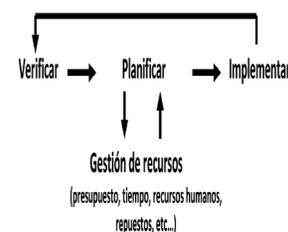


Metodología para auditar la asignación de recursos a las actividades críticas de mantenimiento



METHODOLOGY FOR AUDITING THE RESOURCES ALLOCATION OF CRITICAL MAINTENANCE ACTIVITIES

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5819> | Recibido: 24/04/2013 • Aceptado: 07/10/2013



Mónica López-Campos *, Pablo Viveros-Gunckel **, Adolfo Crespo-Márquez *, Fredy Kristjanpoller-Rodríguez**, Raúl Stegmaier-Bravo **

* UNIVERSIDAD DE SEVILLA. Escuela Superior Industrial. Dpto. Organización Industrial. Camino de los Descubrimientos, s/n - 41092 Sevilla. Tfno: +34 954 487204. mlopezcampos@us.es

** UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA. Dpto. de Industrias. Avenida España 1680, Valparaíso, Chile. pablo.viveros@usm.cl

ABSTRACT

- This paper proposes an audit methodology designed to provide savings in the allocation of resources for maintenance, in the form of activities, time, labor, spare parts and direct costs of corrective and preventive actions. Using graphs, this audit methodology analyzes the resources allocated to maintenance actions, and their consistency in terms of downtime and risk for critical failure modes. The description of the method is performed by a BPMN diagram including a format that summarizes the required input data. This audit methodology can be applied independently to assist in the fulfillment of organizational goals, or as part of an asset management system, as would be the PAS 55 standard.
- Keywords: auditing, allocation, resources, maintenance, BPMN, criticality, prioritization, spare parts.

RESUMEN

Este artículo propone una metodología de auditoría diseñada para proporcionar ahorros en la asignación de recursos para el mantenimiento, en forma de actividades, tiempo, mano de obra, repuestos y costos directos de las acciones correctivas y preventivas.

Por medio de gráficos, esta metodología de auditoría analiza los recursos asignados a las acciones de mantenimiento, y su consistencia en términos de indisponibilidad y de riesgo para los modos de fallo críticos. La descripción de la metodología se realiza mediante un diagrama BPMN, incluyendo un formulario que resume los datos de entrada requeridos. Esta metodología de auditoría puede ser aplicada de forma independiente, para colaborar en el cumplimiento de los objetivos de organizacionales, o como parte de un sistema de gestión de activos, como sería el estándar PAS 55.

Palabras clave: auditoría, asignación, recursos, mantenimiento, BPMN, criticidad, priorización, repuestos.

1. INTRODUCCIÓN

En el escenario global de negocios, en virtud de la actual desaceleración económica, se requiere una mayor atención a las operaciones de la planta con el fin de optimizar los recursos de todo tipo. En este sentido, el mantenimiento juega un papel crucial para la consecución de importantes ahorros de costes, a la vez que cumple su función de preservación de los activos. Un objetivo común de los métodos y tecnologías desarrolladas históricamente para la gestión del mantenimiento, se centra en la optimización de la toma de decisiones [1]. Este proceso de decisión tiene que ver con la identificación de los diferentes requerimientos de los activos físicos y con la creación de las mejores políticas de mantenimiento para cada elemento, asegurando que todos los activos se mantendrán en perfecto estado para ser utilizados, lo que significa asegurar un nivel de fiabilidad aceptable.

El logro de un buen nivel de fiabilidad, sobre todo en los activos críticos, requiere una apropiada priorización en la asignación de recursos (dinero, tiempo, recursos humanos y materiales) y una adecuada asignación de las políticas de mantenimiento de acuerdo con la criticidad de cada elemento mantenible [2]. Por lo tanto, una metodología de jerarquización conveniente y práctica se convierte en una herramienta importante para el éxito de la función de mantenimiento.

Con el fin de ejecutar las acciones de mantenimiento en el menor tiempo posible, es necesario asegurar la existencia de repues-

tos y materiales requeridos. La gestión de los inventarios de repuestos y materiales para el mantenimiento y las operaciones es una cuestión vital y compleja, no solo relacionada con la logística y las funciones financieras, sino también con los datos técnicos de mantenimiento [3]. En este sentido, una vez más la jerarquización es una herramienta adecuada para gestionar las políticas de inventarios de repuestos y materiales.

La metodología propuesta en este trabajo, la cual es modelada utilizando el estándar internacional BPMN (*Business Process Modeling Notation*), está enfocada en auditar el uso de los recursos de mantenimiento, de acuerdo con un análisis de priorización de los modos de fallo, a fin de contribuir en el logro de los objetivos generales de la organización, o incluso para ser parte de un sistema de gestión de activos, tal como se propone en la norma PAS 55, por lo que la utilización de esta metodología coadyuva en la obtención de ahorros y en la mejora de productividad empresarial.

BPMN siendo el lenguaje en el que se modela la metodología de auditoría propuesta en este artículo, es una notación gráfica estandarizada para el modelado de procesos de negocio, sirviendo como lenguaje común entre el personal que diseña y define los procesos de negocio (gestores y analistas) y los desarrolladores técnicos (quienes implementan los procesos diseñados). Dadas sus características, el uso de BPMN agrega valor a la metodología propuesta ya que abre la puerta a su implementación y automatización. BPMN actualmente es mantenida por el *Object Management Group*, una organización sin ánimos de lucro dedicado al establecimiento de estándares de tecnologías orientadas a objetos [4].

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El establecimiento de prioridades y la toma de decisiones para el mantenimiento y las operaciones no son temas nuevos, de hecho su importancia es bien conocida desde los años 60 [5]. Desde entonces, se ha impulsado el uso de una variedad de métodos cuantitativos y gráficos. Lamentablemente, tanto a partir de investigaciones publicadas [6], como de la experiencia directa de los autores de este artículo con las empresas, se revela que el enfoque metodológico para la priorización en el mantenimiento y las operaciones es muy escaso en la realidad industrial.

En muchos casos, incluso si una empresa tiene el serio propósito de aplicar alguna metodología, la toma de decisiones y la evaluación de los resultados de haber elegido determinada política de mantenimiento o de inventarios es lenta y costosa.

