

Algoritmo para la asignación de actividades de Mantenimiento utilizando la gestión de conocimiento

Algorithm for assignment of maintenance activities through knowledge management

Cristian García García^{1*} Javier Cárcel Carrasco² Mary Vergara Paredes³
Francklin Rivas Echeverría⁴ Franklin Camacho⁵

Recibido 14 de septiembre de 2020, aceptado 23 de diciembre de 2021

Received: September 14, 2020 Accepted: December 23, 2021

RESUMEN

El presente estudio se centra en generar una propuesta metodológica para la asignación de recursos humanos en la ejecución de tareas de mantenimiento. Ésta considera: La implementación de un algoritmo que supone un conjunto de actividades de mantenimiento (recursos o tareas), un conjunto formado por el personal de mantenimiento (agentes), una relación de plausibilidad sobre los recursos, una relación jerárquica sobre los agentes y la preferencia que los agentes tienen sobre los recursos. Estos supuestos llevan a una jerarquización del personal e identificación de las tareas críticas. Esta jerarquización toma como parte fundamental a la gestión del conocimiento ya que, la función de mantenimiento requiere de conocimientos técnicos muy específicos, normalmente almacenados de manera tácita entre el personal que opera en estas áreas. La metodología se complementa con una jerarquización de las tareas usando la metodología de análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFE). Los resultados aplicados a una flota de vehículos muestran que se necesitan otros supuestos para obtener criterios equitativos y justos en la asignación de las tareas de mantenimiento, los cuales se consideran como ponderaciones en una función de la gestión de conocimiento que incluyen: Criterios de experiencia profesional, experiencia en la empresa, talante y autoformación.

Palabras clave: Factor humano, asignación de recursos, mantenimiento industrial.

ABSTRACT

The present study focuses on generating a methodological proposal for the allocation of human resources in the execution of maintenance tasks. This considers the implementation of an algorithm that assumes a set of maintenance activities (tasks or resources), a set of maintenance personnel (agents), a plausibility relationship over resources, a hierarchical relationship over agents and the preference that Agents have about resources. These assumptions lead to a hierarchy of personnel and identification of critical tasks. These hierarchy of personnel takes the management of knowledge as a fundamental part since; the maintenance function requires very specific technical knowledge, normally tacitly stored among

¹ Universidad Politécnica Salesiana, Carrera Ingeniería Automotriz. Cuenca, Ecuador. E-mail: cgarcia@ups.edu.ec

² Universitat Politècnica de València, Departamento de Construcciones Arquitectónicas. Valencia, España.
E-mail: fracarcl@csa.upv.es

³ Universidad Politécnica Salesiana, Carrera Ingeniería Automotriz. Guayaquil, Ecuador. E-mail: mvergarap@ups.edu.ec

⁴ Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Informática. Valparaíso, Chile. E-mail: firivas@inf.utfsm.cl

⁵ Universidad Yachay Tech, Departamento de Matemáticas. Ibarra, Ecuador. E-mail: cfranklinj@gm ail.com

* Autor de correspondencia: cgarcia@ups.edu.ec

the personnel operating in these areas. The methodology is complemented by a new hierarchy of tasks using the methodology of analysis of failure modes, effects and criticality (AMFE). The results applied to a fleet of vehicles show that other assumptions are needed to obtain reasonable and fair criteria in the allocation of maintenance tasks, which are considered as weightings in a knowledge management function that include: Professional experience criteria, experience in the company, talent and self-training.

Keywords: Human factor, resource allocation, industrial maintenance.

INTRODUCCIÓN

Los autores en [1] mencionan que la diferencia entre una empresa buena y una empresa excelente, no se encuentra solo en la tecnología, sino en la potenciación de su capital humano. A pesar de que la tecnología cada vez va reemplazando al hombre en las empresas dedicadas a la producción, estas aun necesitan de la presencia de operarios para dirigir y mantener sus máquinas tal como se menciona en [2].

Es este aspecto, el mantenimiento dentro de la industria moderna ha experimentado una serie de profundas transformaciones a nivel tecnológico [3, 4], organizacional [5, 6], económico, social y humano [7, 8]. Es así que según los autores en [9], [10, 11], mencionan que todo proceso de gestión de activos requiere trabajar sobre tres principios básicos; el uso del talento humano adecuado, una correcta gestión del conocimiento y la creación de un proceso para tomar las decisiones correctas.

En este orden de ideas [12] comenta que los sistemas industriales involucran la interacción entre humanos y máquinas, mencionando que una de las principales causas de la aparición de modos de falla, se debe a sucesos provocados por seres humanos; los cuales son conocidos como “factores humanos”, entre los cuales se considera el entrenamiento y experiencia como uno de los principales [13, 14]. El error humano debe evitarse para no incurrir en pérdidas humanas y económicas. A pesar de la complejidad y tamaño actual de los sistemas, se seguirá dependiendo de la intervención humana para la operación segura de los equipos, por ello es importante que en actividades de mantenimiento se reduzcan los riesgos asociados al “error humano”, provocado por el personal de mantenimiento tal como se menciona en [15, 16].

En este sentido, [17] enuncia que la minimización de errores humanos es la clave para aumentar la confiabilidad operativa, que es la interrelación óptima

entre la confiabilidad del equipo, la confiabilidad de los procesos y la confiabilidad humana, siendo así, que una parte crucial para la gestión del mantenimiento de activos precisa y efectiva es la acción de las personas. Por ello, como se menciona en [12], es de suma importancia generar propuestas para la correcta asignación de personal para ejecución de las tareas de mantenimiento.

