, dejando de lado la improvisación y aleatoriedades. Además, los objetivos de la unidad encargada de realizar la gestión del mantenimiento se determinarán y serán dependientes del plan estratégico y de negocio de la organización. Las estrategias de mantenimiento deben estar siempre alineadas con los planes de negocio de la empresa ya que de esto depende la consecución de los objetivos del mantenimiento y, también, los del propio plan de negocio de la organización.

Este artículo desarrolla un modelo de gestión de mantenimiento bajo la visión de mejora continua, considerando una revisión profunda de un conjunto representativo de modelos de gestión de mantenimiento, los cuales siguen una secuencia lógica de actuación jerarquizada. (Modelo de 7 etapas).

El modelo propuesto consigue alinear los objetivos locales del mantenimiento con los objetivos globales del negocio en un marco de mejora continua. Además, propone algunas herramientas de apoyo en las principales etapas del modelo, dando a conocer las principales bondades y funcionalidad dentro del ciclo propuesto. Mediante estas herramientas, se entrega soporte en la toma de decisiones lógicas de gestión y optimización de una manera real y continua en todos los procesos que tienen que ver con la planificación, programación y ejecución del mantenimiento, teniendo en cuenta el contexto operacional y contemplando todas las restricciones que pueden afectar a la eficiencia y/o eficacia de la gestión del mantenimiento.

## AGRADECIMIENTOS

La investigación que se ha llevado para lograr estos resultados ha recibido financiación del Séptimo Programa Marco de la Comunidad Europea (FP7/2007-2013 en virtud de acuerdo de subvención Nº PIRSES-GA-2008-230.814).



## REFERENCIAS

- [1] R. Prasad, D. Anand and R. Kodali. "Development of a framework for world-class maintenance systems". *Journal of Advanced Manufacturing Systems*. Vol. 5, Issue 2, pp. 141-166. 2006. ISSN: 0219-6876.
- [2] EN 13306:2001, 2001. *Maintenance Terminology*. European Standard. CEN (European Committee for Standardization), Brussels. 2001.
- [3] A. Arata y L. Furlanetto. "Manual de Gestión de Activos y Mantenimiento". RIL Editores. 1ª Edición. Santiago, Chile. p. 924. 2005. ISBN: 9562844331.
- [4] L.M. Pintelon and L.F. Gelders. "Maintenance management decision making". *European Journal of Operational Research*. Vol. 58, Issue 3, pp. 301-317. 1992. ISSN: 0377-2217.
- [5] S.G. Vanneste and L.N. Van Wassenhove. "An integrated and structured approach to improve maintenance". *European Journal of Operational Research*. Vol. 82, Issue 2, pp. 241-257. Abril 1995. ISSN: 0377-2217.
- [6] A. Arata. "Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales". RIL Editores. 1ª Edición, p. 442. Santiago, Chile. 2009. ISBN: 978-956-284-658-5.
- [7] F. Vagliasindi. "Gestire la manutenzione". Franco Angeli Edizioni. 3ª Edizione, p. 288. Italia. 2003. ISBN 10: 882043072X.
- [8] A. Crespo Márquez. "The maintenance management framework". *Models and methods for complex systems maintenance*. Springer Verlag. 1st Edition, p. 333. London, England. 2007. ISBN 978-1-84628-820-3.
- [9] R. Anthony and V. Dovindarajan. "Management Control Systems". Irwin / McGraw-Hill Editorial. Ninth edition, pp. 768. USA. 1998. ISBN: 0073100897.
- [10] A. Parida and G. Chattopadhyay. "Development of a multi-criteria hierarchical framework for maintenance performance measurement (MPM)". *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. Vol. 13, Issue 3, pp. 241 - 258. 2007. ISSN: 13552511.
- [11] M. Kans. "An approach for determining the requirements of computerized maintenance management systems". *Computers in Industry*. Vol. 59, Issue 1, pp. 32-40. January 2008. DOI: 10.1016/j.compind.2007.06.003.
- [12] J. De Andres, M. Landajo and P. Lorca. "Flexible quantile-based modeling of bivariate financial relationships: The case of ROA ratio". *Expert Systems with Applications*. Vol. 36, Issue 5, pp. 8955-8966. July 2009. DOI: doi:10.1016/j.eswa.2008.11.021.
- [13] L. Barberá, V. González, A. Crespo y P. Moreu. "Revisión de herramientas software para el análisis de la fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad (RAMS) de equipos industriales". *Revista de Ingeniería y Gestión de Mantenimiento*. Vol. 68. April-May-June 2010. Madrid, Spain. ISSN: 1695-3754.
- [14] J. Moubray. "Reliability-Centred Maintenance". Industrial Press, Inc. 2nd edition, p. 448. New York, USA. 1997. ISBN: 0831131462.
- [15] P. Knights. "Downtime Priorities, Jack-Knife Diagrams, and the Business Cycle". *Maintenance and Asset Management*. Vol. 19, Issue 4, pp. 21-28. 2005. ISSN: 1460-1583.
- [16] P. Marhavilas and D.E. Koulouriotis. "A risk-estimation methodological framework using quantitative assessment techniques and real accidents' data: Application in an aluminum extrusion industry". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 21, Issue 6, pp. 596-603. 2008. ISSN: 0950-4230.
- [17] R. Pascual, G. Del Castillo, D. Louit and P. Knights. "Business-oriented prioritization: A novel graphical technique". *Reliability Engineering and System Safety*. Vol. 94, pp. 1308-1313. 2009. ISSN: 0951-8320.
- [18] P. Dehghanian, M. Fotuhi-Firuzabad, S. Bagheri-Shouraki and A.A. Kazemi. "Critical Component Identification in Reliability Centered Asset Management of Power Distribution Systems Via Fuzzy AHP". *IEEE Systems Journal*. Vol. 6, Issue 4, pp. 593-602. 2012. ISSN: 1932-8184.
- [19] M. Rausand. "Reliability Centered Maintenance". *Reliability Engineering and System Safety*. Vol. 60, Issue 2, pp. 121-132. May, 1998. DOI: 10.1016/j.physletb.2003.10.071.
- [20] L. Barberá, V. González and A. Crespo. "Review and evaluation criteria for software tools supporting the implementation of the