Es por esto que los autores presentan en este artículo, una metodología que intenta facilitar este proceso de auditoría de la utilización de los recursos destinados a las actividades de mantenimiento, de acuerdo con un análisis de priorización de los modos de fallo. Esta metodología utiliza gráficos para clarificar el análisis de resultados, y puede ser útil en varios aspectos: 1) para auditar las actividades del plan de mantenimiento, para determinar si el plan existente se centra en los modos de fallo críticos, en términos de utilización de los recursos, 2) para trazar las mejoras de rendimiento de un determinado ítem mantenible y su efecto sistémico 3) para ofrecer una visualización rápida y sencilla cuando se comparan dos

alternativas de equipos o de políticas de mantenimiento, y 4) para ayudar a determinar los inventarios y los requerimientos de repuestos. El estándar internacional BPMN es utilizado para modelar los procesos relacionados a la metodología propuesta, lo cual es un valor agregado orientado a una posible automatización del método.

Para completar el panorama general de la priorización para el mantenimiento, la Sección 3 de este artículo presenta un breve reconocimiento de las técnicas más importantes de análisis de criticidad, jerarquización y gestión de repuestos. La Sección 4 describe la metodología de auditoría propuesta y, por último, la sección 5 ofrece las conclusiones y futuras líneas de investigación.

3. ESTADO DEL ARTE

El mantenimiento ha cambiado enormemente en las últimas décadas debido al aumento en la variedad de los activos físicos, al aumento de la complejidad del diseño, la creación de nuevas técnicas de mantenimiento y nuevas perspectivas en la organización del mantenimiento [5]. Por lo tanto, el mantenimiento de hoy no solo consiste en la reparación de los fallos tan pronto como sea posible, sino también en mantener el equipo operando con niveles específicos de eficiencia y eficacia. Para llevar a cabo una gestión eficiente del mantenimiento es necesario realizar una selección de ítems basados en diferentes criterios, tales como su costo o su recurrencia de fallos [7]. La idea es identificar los equipos críticos para dar prioridad a su mantenimiento, para que los recursos se inviertan de forma eficaz y eficiente. A continuación, un breve análisis de algunas de las técnicas más representativas para la definición de la criticidad de los elementos mantenibles y sus repuestos correspondientes.

3.1. ANÁLISIS DE CRITICIDAD Y PRIORIZACIÓN EN LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO

Para establecer un plan de mantenimiento eficaz y eficiente: “una serie de tareas de mantenimiento que incluyen actividades, procedimientos, recursos y tiempos necesarios para realizar el mantenimiento” [8] es necesario dar prioridad a los activos de acuerdo a las estrategias de mantenimiento. Esta priorización se puede hacer mediante una combinación de métodos, como los siguientes:

- La adopción de las recomendaciones del fabricante, como las contenidas en manuales de operaciones y mantenimiento, o en documentos similares, basándose en la experiencia del personal con el activo o con activos similares,
- Revisión y análisis de documentación técnica para cada activo, tales como diagramas, procedimientos técnicos, etc. El objetivo es adaptar las recomendaciones del fabricante a las condiciones reales de trabajo o a las necesidades especiales de mantenimiento,
- Uso de técnicas de mantenimiento como RCM u otros métodos con el mismo propósito, teniendo en cuenta los requisitos reglamentarios u obligatorios, recomendaciones de seguridad de funcionamiento, regulaciones ambientales, etc.

- Otros.

La mayoría de estas técnicas utilizan representaciones gráficas que muestran el comportamiento de los fallos y sus consecuencias. Estos gráficos se construyen a partir de datos obtenidos a partir de registros históricos. Algunas de las técnicas de priorización más difundidas en la actualidad son las siguientes:

- Análisis de Pareto [9]
- Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) [10] and Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA) [11]
- Reliability-Centered Maintenance [5]
- Análisis de dispersión de Jack-Knife [12]
- Técnica de evaluación del riesgo [13,14]
- Fuzzy multi-criteria decision making [15, 16]
- Cost scatter diagram CSD [17]
- Analytic Hierarchy Process AHP [18, 19]
- Decision making grid DMG [20]
- System Efficiency Influence Diagram SEID [21]
- Graphical analysis for maintenance management GAMM [22].

Entre estas técnicas resaltan especialmente las tres primeras por su amplio reconocimiento y uso en la industria, tanto en empresas manufactureras, como en empresas de servicios. El análisis FMEA/FMECA se lleva a cabo además desde la fase de diseño para prevenir fallos futuros, por ejemplo en la industria automotriz. En tanto que el análisis RCM ha demostrado ser una herramienta valiosa para definir un programa de mantenimiento basado en la confiabilidad de los equipos, extendiéndose su uso en industrias altamente reguladas, como la nuclear [23].

Tomando como referencia las técnicas antes mencionadas, la metodología que se propone en este artículo pretende ser una propuesta integral que incluye las ventajas de los indicadores de confiabilidad (indisponibilidad y riesgo) junto con elementos de gestión del mantenimiento y análisis de causa-raíz (tiempo, mano de obra, costos, etc.), resultando una herramienta práctica de análisis gráfico.

3.2. GESTIÓN DE REPUESTOS PARA EL MANTENIMIENTO

El tiempo de reparación (TTR) depende, entre otros factores, de la disponibilidad de las piezas de repuesto necesarias para recuperar la funcionalidad del elemento. Si las piezas de repuesto no están disponibles, el TTR podría ser prorrogado, a veces indefinidamente. Por el contrario, un stock excesivo de piezas de repuesto implica los ya conocidos costos de inventario. La gestión de repuestos es por lo tanto, un tema importante para asegurar el óptimo desempeño de la función de mantenimiento.

La gestión de repuestos tiene diferentes características que lo diferencian de las políticas comunes aplicables al WIP u otros inventarios [24]. Por ejemplo, las piezas de repuesto se distinguen porque su nivel de consumo es esporádico, dependiendo del número de equipos que la usen y del nivel intrínseco de fiabilidad [3].

Aunque la gestión de repuestos es un problema “viejo”

ampliamente discutido en la literatura [24]; los autores de este artículo han encontrado que la mayoría de las empresas no utilizan una metodología coherente. Cavalieri y cols. [3] abundan este tema, afirmando que si bien se ha escrito mucho sobre la gestión de repuestos, hay una falta de un enfoque claro y completo que permita la fácil adopción de una metodología en la industria.

De acuerdo con trabajos previos [25, 3], una clasificación de la criticidad de los elementos puede ser útil para determinar las piezas de repuesto que tienen que ser prioridad en cuanto a su existencia en inventarios. Una técnica de jerarquización utilizada tradicionalmente es la clasificación ABC, basada en el principio de Pareto [26, 27]. Otra técnica más reciente es el modelo AHP, que establece tres niveles jerárquicos: vital, esencial y deseable [28, 29].

La metodología propuesta en este trabajo, como parte de su enfoque en la priorización, proporciona una herramienta gráfica que facilita el proceso de toma de decisiones para determinar la política de gestión de repuestos más óptima.