Una primera propuesta de asignación es estudiada en [18, 19], el los cuales se utiliza un marco matricial para tratar el problema de la asignación de recursos bajo incertidumbre en el contexto de un enfoque cualitativo. Los datos cualitativos básicos son una relación de plausibilidad sobre los recursos, una relación jerárquica sobre los agentes y la preferencia que los agentes tienen sobre los recursos. El modelo planteado en [19], define una serie de asignaciones a las tareas de mantenimiento “conjunto de buenas asignaciones”, pero no permite diferenciar si una asignación es justa o no. Con base en este modelo de asignación, se busca generar una propuesta metodológica para la asignación de recursos humanos en la ejecución de tareas de mantenimiento, la cual se base en principios de equidad y justicia.

El presente trabajo, propone una metodología para la asignación del personal de mantenimiento, la asignación considera una jerarquización del personal basada en un baremo construido por un grupo de expertos de la empresa e investigadores; como parte esencial de la jerarquización del personal se considera la gestión del conocimiento tácito almacenado en los operarios. Además, la metodología contempla un proceso de jerarquización de los equipos utilizando técnicas de Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMFE, AMEF, o en inglés FMEA o FMECA).

MÉTODOS

La metodología de asignación de recursos se aplicará a una flota de vehículos que incluyen vehículos

pesados y maquinaria, con un total de 49 vehículos, siendo cinco las personas que se encargan de ejecutar las tareas de mantenimiento.

Las diferentes tareas de mantenimiento que de ahora en adelante se denominan “recursos”, asignadas sobre un conjunto finito de talento humano “agentes” es la principal ocupación de un gestor de conocimiento; que es la persona interna de la organización con carácter emprendedor y con amplia experiencia en las funciones de mantenimiento industrial, que conoce de primera mano el desempeño diario de las acciones de mantenimiento, su manera de funcionamiento en el entorno de la empresa, y acostumbrado a utilizar herramientas organizativas e informáticas.

Bajo este precedente, se desarrolla la asignación de los recursos de mantenimiento al talento humano disponible considerando como base el algoritmo desarrollado por [19], el cual establece una relación binaria cualitativa entre asignaciones de modo que un conocimiento previo, se traduce en cantidades con pesos que son dados de acuerdo a criterios de expertos.

El algoritmo genera varias matrices inherentes a las mejores posibilidades de realizar o no una tarea específica y que en definitiva jerarquiza los agentes de forma global.

En la propuesta se diferencia al grupo de agentes como un conjunto “A”.

$$A = \{1,2,3,\dots, n\}$$

En el conjunto “A”, los agentes se encuentran en orden de Jerarquía de acuerdo con una gestión de conocimiento global, cualidades de experiencia en la empresa y formación en el área.

Los recursos “actividades de mantenimiento”, se encuentran jerarquizados en el conjunto “R”, tomando como referencia la metodología de análisis de modos de falla y efectos (AMFE), el objetivo de la técnica es calcular un índice de Prioridad de Riesgo “IPR”, en base a tres criterios Severidad, Ocurrencia y Detección.

$$R = \{1,2,3,4,5,6 \dots, m\}$$

Siendo así, que el índice IPR es el producto de la Severidad, Ocurrencia y Detección. En la Tabla 1

se resume la valoración y criterios utilizados para el cálculo del IPR en la propuesta global de gestión.

Jerarquización de agentes “J_a”

Para la jerarquización de los agentes “Ja” se valoraron los siguientes aspectos: Experiencia profesional, experiencia en la empresa, talante y autoformación, en la Tabla 2 se muestra la valoración máxima dada por los expertos a los diferentes subcriterios utilizados.

En el criterio de experiencia profesional se valoran dos subcriterios:

- Manejo de órdenes de trabajo. Asignando un valor de cinco si el agente ha ejecutado órdenes de trabajo.
- Experiencia en reparación. Asignando un valor de cinco si el agente cuenta con una experiencia profesional mayor a tres años.

En el criterio de experiencia en la empresa, se valora si el agente fue responsable de la ejecución de recursos de mantenimiento, valorando con 10 si el agente ejecutó al menos dos recursos y con 20 si el agente ejecuto un número igual o mayor a tres recursos.

Para el criterio de talante se valoraron tres subcriterios:

- Edad del operario. Para edades comprendidas entre 20-5 se valora con uno, en edades comprendidas entre 25-35 años se valora con dos; para edades entre 35-45 años se valora con tres. Estos valores fueron definidos por un grupo de expertos formado por ingenieros de la empresa e investigadores, que en base a su experiencia y naturaleza de la actividad a la que se dedica la empresa ponderaron este subcriterio.
- Idioma: Se pondera con valor de uno si el agente lee ó habla y tres cuando lee y habla en idioma inglés; este subcriterio cobra importancia al momento de la lectura de catálogos de servicio de la maquinaria.
- Trabajo en equipo: Se pondera con cuatro si el agente desarrolla el trabajo en equipo y cero en el caso contrario.

Para el criterio de autoformación se valoran los siguientes subcriterios:

- Conocimiento. Este subcriterio se pondera con un valor máximo de cuarenta, será máximo cuando el conocimiento tácito haya sido convertido

Tabla 1. Jerarquización de criterios para cálculo de IPR.