- RCM methodology". To be published in the International Journal of Quality & Reliability Management. Under Review 2010.
- [21] SAE JA1011. 1999. Evaluation criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) processes. Society for Automotive Engineers.
- [22] SAE JA1012 2002. A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) standard.
- [23] J. Campbell and A. Jardine. "Maintenance Excellence: Optimizing Equipment Life-Cycle Decisions". Marcel Dekker Inc. First Edition, p. 495. New York, USA. 2001. ISBN: 0-8247-0497-5.
- [24] S. Durairaj and S. Ong. "Evaluation of Life Cycle Cost Analysis Methodologies". Corporate Environmental Strategy. Vol. 9, Issue 1, pp. 30-39. February 2002. DOI: 10.1016/j.physletb.2003.10.071
- [25] N. Ahmed. "A design and implementation model for life cycle cost management system". Information and Management. Vol. 28, Issue 4, pp. 261-269. April 1995. DOI: 10.1016/0378-7206(94)00040-P.
- [26] Y. Guangbin. "Life cycle reliability engineering". John Wiley & Sons, Inc. Edition 1, p. 511. New Jersey, USA. 2007. ISBN: 978-0-471-71529-0.
- [27] J. Lee. "E-manufacturing: fundamental, tools, and transformation". Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. Vol. 19, Issue 6, pp. 501-507. May, 2003. DOI: 10.1016/S0736-5845(03)00060-7.
- [28] A. Tsang, A. Jardine and H. Kolodny. "Measuring maintenance performance: a holistic approach". International Journal of Operations and Production Management, Vol. 19, Issue 7, pp. 691-715. 1999. ISSN: 0144-3577. DOI: 10.1108/01443579910271674.