4. METODOLOGÍA PROPUESTA

4.1. FUNCIONAMIENTO DE UNA AUDITORÍA DE GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO

Es a partir de los años 2000 cuando la auditoría de indicadores de mantenimiento se ha convertido en un tema más recurrente. Varios autores han desarrollado una variedad de sistemas de auditoría: Al-Muhaisen y Santarisi [30] (a través de un diagrama de red), Carnero y Delgado [31] (que propone un sistema experto), Macián et al. [32] (Desarrollando un análisis DAFO), Bana e Costa et al. [33] (Proponiendo un modelo de auditoría orientada al mantenimiento predictivo, utilizando la técnica multicriterio MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*)).

El objetivo principal de la metodología propuesta en este trabajo es lograr una estructura de referencia para auditar la coherencia de las políticas de mantenimiento existentes (en relación con asignación de recursos) con respecto al comportamiento real y la criticidad de los elementos a mantener (en base a sus modos de fallo). Mediante dicha auditoría se identificarán oportunidades de mejora para producir una mayor disponibilidad de equipos e instalaciones, al menor costo. Respecto a las técnicas previamente desarrolladas, el carácter distintivo de la metodología de auditoría propuesta en este documento, es que se centra directamente en la criticidad de los modos de fallo, su frecuencia y duración, para determinar gráficamente la conveniencia de la asignación de varios tipos de recursos (presupuesto, número de actividades, tiempos asignados, recursos humanos y piezas de repuesto).

La metodología propuesta puede utilizarse como parte de las acciones a tomar, para acreditar el cumplimiento de la reconocida norma de gestión de activos PAS 55. PAS 55 es un estándar británico, referente internacional, que define los requerimientos para establecer y auditar un sistema de gestión integrado y optimizado a lo largo de todo el ciclo de vida, para todo activo físico [34]. Esto por supuesto incluye sustancialmente la función de mantenimiento.

Llevar a cabo una auditoría para la asignación de recursos de mantenimiento, como la que facilita la metodología propuesta, puede ser evidencia importante para acreditar el requerimiento de “Auditoría”, señalado por el estándar PAS 55 en su apartado 4.6.4, dentro de la sección que la norma dedica a la evaluación del desempeño y la mejora continua del sistema de gestión de activos [35]. Utilizando la herramienta gráfica que aquí se propone, es posible visualizar oportunidades de mejora en la asignación de recursos para el mantenimiento, así como dar evidencia de mejoras en la confiabilidad de los equipos.

Dado que la presente propuesta se trata de una metodología de auditoría, su ciclo de funcionamiento inicia con la verificación de la pertinencia de las políticas de mantenimiento y gestión de repuestos actuales, con respecto a la criticidad de los modos de fallo, (tomando como referencia el ciclo de Deming, se iniciaría con la etapa “Verificar”, seguida por la planificación que incluye la gestión de recursos, para finalmente “Implementar”. La Figura 1 muestra la secuencia de etapas de gestión para la metodología de auditoría propuesta.



Fig. 1: Secuencia de etapas desarrolladas por la metodología de auditoría

4.2. MODELANDO EL PROCESO DE AUDITORÍA

La operación de la metodología propuesta puede ser modelada a través de un diagrama de BPMN (Figura 2). Este diagrama está conformado por tres procesos principales (verificación, planificación y gestión de recursos, e implementación) y cada proceso puede subdividirse en varios sub-procesos (por ejemplo la verificación se divide en etapa de análisis de criticidad y en etapa de auditoría); al mismo tiempo cada sub-proceso está conformado por actividades, utilizando el número de niveles necesarios para caracterizar el funcionamiento de la metodología propuesta. La Figura 2 expone el intercambio de información entre los tres procesos principales.

El desarrollo de la metodología comienza con la información generada a raíz de la ejecución del mantenimiento y los datos almacenados en el sistema de gestión de mantenimiento asistido por ordenador (*Computer Maintenance Management System* o CMMS), el cual es un sistema de administración de base de datos con información de mantenimiento; después de identificar el equipo crítico (por medio de un análisis de RCM, la experiencia de los mantenedores, etc.), sus modos de fallo críticos son identificados y a continuación, el plan de auditoría tiene que ser definido. Durante la auditoría, se analiza la asignación de recursos en función de la criticidad de los modos de fallo identificados. La información requerida para este fin, se resume en el formato propuesto en la Figura 3.

Los resultados del informe generado por el proceso de auditoría es el elemento de entrada para optimizar el número de recursos asociados a prevenir y corregir los modos de fallo. Una vez optimizada la asignación de recursos, las mejoras tienen que ser documentadas, para luego ser implementadas, generando nuevos planes y programas de mantenimiento hasta