	Criterio	Valor
Severidad		
Muy bajas repercusiones "No perceptibles"	No es probable que el fallo origine un defecto sobre el sistema.	1
Bajas repercusiones "Apenas perceptibles"	El fallo originaría un pequeño inconveniente al sistema. Es fácilmente subsanable.	2-3
Moderada "defectos de relativa importancia"	El fallo causa problemas al sistema.	4-6
Alta	El fallo puede ser crítico e inutilizar el sistema.	7-8
Muy baja	Fallo muy crítico, que afecta a la seguridad del sistema y su funcionamiento.	9-10
Ocurrencia		
Muy baja o improbable	El fallo tiene una baja probabilidad de que suceda.	1
Baja	El fallo es poco probable que suceda.	2-3
Moderada	El fallo aparece de forma ocasional	4-5
Alta	El fallo se presenta con cierta frecuencia.	6-8
Muy alta	El fallo es casi inevitable. Es muy probable que el fallo se produzca con mucha frecuencia.	9-10
Detección		
Muy alta	El defecto es probable que se detecte por medidas de ensayo control previsto.	1
Alta	El defecto es fácilmente detectable.	2-3
Mediana	El defecto es detectable.	4-6
Pequeña	El defecto es difícil detectarlo con medidas de ensayo y control previstas.	7-8
Improbable	El defecto no puede detectarse y casi seguro que el fallo cause inconvenientes en el sistema.	9-10

Tabla 2. Valoración para la jerarquización de los agentes.

Criterio	Subcriterio	Valoración Máxima
Experiencia profesional Valor Máximo (10)	Manejo de órdenes de trabajo	5
	Experiencia en reparación	5
Experiencia en la Empresa Valor Máximo (20)	Más de tres recursos de mantenimiento ejecutados	20
	Dos recursos de mantenimiento ejecutados	10
Talante Valor Máximo (10)	Edad del operario	3
	Idioma Ingles	3
	Trabajo en equipo	4
Autoformación Valor Máximo (60)	Conocimiento	40
	Nivel de estudio	10
	Capacitación en el área técnica	10
Valoración máxima del Agente		100%

en explícito, es decir, cuando el personal sepa responder de forma eficiente cuando ocurra un modo de fallo específico. Para el caso de estudio de presente artículo, el conocimiento tácito ya fue transmitido a los diferentes agentes mediante procesos de capacitación técnica.

- Nivel de estudio. Este subcriterio se pondera con dos si el agente presenta una formación a nivel de secundaria, con cinco si está en un nivel técnico y diez a nivel de Ingeniería.
- Capacitación. Si el agente recibió una capacitación mayor a sesenta horas se pondera con un valor

de diez y si la capacitación se encuentra entre las veinte y sesenta horas se pondera con un valor de cinco.

Parte fundamental de la metodología está asociada a la cuantificación del conocimiento. En el estudio desarrollado en [20] se identifica al conocimiento como una de las principales causas del error humano en la ejecución de recursos de mantenimiento, por ello la gestión del conocimiento toma una gran valoración en la jerarquización de los agentes (40%). Por las peculiaridades propias que se dan en los recursos de inspección y operación, el conocimiento de los operarios y técnicos que operan en las áreas de mantenimiento está fuertemente ligado a su experiencia (componente tácito), difícil de medir y articular, y sin embargo, en numerosas ocasiones, esta rotura de la información-conocimiento, puede suponer un alto coste para la empresa, debido al incremento de los tiempos de parada y servicios, pérdidas de eficiencia energética o tiempo de acoplamiento de personal nuevo [21]. Por ello, se utilizó una metodología propuesta en [22] para cuantificar el conocimiento de la empresa. La propuesta de gestión del conocimiento trata de apoyar a la disminución del error humano.

Ponderación del conocimiento

En primera instancia se valora el conocimiento de un elemento para cada factor estratégico (General, Fiabilidad, Eficiencia Energética, Operación y explotación), a continuación, se describen los factores mencionados:

- Conocimiento general: Brinda una visión general que ayuda a posicionarse y entender de manera global las características de un elemento, sub-sistema, sistema y empresa.
- Conocimiento de Fiabilidad: Se relaciona al conocimiento y experiencias en relación a la fiabilidad y resolución de fallos, averías, y propuestas o soluciones para aumentar la fiabilidad que redundan estratégicamente en la empresa.
- Conocimiento Eficiencia Energética: El conocimiento y experiencias en relación a la eficiencia energética y en general los procesos de gestión de la energía para su uso eficiente.
- Conocimiento Mantenibilidad: El conocimiento y experiencias en relación a la mantenibilidad y disponibilidad de los equipos e instalaciones, tanto en mantenimiento preventivo, correctivo y predictivo.

- Conocimiento Operación/Explotación: Aquellas maniobras de explotación u operación de las instalaciones y equipos, que redundan en la mejora operativa de producción o servicios a prestar.

A continuación, se evalúa el peso del conocimiento (PCe_i), Valor del conocimiento (VCe_i) y Valor del conocimiento total del elemento ($VCeT$):

- Peso del conocimiento (PCe_i): Se fija en función de la incidencia de cada uno de los factores estratégicos, del elemento o sistema considerado, ponderado en función del grado de importancia, del elemento estudiado, en el entorno considerado. Se realiza por un grupo de expertos de la empresa, siendo el peso total 100%.
- Valor del conocimiento (VCe_i): En función de cada uno de los factores estratégicos, toman valores del 0% al 100%, en función de los datos y conocimiento tácito que se ha convertido en explícito.
- Valor del conocimiento total del elemento ($VCeT$): Ponderado en función de todos los componentes del conocimiento que afectan al elemento, formulado mediante:

$$VCeT = \sum PCe_i \times VCe_i \quad (1)$$

La ecuación (1) indica que el Valor del conocimiento total del elemento ($VCeT$) es igual a la sumatoria del producto del peso de conocimiento (PCe_i) y el valor del conocimiento (VCe_i) asociado a cada elemento.