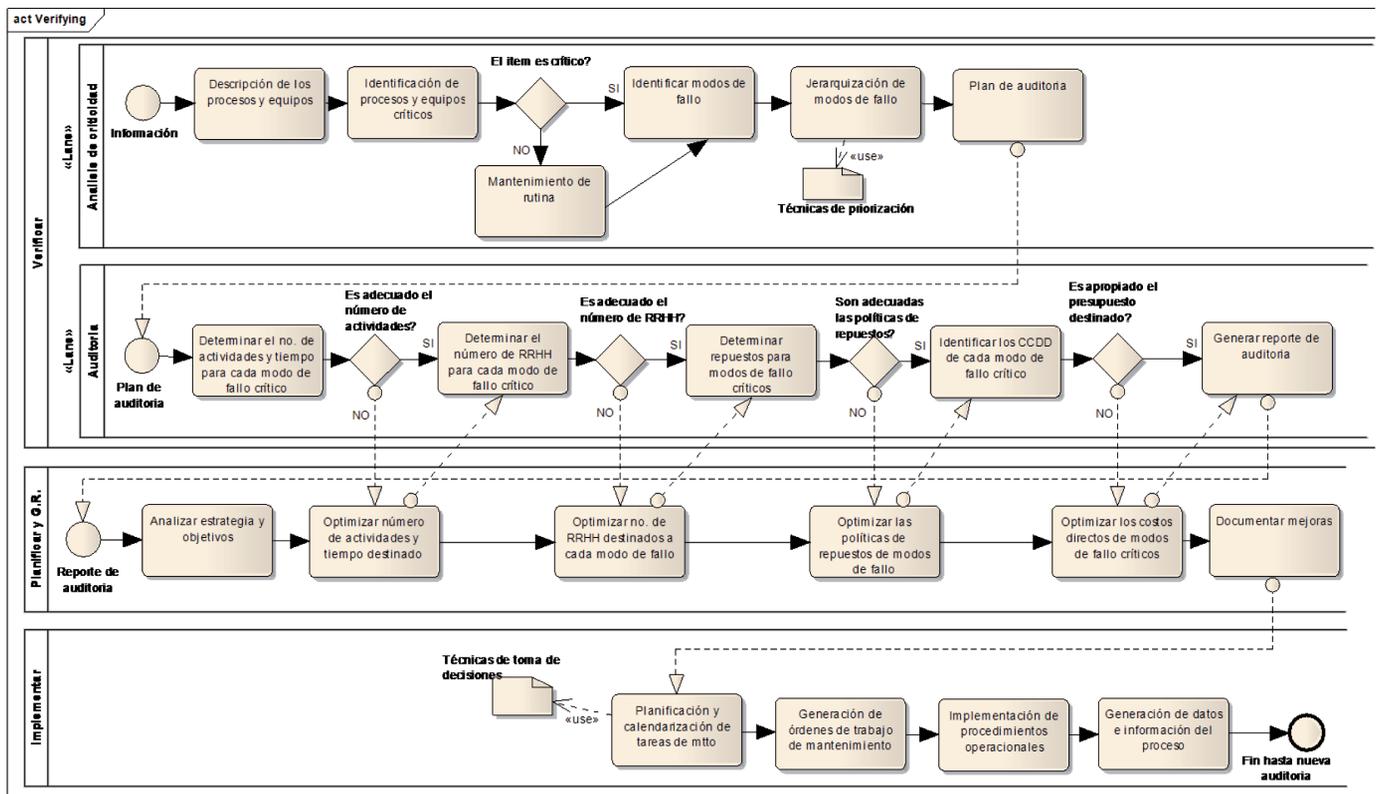


Fig. 2: Diagrama BPMN que expone el intercambio de información entre los procesos

el nuevo proceso de auditoría, como parte del ciclo de mejora continua propuesto por la norma PAS 55.

Así, esta metodología permitirá responder las siguientes cuestiones:

- 1) ¿Cuáles son los modos de fallo críticos de los equipos críticos?, ¿Cuál es la jerarquía de estos modos de fallo?
- 2) ¿Cómo se descomponen los factores de riesgo que inciden en los modos de fallo?
- 3) ¿Qué relación existe entre la indisponibilidad de cada modo de fallo y su riesgo o criticidad respectiva?, ¿Existe coherencia?
- 4) ¿Qué factores deben atenderse para aumentar la disponibilidad y disminuir el riesgo?
- 5) ¿Existe coherencia entre la criticidad del modo de fallo y las características de las actividades planificadas, como el número de actividades, el tiempo empleado en cada actividad y los recursos orientados a estas actividades?
- 6) ¿Qué relación existe entre las actividades correctivas y las actividades planificadas para cada modo de fallo?
- 7) ¿Existe coherencia entre la criticidad y la política de abastecimiento para repuestos?

Para ser capaz de responder a estas preguntas es necesario entrar en detalle sobre la jerarquización de los modos de fallo. A continuación, en la sección 4.3, se describe el algoritmo necesario.

ID del Modo de Fallo:			
Proceso correspondiente:			
Equipo correspondiente:			
Fecha:			
<i>Datos para priorización</i>			
Ol:	Consecuencias (Con):	Probabilidad de fallo (P):	Detectabilidad (D):
Flex:			
MC:			
Ihse:			
Criticidad (C):			
Frecuencia de fallo:			
MTTR:			
<i>Datos para auditoría</i>			
Número de actividades de mtto correctivo:			
Número de actividades de mtto preventivo:			
Tiempo dedicado al mantenimiento correctivo:			
Tiempo dedicado al mantenimiento preventivo:			
RRHH asignados a acciones correctivas:			
RRHH asignados a acciones preventivas:			
Repuestos requeridos para mantenimiento:			
Costos directos de mantenimiento correctivo:			
Costos directos de mantenimiento preventivo:			

Fig.3: Formato propuesto para recopilar información

4.3. PASO A PASO DE LA JERARQUIZACIÓN DE MODOS DE FALLO

Tomando como referencia el diagrama expuesto en la Fig. 2, la metodología de jerarquización es la que sigue.

4.3.1. Determinación de la criticidad de los modos de fallo

El riesgo en mantenimiento puede ser definido como el impacto potencial, ya sea positivo o negativo, sobre un activo, que puede surgir de algún evento presente o futuro. El riesgo

comúnmente se asocia con la probabilidad de que algo ocurra y generalmente de una forma negativa.

Con la finalidad de identificar los riesgos y crear planes para afrontarlos adecuadamente, se hace necesaria la gestión de riesgos. Esta gestión tiene una gran importancia para determinar hacia dónde dirigir los recursos de una manera económicamente efectiva y eficiente, ya que normalmente el número de activos potencialmente riesgosos es mayor que la cantidad de recursos disponibles para gestionarlos [13].

Para un proceso dado, una vez que su equipo crítico y modos de fallo correspondientes han sido identificados. La primera etapa comienza con el cálculo de la criticidad de cada modo de fallo. Esta criticidad se determina teniendo en cuenta el riesgo [36], generalmente traducido como la probabilidad de fallo y las posibles consecuencias; en algunos casos, se integra además la posibilidad de detectar los fallos [5]. Estos factores se calculan por los expertos de proceso. La Ecuación 1 muestra el cálculo de la criticidad:

$$C = P \times Com \times D \tag{1}$$

Donde C es la criticidad del modo de fallo, P es la probabilidad de fallo, Com es el valor total de las consecuencias en caso de que ocurra, y D es el factor de detectabilidad (dificultad de detectar la ocurrencia del modo de fallo). El valor de las consecuencias es obtenido considerando varios factores, expresados en la Ecuación 2.

$$Con = (Ol \times Flex) + MC + Ihse \tag{2}$$

Donde Con es el valor total de las consecuencias, Ol es el impacto operacional del fallo (sus efectos en la operación del sistema y que se expresa por ejemplo en el MTTR), $Flex$ es la flexibilidad operacional (si existe una alternativa de producción y se expresa por ejemplo en el MTBF), MC es el costo de mantenimiento y $Ihse$ es el posible impacto en la salud, seguridad y factores medioambientales. La escala utilizada para evaluar cada criterio debe ser definida por el comité de auditoría.

4.3.2. Priorización de modos de fallo críticos

La priorización se apoya en la construcción de un gráfico de Indisponibilidad vs. Criticidad (ver Figura 4) para distinguir los modos de fallo más o menos críticos de un equipo particular. Este análisis gráfico inicial permite identificar los principales modos de fallo para enfocarse en ellos a través de sucesivos análisis, que exploran criterios como el número de actividades, el tiempo y los recursos humanos asignados, así como el número de piezas de recambio y presupuesto económico disponibles para cada modo de fallo.