En la Figura 1 se muestran los diferentes factores estratégicos (General, Fiabilidad, Eficiencia Energética, Operación y explotación) que serán valorados por expertos para la cuantificación del conocimiento tácito en los recursos de mantenimiento.

En este orden de ideas, en la Tabla 3 se muestran los resultados de los cinco agentes, jerarquizados según la metodología propuesta, ordenados de mayor a menor.

Criticidad de los recursos “C_i”

Para la jerarquización de los recursos de mantenimiento, y debido al número de unidades se identificaron en primera instancia los equipos y sistemas más críticos haciendo uso del Análisis de Pareto, siendo una técnica muy utilizada en estudios de criticidad en activos industriales.

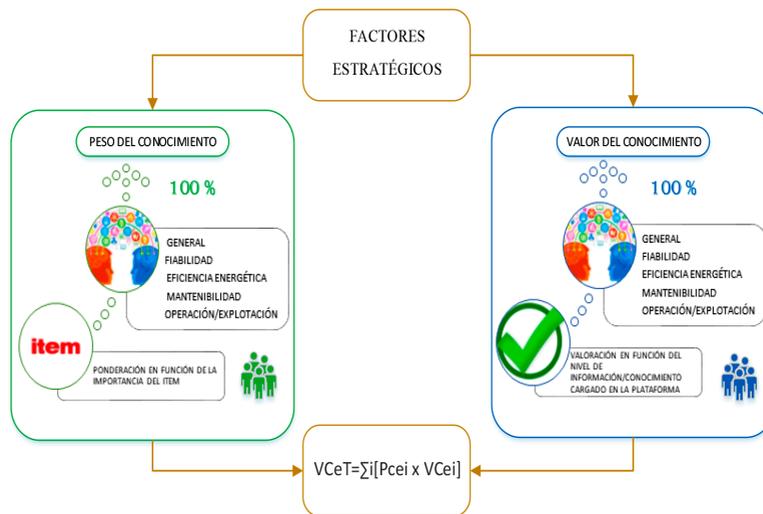


Figura 1. Modelo de gestión del conocimiento.

Luego de identificados los equipos críticos se aplicó la metodología AMFE para la priorización de los recursos “tareas de mantenimiento”, en la Tabla 4 se puede apreciar los fallos más críticos de la flota, jerarquizados con la metodología AMFE y presentados en términos de porcentaje.

Una vez que se definieron los conjuntos A “Agentes” y R “recursos”, se asume que cada agente está interesado en algunos recursos. En la matriz (1) “a manera de ejemplo” se muestra la relación entre agentes y recursos con el planteamiento de la matriz de solicitud “P” que contiene la información sobre los recursos que solicita cada agente. La matriz de preferencia sobre los recursos está identificada por: Filas, que son los agentes y las columnas los recursos.

$$P = \begin{matrix} & R1 & R2 & R3 & R4 & R5 & R6 & R7 & R8 & R9 & R10 \\ \begin{matrix} A1 \\ A2 \\ A3 \\ A4 \\ A5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

- Valor 1, puede ejecutar un recurso.
- Valor 0, no puede ejecutar un recurso.

Pudiendo interpretar esta matriz como sigue:

- El agente 1 está interesado “es capaz de ejecutar un recurso” en los recursos: del 1 al 9.
- Así el agente 2 está interesado en los recursos: 2, 4, 5, 6, 8, 9, 10.

- Así el agente 3 está interesado en los recursos: 1, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10.
- Así el agente 4 está interesado en los recursos: 3, 4, 5, 6, 7, 8.
- Así el agente 5 está interesado en los recursos: 1, 2, 3, 6, 8, 10.

Las filas deben ir ordenadas según jerarquía de los operadores (agentes, arriba agente de mayor jerarquía, último agente de menor jerarquía) y las columnas según la criticidad de los recursos (izquierda mayor jerarquía, derecha menor jerarquía).

En la propuesta de estudio se busca dar igual importancia al criterio del gestor de conocimiento como del agente, siendo así que la nueva matriz de solicitud modificada se denota como “P₀”, para obtener esta matriz se realiza la suma de las matrices del gestor de conocimiento “M_{GC}” y matriz de voluntades “M_V”.

- Matriz del gestor del conocimiento “M_{GC}”;** Es la matriz que el gestor de conocimiento elabora en base al conocimiento de que si un operador es capaz de ejecutar un recurso. Se asigna un valor de 1 “si sabe hacerlo” y 0 “en caso que no esté capacitado para hacerlo”.
- Matriz de voluntades “M_V”;** Es la matriz en la que un operador se califica de que si es capaz de ejecutar un recurso de mantenimiento. Se asigna un valor de 1 “en agente considera que sabe o tiene la voluntad de ejecutar un recurso” y 0 “el agente considera que no sabe o no tiene la voluntad de ejecutar un recurso”.

Tabla 3. Jerarquización de los agentes.

Agentes	Experiencia Profesional (10)		Experiencia en la empresa (20)		Talante (10)				Autoformación (60)				
	Manejo ordenes trabajo (5)	Años de experiencia (5)	Actividades de mantenimiento realizadas (20)	Subtotal	Edad del operario (3)	Idioma (3)	Trabajo equipo (4)	Subtotal	Conocimiento (40)	Nivel de estudio (10)	Capacitación (10)	Subtotal	Valoración del Agente
A1	SI	6	>3	20	34-35	Lee	SI	4	8	40	> 60 horas	55	0,93
A2	SI	9	>3	20	35-45	Lee, escribe	NO	0	5	40	20-60 horas	50	0,85
A3	NO	4	2	10	25-35	Nada	NO	0	2	40	> 60 horas	55	0,72
A4	NO	1	2	10	35-45	Nada	NO	0	3	40	0 horas	45	0,6
A5	NO	1	2	10	20-25	Nada	NO	0	1	40	0 horas	41	0,54

Tabla 4. Criticidad de los recursos de mantenimiento.

Sistema	Recursos de mantenimiento	Recurso	Índice IPR
Lubricantes y filtros	Cambio aceite motor	R ₁	0,88
	Cambio aceite de caja	R ₂	0,8
	Cambio de aceite diferencial	R ₃	0,75
Transmisión	Cambio Rodamientos	R ₄	0,72
	Mantenimiento eje posterior	R ₅	0,7
	Revisión del diferencial y caja de cambios	R ₆	0,67
Frenos	Revisión sistema de frenos	R ₇	0,6
	Remachado de zapatas	R ₈	0,59
Sistema de suspensión	Cambio de amortiguadores	R ₉	0,50
	Cambio buje de ballestas	R ₁₀	0,40

A partir de la matriz de conocimiento “M_{GC}” y voluntades “M_V”, se genera la matriz de Prioridades “P₀” matriz (2). Asignando los siguientes valores:

- “1” si sabe hacerlo, “0” si no sabe hacerlo.
- “1” si desea hacerlo.
- “2” si sabe y desea hacerlo.

Esta valoración da una mayor prioridad al personal que se encuentra más capacitado y que desea el recurso. Con ello se evita perder información con las matrices que asignan valores de “1” o “0”; debido a que se asigna un valor “1” si cumple con una o las dos condiciones (puede y quiere hacer una tarea), obviando (no asigna valor) a una de las dos condiciones.

$$M_{GC} = \begin{matrix} & R_1 & R_2 & R_3 & R_4 & R_5 & R_6 & R_7 & R_8 & R_9 & R_{10} \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} & + \\ \end{matrix}$$

$$M_V = \begin{matrix} & R_1 & R_2 & R_3 & R_4 & R_5 & R_6 & R_7 & R_8 & R_9 & R_{10} \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} & \\ \end{matrix} \quad (2)$$

$$P_0 = \begin{matrix} & R_1 & R_2 & R_3 & R_4 & R_5 & R_6 & R_7 & R_8 & R_9 & R_{10} \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 2 & 1 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 2 & 2 & 1 & 0 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 1 & 2 & 2 & 1 & 0 & 0 & 1 & 2 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 2 & 0 & 0 & 2 & 0 & 2 & 0 & 2 & 2 \end{bmatrix} & \\ \end{matrix}$$

En el presente proyecto se propone tres criterios para la construcción de la matriz de solicitud “P₁”.

En la Tabla 5 se resumen los criterios, mismos que consideran la base matemática descrita, la

jerarquización de los agentes y jerarquización del personal.

Propuesta de algoritmo

Partiendo de la matriz de prioridades se genera el algoritmo genérico. El cual debe tomar las siguientes consideraciones: 1. La cantidad máxima de recursos que se puede asignar a un agente está dado por la relación (m/n), siendo “m” el número de recursos “n” el número de agentes. Para el caso en el que la relación m/n no genere un número entero, se asignarán las tareas restantes (asociadas al residuo de la división) al agente de menor jerarquía y que esté interesado en el recurso 2. Para el caso en el que cierto recurso no pueda ser asignado a ningún agente, se deberá plantear una metodología de reasignación de tareas.

Descripción del algoritmo

1. Iniciar contadores de recursos en cero $C_i = 0$ ($i = 1, 2, \dots, m$)
2. Repetir $i = 1$ hasta m (recursos)
 - Repetir para $j = 1$ hasta n (agentes)
 - Si $P_{ji} = 1$ y $C_j < \text{int}(m/n)$ entonces:
 - $D(i) = j$
 - $C(j) = C(j) + 1$
 - Parar

La condición “Si $P_{ji} = 1$ y $C_j < \text{int}(m/n)$ ” verifica si la matriz de preferencia es uno y si el agente j tiene capacidad para recibir más recursos). En cuyo caso determinamos que el recurso i será asignado al agente j ($D(i) = j$) y aumentamos el contador de recursos que tiene asignado el agente j ($C(j) = C(j) + 1$).

En la Figura 2 se presenta el algoritmo para la asignación de recursos, en el cual se puede apreciar cada uno de los procesos vinculados.

Metodología de reasignación de recursos

La reasignación de recursos se aplica, luego de que el algoritmo no pueda asignar un recurso a un agente. Para la correcta reasignación del recurso, se consideran los siguientes criterios.

- a. Buscar el agente de menor jerarquía que puede tomar este recurso.
- b. Buscar agente de mayor jerarquía que tenga disponibilidad de tomar nuevos recursos.
- c. Intercambio de asignación de recursos.

RESULTADOS

En esta sección se compararon los resultados obtenidos con la aplicación de los distintos criterios. Independiente del criterio, éste debe permitir distribuir los recursos por igual número a los agentes, asignando los recursos más críticos a los agentes de mayor jerarquía. Los agentes están definidos como “A1, A2, A3, A4, A5” y diferenciados por colores.