La métrica del indicador de disponibilidad/indisponibilidad está condicionada a cada organización, por lo cual esta propuesta metodológica requiere tener claridad en cómo se construye dicho indicador. Algunas preguntas claves en este sentido son: ¿el tiempo utilizado en mantenimiento preventivo es incluido como parte del tiempo *down time*? y ¿el tiempo utilizado en el mantenimiento preventivo es considerado para el cálculo de costo de ineficiencia o costo asociado a la no producción?

Los autores de este artículo asumen que el tiempo preventivo no es considerado para el cálculo de la indisponibilidad, y por lo tanto el eje x de las gráficas siguientes corresponde al número de eventos correctivos. Además, el tiempo dedicado al mantenimiento preventivo no representa un costo de ineficiencia para el sistema, por lo que la asociación con la consecuencia operacional está relacionada solo a los eventos no planificados.

Para los gráficos propuestos en esta metodología (Figuras 4, 5, 6 y 7), se tienen las siguientes consideraciones:

- El eje horizontal cuantifica el *número de fallos* o *eventos de fallo* y el eje vertical cuantifica el *tiempo medio de reparación asociado a esos fallos (Mean Time to Repair, MTTR)*, quedando así definida la indisponibilidad por ambos factores.
- El diámetro de cada círculo representa, relativamente respecto a los demás círculos (distintos modos de fallo), el grado de criticidad o la cantidad de recursos asignados para cada modo de fallo. A mayor criticidad o recursos asignados al modo de fallo, mayor será el diámetro del círculo.
- Los colores internos de cada círculo representan categorías internas dentro de cada criterio. Si se trata de un gráfico de criticidad, los colores identifican el tipo de riesgo. Si se trata de un gráfico de recursos asignados, la distinción de colores se hace para diferenciar intervenciones de tipo preventivo o correctivo.
- Figuras triangulares y círculos, rellenos o blancos, representan condiciones particulares de los gráficos referentes a la naturaleza de las piezas de recambio (Figura 6), o al estado del modo de fallo antes o después de una intervención de mejora (Figura 7).
- El gráfico que inicia el análisis y que dirige la subsiguiente exploración, es el gráfico Indisponibilidad vs. Criticidad (Figura 4). Los demás gráficos (Figuras 5, 6, 7) pueden o no utilizarse en función de los requerimientos de información y características particulares del caso de estudio, aunque se recomienda el análisis completo para obtener resultados más valiosos.

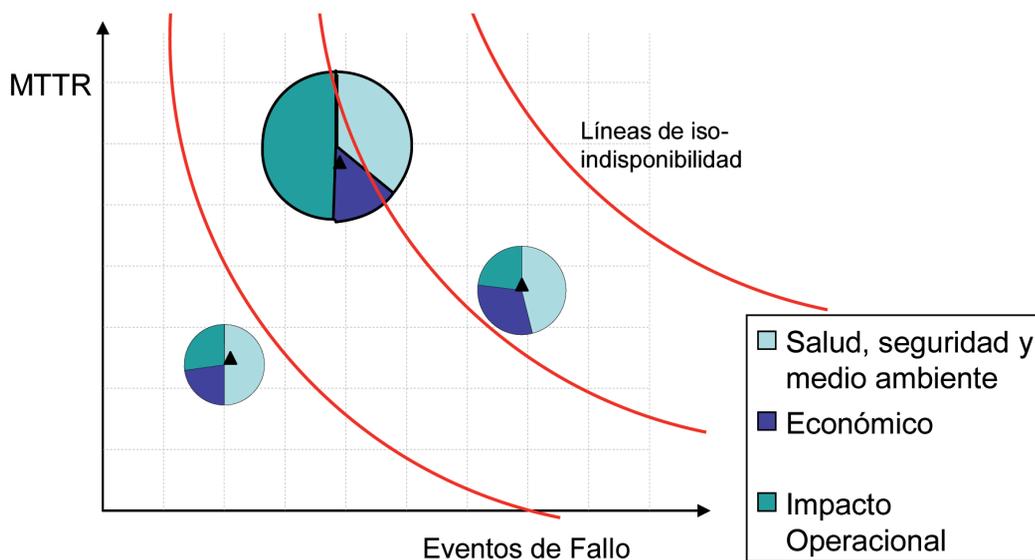


Fig. 4: Representación gráfica de Indisponibilidad vs. Criticidad

Específicamente, para el gráfico Indisponibilidad vs. Criticidad de la Figura 4, cada círculo representa una medida de la criticidad de cada modo de fallo y cada porción de color interna al círculo se refiere al tipo proporcional de las consecuencias asociadas (salud, seguridad y riesgo ambiental, el riesgo económico o riesgo de impacto operacional). Este análisis evidentemente está acotado a un equipo particular y sus respectivos modos de fallo, en un periodo de tiempo acotado y que se dispone de la suficiente información para realizar los análisis.

El análisis de este gráfico (Figura 4) proporciona respuesta a la pregunta 1 (¿Cuáles son los modos de fallo críticos de los equipos críticos?, ¿Cuál es la jerarquía de estos modos de fallo?), ya que es posible determinar el grado de criticidad de cada modo de fallo y hacer la observación de los riesgos asociados. También se responde a la pregunta 2 (¿Cómo se descomponen los factores de riesgo que afectan a los modos de fallo?) Las partes de color de los círculos muestran cómo se descomponen los factores de riesgo para cada modo de fallo. Igualmente se responde a la pregunta 3 (¿Cuál es la relación entre la indisponibilidad asociada al modo de fallo y su criticidad?, ¿Hay coherencia?), ya que es posible observar la relación entre el radio del círculo y la línea de indisponibilidad en el centro de la gráfica. Finalmente, el gráfico también responde a la pregunta 4 (¿Qué factores deben atenderse para aumentar la disponibilidad y reducir los riesgos?), ya que la criticidad de cada modo de fallo queda de manifiesto.

Una vez identificados los modos de fallo, de mayor o menor criticidad, es necesario analizar la cantidad de recursos asignados a ellos, mediante el uso de varios gráficos más. La metodología para el desarrollo de este análisis se presenta a continuación. El orden de análisis se ha establecido según la secuencia de información a consultar en cualquier base de datos.

4.3.3. Análisis del número de actividades de mantenimiento asignadas a los modos de fallo

Este análisis gráfico compara los modos de fallo críticos con el número de actividades de mantenimiento asignadas (ver Figura 5) mediante una comparación de Indisponibilidad (número de eventos de fallo y MTTR) vs. Número de actividades de mantenimiento asignadas. El radio de la circunferencia asociada a cada modo de fallo representará el número total de actividades de mantenimiento (preventivas y correctivas) desarrolladas durante el tiempo de evaluación correspondiente.