Criterio I

Para el criterio I, la matriz de prioridades “ P_0 ” se construye con suma booleana de las matrices del gestor de conocimiento “ M_{GC} ” y voluntades “ M_V ”

$$\begin{matrix}
 & & R1 & R2 & R3 & R4 & R5 & R6 & R7 & R8 & R9 & R10 \\
 M_{GC} = & \begin{matrix} A1 \\ A2 \\ A3 \\ A4 \\ A5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} & + \\
 & & R1 & R2 & R3 & R4 & R5 & R6 & R7 & R8 & R9 & R10 \\
 M_V = & \begin{matrix} A1 \\ A2 \\ A3 \\ A4 \\ A5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \\
 & & R1 & R2 & R3 & R4 & R5 & R6 & R7 & R8 & R9 & R10 \\
 P_0 = & \begin{matrix} A1 \\ A2 \\ A3 \\ A4 \\ A5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} & (3)
 \end{matrix}$$

Tabla 5. Criterios para construcción de la matriz de prioridades “ P_1 ”.

Matriz de prioridades “ P_1 ”		
Criterio	Ecuación	Observaciones
Criterio I	$P_0 = M_{GC} + M_V$	Valor 1 o 0 en la matriz. 1, El agente sabe o quiere el recurso. 0, el agente no puede ni quiere el recurso.
Criterio II	$P_1 = P_0 * J_a$	Ponderación según Ecuación.
Criterio III	$P_1 = P_0 * C_i * J_a$	Ponderación según Ecuación.

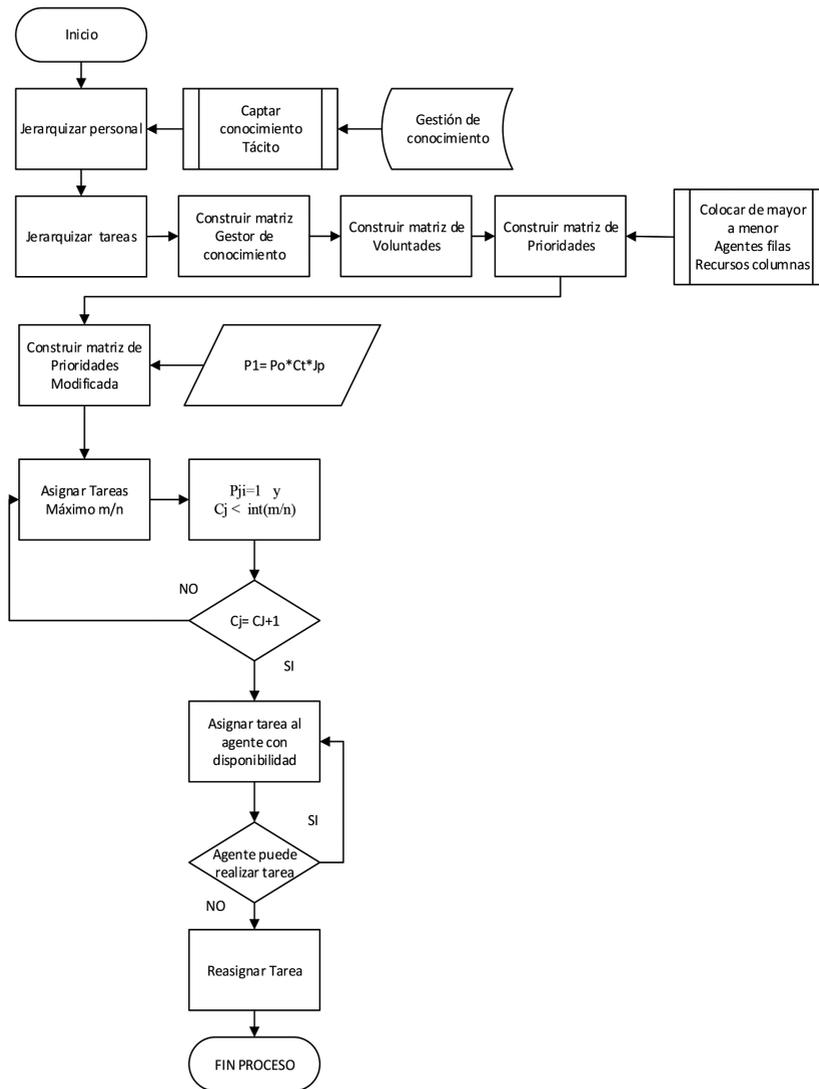


Figura 2. Algoritmo de asignación de recursos.

En este caso la matriz (3) de prioridades se construye con valores de 0 y 1, dando igual valoración al criterio del experto y voluntades del operador. En este criterio se asignan un máximo (m/n) recursos

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
A1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
A2	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1
A3	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
A4	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
A5	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1

Figura 3. Distribución de recursos mediante el “Criterio I”.

a cada agente, para el caso de tener un número no entero, se distribuirá el recurso al agente de menor jerarquía. Siempre se asignarán recursos a los agentes que bien puedan o quieran hacer el recurso, es decir, cuando su valor sea 1. En la Figura 3, se muestra la distribución final de recursos aplicando el algoritmo y la metodología para la reasignación de recursos.