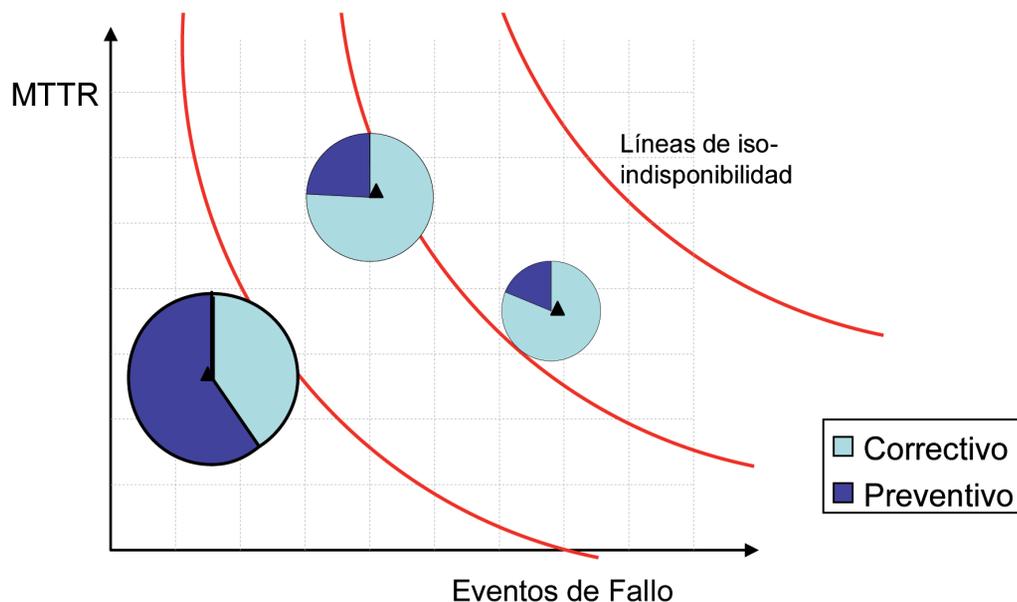


Fig. 5: Representación gráfica de Indisponibilidad vs. Recursos (actividades, tiempo, personal) asignados al modo de fallo

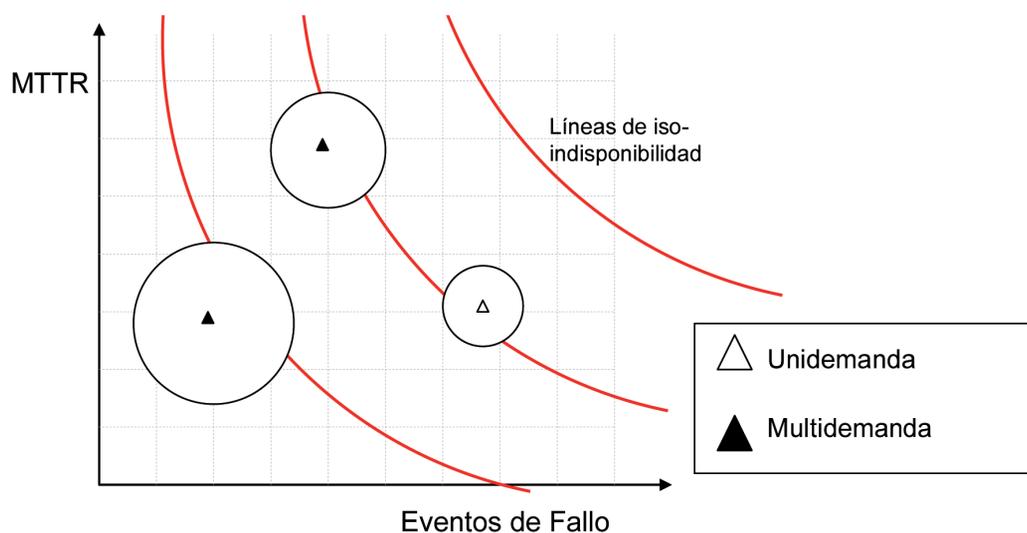


Fig. 6: Representación gráfica de Indisponibilidad vs. Piezas de recambio disponibles asignadas

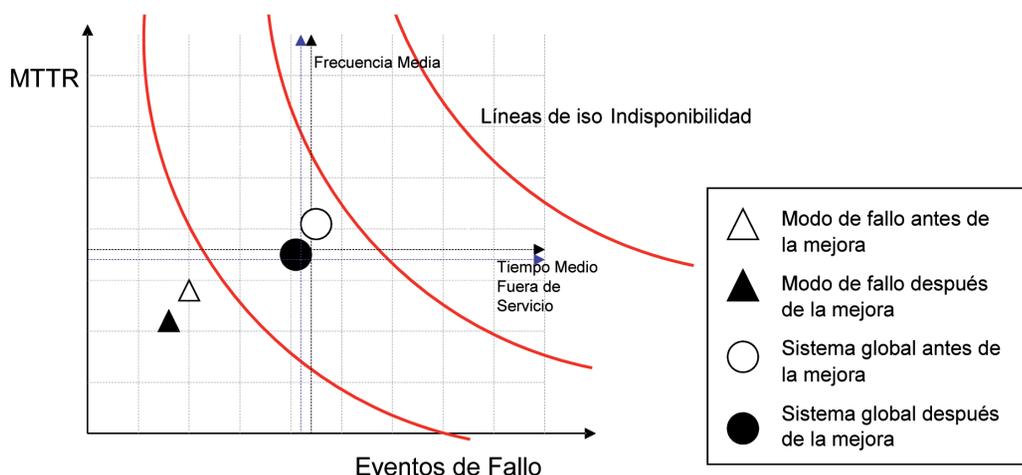


Fig. 7: Representación gráfica de seguimiento

A pesar de que el número de actividades correctivas ya está especificado inherentemente en el gráfico (eje x), cada círculo que representa un modo de fallo está dividido proporcionalmente para analizar la relación entre el número de actividades preventivas vs. correctivas. Este gráfico ayuda a responder parcialmente las preguntas número 5 y 6 (¿Existe coherencia entre la criticidad del modo de fallo y las características de las actividades planificadas?)

4.3.4. Análisis del tiempo asignado a las actividades de mantenimiento para cada modo de fallo

Otro factor importante para analizar la eficacia de las intervenciones de mantenimiento sobre el equipo seleccionado es el tiempo utilizado para prevenir o corregir los modos de fallo críticos. Un gráfico de Indisponibilidad vs. Tiempo asignado ayuda a analizar este criterio. El tamaño de las circunferencias representa el tiempo total asignado para ejecutar las actividades de mantenimiento y cada porción coloreada indica si la actividad corresponde al tiempo utilizado en las actividades de mantenimiento preventivo o correctivo (Figura 5). Este gráfico ayuda a responder parcialmente las preguntas número 5 y 6 respectivamente.