Criterio II

En este caso la matriz (4) de prioridades “P₀” se construye con la suma matricial de las matrices del gestor de conocimiento “M_{GC}” y voluntades “M_V”.

$$\begin{aligned}
 M_{GC} &= \begin{matrix} & R1 & R2 & R3 & R4 & R5 & R6 & R7 & R8 & R9 & R10 \\ A1 & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \\ A2 & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\ A3 & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\ A4 & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ A5 & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} + \\
 M_V &= \begin{matrix} & R1 & R2 & R3 & R4 & R5 & R6 & R7 & R8 & R9 & R10 \\ A1 & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \\ A2 & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\ A3 & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\ A4 & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ A5 & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4) \\
 P_0 &= \begin{matrix} & R1 & R2 & R3 & R4 & R5 & R6 & R7 & R8 & R9 & R10 \\ A1 & \begin{bmatrix} 2 & 1 & 2 & 1 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 0 \end{bmatrix} \\ A2 & \begin{bmatrix} 0 & 2 & 0 & 2 & 2 & 1 & 0 & 2 & 2 & 2 & 2 \end{bmatrix} \\ A3 & \begin{bmatrix} 2 & 1 & 2 & 2 & 1 & 0 & 0 & 1 & 2 & 2 & 2 \end{bmatrix} \\ A4 & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ A5 & \begin{bmatrix} 2 & 2 & 2 & 0 & 0 & 2 & 0 & 2 & 0 & 2 & 2 \end{bmatrix} \end{matrix}
 \end{aligned}$$

A continuación se construye la matriz de prioridades “P₁”, resultado del producto de P₀ y la jerarquización de los agentes “J_a”. Para la asignación de un recurso se selecciona el mayor valor absoluto de ponderación desplazándose por toda la columna “recurso”. Para el caso de que un recurso no pueda ser asignado a un agente “valor 0” y los demás agentes nos tienen disponibilidad, se aplica la metodología de reasignación de recursos. Como se puede apreciar en la Figura 4, al A₁ se asignó el recurso “R₁ y R₃”, al A₂ el recurso “R₂ Y R₄”, al A₃ el recurso “R₉ Y R₁₀”, al A₄ el recurso “R₅ Y R₇”, al A₅ el recurso “R₆ Y R₈”.

Criterio III

En este caso la matriz de prioridades “P₁” se construye considerando el producto de la matriz “P₀”, Criticidad de los recursos “C_t” y la jerarquización de los agentes “J_a”, asignando el recurso al agente en la ubicación de mayor ponderación. Para la asignación de un recurso se selecciona el mayor valor absoluto de ponderación desplazándose por toda la columna “recurso”. Para el caso de que un recurso no pueda ser asignada a un agente “valor 0” y los demás agentes nos tienen disponibilidad, se aplica la metodología de reasignación de recursos. Como

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
A1	1,86	0,93	1,86	0,93	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86	0,00
A2	0,00	1,70	0,00	1,70	0,85	0,00	1,70	1,70	1,70	1,70
A3	1,44	0,72	1,44	1,44	0,72	0,00	0,00	0,72	1,44	1,44
A4	0,00	0,00	0,61	0,61	1,22	1,22	1,22	1,22	0,00	0,00
A5	1,08	1,08	1,08	0,00	0,00	1,08	0,00	1,08	0,00	1,08

Figura 4. Distribución de tareas mediante el “Criterio II”.

se puede apreciar en la Figura 5 al A₁ se asignaron los recursos “R₁ y R₃”, al A₂ la tarea “R₂ Y R₄”, al A₃ la tarea “R₉ Y R₁₀”, al A₄ la tarea “R₅ Y R₇”, al A₅ la tarea “R₆ Y R₈”.

DISCUSIÓN

Luego de la aplicación del algoritmo y metodología de reasignación de tareas a los distintos criterios, se obtienen distribuciones de personal diferenciadas, así:

- En el Criterio I con una asignación binaria, se cuenta con una distribución equitativa pero no justa, ya que los agentes de menor jerarquía asumen recursos de alta criticidad.
- Para los Criterios II Y III donde se incluyen diferentes ponderaciones entre los agentes y los recursos, se encuentra con una distribución equitativa y justa, ya que las tareas más críticas se distribuyen entre los agentes de mayor jerarquía y no sólo una asignación directa como en el criterio I. Por esto, en recursos de criticidad media, los criterios II y III asignan los recursos con un mayor grado de justicia.

CONCLUSIONES

En el desarrollo del presente trabajo, se observa que para contar con una buena asignación no basta con utilizar el modelo de relación binario, por ello se desarrollaron dos criterios adicionales de ponderación tanto a las actividades de mantenimientos como a la jerarquización de los agentes, lo que apunta hacia una asignación más amplia entre los conjuntos de los agentes y recursos.

Para la asignación de las ponderaciones en la jerarquización del personal, es necesario disponer con información cualitativa del grupo de expertos encargados de las tareas de mantenimiento, valorando aspectos como la experiencia profesional, el talento, la autoformación y sobretodo el conocimiento.

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
A1	1,64	0,74	1,40	0,67	1,30	1,25	1,12	1,10	1,00	0,00
A2	0,00	1,36	0,00	1,22	1,19	0,57	0,00	1,00	0,92	0,71
A3	1,27	0,58	1,08	1,04	0,50	0,00	0,00	0,42	0,78	0,60
A4	0,00	0,00	0,46	0,44	0,85	0,82	0,73	0,72	0,00	0,00
A5	0,95	0,86	0,81	0,00	0,00	0,72	0,00	0,64	0,00	0,45

Figura 5. Distribución de recursos mediante el “Criterio III”.

Referente a los recursos de mantenimiento, es necesario diferenciar los recursos críticos, mediante el uso de técnicas cualitativas que permitan valorar de manera más eficiente el talento humano.

Con la aplicación de la metodología se puede obtener un conjunto de asignaciones equitativas y justas. En este sentido las asignaciones que consideran los Criterios II y III cumplen con esta cualidad. Sin embargo, se prevé para futuras investigaciones incluir el costo de los recursos de mantenimiento en la jerarquización de estas, para discernir qué criterio puede ser mejorado.

Sería importante para futuras investigaciones incluir el costo de los recursos de mantenimiento en la jerarquización de los recursos de mantenimiento y observar si existe variación en la asignación, en especial, con los criterios II y III.