4.3.5. Análisis del número de recursos humanos asignados a cada modo de fallo

Un gráfico de Indisponibilidad vs. Número de recursos humanos asignados a cada modo de fallo

es la herramienta sugerida para analizar la eficacia de la asignación de personal a las intervenciones de mantenimiento. El tamaño de las circunferencias representa el número de personal asignado y cada porción coloreada indica proporcionalmente si la actividad corresponde a mantenimiento preventivo o correctivo (Figura 5). Este gráfico, en conjunto con los representados en la Figura 5 y 6, responde completamente las preguntas 5 y 6.

4.3.6. Análisis de piezas de recambio disponibles por cada modo de fallo

El análisis de las piezas de recambio asociadas a los modos de fallo críticos puede hacerse mediante una gráfica de Disponibilidad vs. Número de piezas de recambio disponibles (Figura 6). El tamaño de las circunferencias representa la cantidad de piezas de recambio disponibles en almacén. Además, dado que la pieza de recambio pudiese ser demandada por múltiples equipos, áreas y/o bodegas satélites al interior de la empresa, es necesario hacer la diferencia en la representación gráfica, lo cual se logra agregando un color en el centro de la circunferencia, el cual indicará si el repuesto tiene uno o más demandantes. Si el centro es oscurecido, implica que existe más de un demandante. Con esto se responde la pregunta 7 (¿Existe coherencia entre la criticidad y la política de abastecimiento para repuestos?). Evidentemente, este análisis proporciona datos de entrada iniciales para que el analista de Ingeniería de confiabilidad o mantenimiento haga una investigación en mayor detalle para la definición de planes de acción y/o identificación de oportunidades de mejora.

4.3.7. Análisis del presupuesto asignado a los costos directos

El análisis de los recursos económicos asignados a cada modo de fallo crítico puede hacerse a través de un gráfico de Disponibilidad vs. Costos directos. El tamaño de las circunferencias en este caso representa el monto de los costos directos asignados para ejecutar las actividades de mantenimiento y cada porción coloreada indica si la actividad corresponde a mantenimiento preventivo o correctivo (Figura 5). Este gráfico ayuda a responder a la pregunta número 5.

4.4. DESPUÉS DE LA JERARQUIZACIÓN

Además de los anteriores, es posible generar otros gráficos que añaden información acerca de los modos de fallo críticos. Como se ha mencionado previamente, la metodología propuesta se puede utilizar para visualizar los resultados obtenidos en la asignación de recursos para el mantenimiento y así mejorar la toma de decisiones. La metodología propuesta además hace posible:

- 1) revisar la eficacia y la eficiencia de la asignación de recursos para el mantenimiento,
- 2) dar seguimiento a la ejecución de mejoras,
- 3) comparar alternativas y
- 4) determinar las necesidades de piezas de recambio.

Por ejemplo, con el fin de analizar los resultados de un plan de mejora, un seguimiento gráfico puede ser generado (ver Figura 7). En este tipo de gráfico, un modo de fallo crítico se representa mediante una figura geométrica (un triángulo en

la Figura 7) de color diferente para representar el comportamiento antes o después de las mejoras. Otra figura geométrica (un círculo en la Figura 7) representa el comportamiento general del sistema, utilizando un color diferente para representar si el estado es observado antes o después de las mejoras. De esta manera, un auditor puede evaluar las mejoras en el plan de mantenimiento, teniendo en cuenta si han sido eficaces, o si es necesario hacer algunos ajustes en el plan nuevo. Esto es muy importante porque, a través de un seguimiento regular, es posible evaluar si los objetivos del sistema se cumplen.

5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

Una asignación adecuada de recursos (materiales y humanos) a los modos de fallo críticos es esencial para optimizar el mantenimiento y las funciones de producción, y por lo tanto el cumplimiento de las metas organizacionales. En este trabajo se han resumido las técnicas más utilizadas dentro de la función de mantenimiento y hemos propuesto una nueva metodología para auditar y mejorar la asignación de recursos, de acuerdo a la criticidad de los modos de fallo identificados. Además, esta metodología puede ser utilizada como parte del estándar PAS 55, para revisar los cambios después de aplicar un proceso de mejora, para comparar alternativas, o para determinar las necesidades de piezas de repuesto. La criticidad de los modos de fallo, en términos de frecuencia de fallos, indisponibilidad y consecuencias de los fallos, se representa gráficamente en comparación con la cantidad y tipo de los recursos asignados. Un diagrama BPMN se ha utilizado en este documento para ilustrar la metodología propuesta, que básicamente se compone de tres procesos: la verificación (que incluye jerarquización y auditoría), la planificación (que incluye la gestión de recursos) y la implementación. Una propuesta para una futura investigación relacionada, sería la aplicación práctica de la metodología en un equipo crítico de la industria. Concretamente se está trabajando sobre una auditoría a los modos de fallo críticos identificados en una minera Chilena. Además, dado que es un problema transversal en el área de mantenimiento, también se están desarrollando casos de estudio para las industrias de servicio de tratamiento de aguas servidas y celulosa. El éxito de esta propuesta está en la facilidad de aplicación, escalabilidad para diferentes procesos y por supuesto, la automatización para su rápida implementación y análisis de oportunidades de mejora.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Ingeniera Civil Industrial Nicole Jaramillo Miranda por la participación activa en el desarrollo de esta investigación.

Esta investigación está financiada por el Ministerio Español de Ciencia e Innovación a través del proyecto EMAINSYS (DPI2011-22806) "SISTEMAS INTELIGENTES DE MANTENIMIENTO. PROCESOS EMERGENTES DE E-MAINTENANCE PARA LA SOSTENIBILIDAD DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN". Igualmente la investigación ha