REFERENCIAS

- [1] D. Galar, L. Berges, J. Royo y P. Lambán. "El factor humano en las métricas de mantenimiento: Una mezcla de elementos cualitativos y cuantitativos en la medición del rendimiento". Fecha de consulta: 21 de octubre de 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/261911558_El_factor_humano_en_las_mtricas_de_mantenimiento_Una_mixtura_de_elementos_cualitativos_y_cuantitativos_en_la_medicion_del_rendimiento.
- [2] D. Galar. "Maintenance Audits Handbook: A Performance Measurement Framework". Taylor & Francis, pp. 73-95. ISBN: 13: 978-1-4665-8392-4. 2016.
- [3] V. D'Aleo and B.S. Sergi. "Human factor: The competitive advantage driver of the EU's logistics sector". International journal of production research. Vol. 55 N° 3, pp. 642-655. 2017.
- [4] S. Björling, D. Baglee, D. Galar, S. Singh and U. Kumar. "Maintenance knowledge management with fusion of CMMS and CM". Conference: Worldcomp 2013 - DMIN 13At: Las Vegas Nevada USA. 2013.
- [5] S. Bommer and M. Fendley. "A theoretical framework for evaluating mental workload resources in human systems design for manufacturing operations". International Journal of Industrial Ergonomics. Vol. 63, pp. 7-17. 2018. DOI: 10.1016/j.ergon.2016.10.007.
- [6] P. Oborski. "Developments in integration of advanced monitoring systems". Int J Adv Manuf Technol. Vol. 75 N° 9, pp. 1613-1632. 2014. DOI: 10.1007/s00170-014-6123-x.
- [7] P. Okoh and H. Stein. "Improving the robustness and resilience properties of maintenance". Process Safety and Environmental Protection. Vol. 94, pp. 212-226. 2015. DOI: 10.1016/j.psep.2014.06.014.
- [8] D. Galar, L. Berges y J. Royo. "Construcción de KPIs de mantenimiento en base a los parámetros RAMS: La necesidad de un cuadro de mando". II Jornadas internacionales de Asset Management. XI Jornadas de Confiabilidad. 2009.
- [9] C. Kandemir, M. Celik, E. Akyuz and O. Aydin. "Application of human reliability analysis to repair & maintenance operations on-board ships: The case of HFO purifier overhauling". Applied Ocean Research. Vol. 88, pp. 317-325. 2019. DOI: 10.1016/j.apor.2019.04.019.
- [10] R. Patil, B. Kothavale and R. Powar. "Effects of Human and Organizational Factors on the Reliability and Maintainability of CNC Turning Center". Reliability, Safety and Hazard Assessment for Risk-Based Technologies, Singapore, pp. 751-764. 2020. DOI: 10.1007/978-981-13-9008-1_64.
- [11] E. Agudelo y A. Valencia. "La gestión del conocimiento, una política organizacional para la empresa de hoy". Ingeniare. Revista Chilena de ingeniería. Vol. 26 N° 4, pp. 673-684. 2018.
- [12] L. Amendola y T. Depool. "Modelo de confiabilidad humana en la gestión de activos". Fecha de consulta: 20 de octubre de 2019. URL: <http://www.mantenimientomundial.com/notas/0604AmendConf.pdf>.
- [13] J. Cárcel and E. Peñalvo. "Factors in the Relationship between Maintenance Engineering and Knowledge Management". Applied Sciences. Vol. 10, pp. 2810. 2020. DOI: 10.3390/app10082810.
- [14] T. Bedford and R. Cooke. "Probabilistic risk analysis: Foundations and methods". Cambridge University Press. First edition. pp. 257-281. ISBN: 0 521 77320 2. 2001.

- [15] H. Bubb. "Human Reliability: A key to improved quality in manufacturing". *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*. Vol. 15 N° 4, pp. 353-368, 2005.
- [16] Y. Báez, M. Rodríguez, E. De la Vega y D. Tlapa. "Factores que influyen en el error humano de los trabajadores en líneas de montaje manual". *Información tecnológica*. Vol. 24 N° 6, pp. 67-78. 2013. DOI: 10.4067/S0718-07642013000600010.
- [17] O. García. "Confiabilidad para la excelencia empresarial". VII Congreso Internacional de Mantenimiento ACIEM. Cartagena. Colombia. 2015.
- [18] Y. Chevaleyre, U. Endriss and N. Maudet. "Distributed fair allocation of indivisible goods". *Artificial Intelligence*. Vol. 242, pp. 1-22. 2017. DOI: 10.1016/j.artint.2016.09.005.
- [19] F. Camacho, G. Chacón and R. Pérez. "A qualitative framework for resource allocation". *RISTI. Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*. Vol. N° E19. pp. 121-133. 2019.
- [20] I. Morag, P. Chemweno, L. Pintelon and M. Sheikhalishahi. "Identifying the causes of human error in maintenance work in developing countries". *International Journal of Industrial Ergonomics*. Vol. 68, pp. 222-230. 2018. DOI: 10.1016/j.ergon.2018.08.014.
- [21] C. Mariotoni y J. Carrasco. "Mejora de la eficiencia industrial por la gestión del conocimiento en la Ingeniería del mantenimiento". *Labor e Engenho*. Vol. 9 N° 3, pp. 5-12. Vol. 5 N° 5. ISSN-e 2248-5252. 2015.
- [22] J. Cárcel. "Planteamiento de un modelo de mantenimiento industrial basado en técnicas de gestión del conocimiento". *OmniaScience*. Primera Edición, pp. 27-49. Valencia, España. ISBN: 978-84-941872-8-5. 2014.