recibido fondos FEDER y financiación del Séptimo Programa Marco de la Comunidad Europea (FP7/2007-2013 en virtud de acuerdo de subvención n° PIRSES-GA-2008-230.814).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] López Campos M, Crespo Márquez A. "Modelling a maintenance management framework based on PAS 55 standard". *Quality and Reliability Engineering International*. 2011. Vol. 27-6, p. 805-820. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/qre.1168>.
- [2] Barberà L, Crespo A, Viveros P, et al. "Advanced Model for Maintenance Management in a continuous improvement cycle: integration into the business strategy". *Int. J. Systems Assurance Engineering and Management*. 2012. Vol. 3-1, p.47-63. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s13198-012-0092>.
- [3] Cavalieri S, Garetti M, Macchi M, et al. "A decision-making framework for managing maintenance spare parts". *Production planning and control*. 2008. Vol.19-4, p. 379-396. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/09537280802034471>.
- [4] Object Management Group Website. *Business Process Model and Notation*. <http://www.bpmn.org/> [August 10th, 2013].
- [5] Moubray J. *Reliability-Centred Maintenance*. 2a edición. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997. ISBN: 0 7506 3358 1.
- [6] Goti Elordi A, Egaña Errasti MM, Iturrizxa Pérez de Albéniz A. "El estado del mantenimiento industrial en España. Encuesta sobre el estado del mantenimiento industrial y la aplicación de herramientas de apoyo a la decisión en el ámbito". *DYNA*. 2009. Vol. 84, p.225-230.
- [7] Galar Pascual D, Berges Muro LF, Royo Sánchez J. "La problemática de la medición del rendimiento en la función mantenimiento". *DYNA*. 2010. Vol.85, p.429-438. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/3447>.
- [8] EN 13306:2001. *Maintenance terminology*. European Standard CEN (European Committee for Standardization). Brussels, 2001.
- [9] Adjabi S, Adel-Aissanou K, Azi M. "Optimization of the maintenance function at a company. Safety, Reliability and Risk Analysis: Theory, Methods and Applications". En *Proceedings of the Joint ESREL and SRA-Europe Conference* 2009. P. 611-617.
- [10] Stamatis DH. *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution*. Milwaukee: Asq Press, 2003.
- [11] Bowles JB, Peláez CE. "Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis". *Reliability Engineering and System Safety*. 1995. Vol. 50-2, p. 203-213.
- [12] Knights PF. "Down time priorities, Jack-knife diagrams, and the business cycle". *Maintenance Journal*. 2004. Vol. 17- 2, p.14-21.
- [13] Crespo Márquez A. *The Maintenance Management Framework: models and methods for complex systems maintenance*. Springer-Verlag: London, 2007. ISBN: 978-1-84628-820-3.
- [14] Marhavidas PK, Koulouriotis DE. "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*. 2008. Vol. 21-6, p. 596-603. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2008.04.009>. ISSN: 0950-4230.
- [15] Ghosh D, Roy S. "A decision-making framework for process plant maintenance". *European Journal of Industrial Engineering*. 2009. Vol. 4-1, p. 78-98.
- [16] Qi HS, Alzaabi RN, Wood AS, Jani M. "A fuzzy criticality assessment system of process equipment for optimized maintenance management". *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/0951192X.2013.814160>.
- [17] Pascual R, Del Castillo G, Louit D, et al. "Business-oriented prioritization: A novel graphical technique". *Reliability Engineering and System Safety*. 2009. Vol. 94, p. 1308-1313. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2009.01.013>.
- [18] Dehghanian P, Fotuhi-Firuzabad M, Bagheri-Shouraki S, et al. "Critical Component Identification in Reliability Centered Asset Management of Power Distribution Systems Via Fuzzy AHP". *IEEE Systems Journal*. 2012. Vol.6-4, p. 593-602. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JSYST.2011.2177134>.
- [19] Bevilacqua M, Braglia M. "The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection". *Reliability Engineering Et System Safety* 2000. Vol. 70-1, p. 71-83.
- [20] Shahin A, Attarpour MR. "Developing decision making grid for maintenance policy making based on estimated range of overall equipment effectiveness". *Modern Applied Science*. 2011. Vol. 5-6, p. 86-97.
- [21] Pascual R, Godoy D, Louit DM. "Throughput centered prioritization of machines in transfer lines". *Reliability Engineering and System Safety*. 2011. Vol. 96, p. 1396-1401. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2011.05.006>.
- [22] Martínez LB, Márquez AC, Gunckel PV, et al. "The Graphical Analysis for Maintenance Management Method: A Quantitative Graphical Analysis to Support Maintenance Management Decision Making". *Quality and Reliability Engineering International*. 2013. Vol. 29-1, p. 77-87. DOI: 10.1002/qre.1296.
- [23] Martorell S, Muñoz A, Serradell V. "An approach to integrating surveillance and maintenance tasks to prevent the dominant failure causes of critical components". *Reliability Engineering and System Safety*. 1995. Vol.50-2, p. 179-187.
- [24] Kennedy WJ, Wayne Patterson J, Fredendall LD. "An overview of recent literature on spare parts inventories". *International Journal of Production Economics*. 2002. Vol. 76, p.201-215. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273\(01\)00174-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273(01)00174-8).
- [25] Dekker R, Kleijn M, De Rooij P. "A spare parts stocking policy based on equipment criticality". *International Journal of Production Economics*. 1998. Vol. 56/57-3, p. 69-77. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273\(97\)00113-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273(97)00113-8).
- [26] Mukhopadhyay SK, Joshi SN. "Methodology for identification of critical equipment for preventive maintenance". *Journal of the Institution of Engineers (India): Mechanical Engineering Division*. 1983. Vol. 64, p. 62-65.
- [27] Flores BE, Whybark DC. "Implementing multiple criteria ABC analysis". *Journal of Operations Management*. 1987. Vol. 7(1-2), p. 79-85.
- [28] Li SG, Kuo X. "The inventory management system for automobile spare parts in a central warehouse". *Expert Systems with Applications*. 2008. Vol. 34-2, p. 1144-1153. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2006.12.003>.
- [29] Molenaers A, Baets H, Pintelon L, et al. "Criticality classification of spare parts: A case study". *International Journal of Production Economics*. 2011. En prensa. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.08.013>.
- [30] Al-Muhaisen M, Santarisi N. "Auditing of the maintenance system of Fuhais plant/Jordan Cement Factories Co". *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2002. Vol. 8-1, p. 62-76. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/13552510210420595>.
- [31] Carnero C, Delgado S. "Maintenance audit by means of value analysis technique and decision rules: A case study in a bank". *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2008. Vol. 14-4, p. 329-342. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/13552510810909948>.
- [32] Macián V, Tormos B, Salavert JM, et al. "Methodology and theory: Methodology applied for maintenance technical audit in urban transport fleets". *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2010. Vol. 16-1, p. 34-43. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/13552511011030318>.
- [33] Bana e Costa CA, Carnero MA, Duarte OM. "A multi-criteria model for auditing a Predictive Maintenance Programme". *European Journal of Operational Research*. 2012. Vol. 217-2, p.381-393.
- [34] The Woodhouse Partnership Ltd. PAS 55 Web. <http://pas55.net/spanish/default.asp> [August 10th, 2013].
- [35] PAS 55-1:2008. *Asset Management*, BSI, U.K. 2008.
- [36] ISO 31000, 2002. *Current Draft Vocabulary for Risk Management – ISO/IEC Guide 73:2009*.