

Artículo de reflexión

METODOLOGÍA PARA LA CATEGORIZACIÓN DE ACTIVOS EN EL MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD DESDE EL ALGORITMO “PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA”

Cristian Alejandro Zafra Rodríguez¹, Flor Alba
Méndez Martín², Alexander Reyes Moreno³

Recibido: 21 de abril de 2017

Aprobado: 6 de agosto de 2018

Cómo citar este artículo: Zafra, C., Méndez, F. y Reyes, A. (2017). Metodología para la categorización de activos en el mantenimiento centrado en confiabilidad desde el algoritmo “proceso de jerarquía analítica”. *Agustiniana Revista Académica*, II, pp. 53-76.

Resumen. Actualmente, el estado del mantenimiento industrial en Colombia refleja que, un 46% de las empresas presentan una tendencia reactiva frente a los activos y su mantenimiento, tan solo un 21% utiliza métodos de mantenimiento predictivo o bajo condiciones, y —lo que resulta aún más relevante— apenas el 19% de estas organizaciones implementan algún tipo de certificación en la gestión de los activos. En otras palabras, el mantenimiento industrial en Colombia es reactivo y no normalizado, lo que acarrea problemas como sobrecostos, pérdidas económicas, pérdidas de mercado, mala calidad y baja productividad, entre otros. En consecuencia, la deficiente gestión del mantenimiento industrial se ve reflejada en un uso ineficiente de los recursos empresariales. En razón a lo anterior, esta investigación busca brindar herramientas estratégicas para la gestión de activos, que permitan hacer un uso eficiente de los recursos desde la metodología de categorización de activos aquí propuesta y fortalecer aspectos como el diseño, la planeación, la dirección y el control de las operaciones en gestión del mantenimiento industrial de las organizaciones desde el método Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM).

Palabras claves: mantenimiento industrial, gestión de activos, uso eficiente de los recursos, categorización de activos, RCM, PJA.

¹ Ingeniero industrial. Correo electrónico: ing.critianzafra@gmail.com

² Ingeniera industrial. Correo electrónico: floralbamm2@gmail.com

³ Ingeniero industrial; máster en Administración de Empresas, con especialización en Gestión de la Calidad, Seguridad y Medio Ambiente; máster en Administración Ambiental. Profesor titular. Correo electrónico: areyes946@hotmail.com

Introducción

El mantenimiento industrial, sin duda alguna, es uno de los componentes de mayor relevancia en la gestión de las organizaciones. Sin importar la actividad económica, el tamaño o las políticas organizacionales, todos los procesos requieren algún tipo de estrategia de mantenimiento para sus muebles, equipos o hermanitas, con el objetivo de salvaguardar el estado de funcionamiento de sus bienes.

A simple vista, dicho mantenimiento industrial en las empresas podría concebirse como plano, sencillo o de menor importancia frente a los diversos procesos inherentes a la industria; incluso, hay quienes afirman que el mantenimiento no es más que una serie de actividades correctivas en torno a los fallos o daños de los equipos y que, además, constituye un gasto para la organización. No obstante, también hay quienes conciben el mantenimiento industrial como un sistema complejo, con múltiples variables y parámetros, que contribuyen a fortalecer un sinnúmero de aspectos e indicadores de gran importancia en las organizaciones como la producción, la calidad, los costos, los tiempos, la productividad, la eficiencia, la capacidad, la disponibilidad, entre otros, que se pueden ver afectados de manera directa o indirecta por las acciones llevadas a cabo en los procesos industriales. De ahí que, actualmente, se establezcan múltiples estrategias, metodologías o filosofías alrededor de la aplicación del mantenimiento industrial, con el objetivo de fortalecer los procesos de mantenimiento y no solo de salvaguardar el estado de funcionamiento de los equipos.

En resumen, la aplicación de una técnica de mantenimiento industrial en las organizaciones implica un reto para la planeación estratégica de las empresas, puesto que en esta convergen todos los parámetros, restricciones y variables inherentes a todo el sistema productivo. Entonces, dado que la aplicación del mantenimiento industrial es de alto impacto en la organización, conviene prestar especial atención a su desarrollo. Asimismo, cabe subrayar que este proceso procura la implementación del ciclo Planear, Hacer, Verificar y Actuar (PHVA) en las organizaciones, donde confluye una serie de recursos tanto económicos como intelectuales para permitir el desarrollo adecuado del sistema de mantenimiento, cualquiera que sea la estrategia adoptada.

La aplicación de las buenas prácticas de mantenimiento en las empresas se torna, así, sumamente laboriosa, debido a que compromete la interacción y correlación entre los procesos, así como la salvaguarda de los recursos y el incremento y la normalización de aspectos como la productividad, la calidad, los costos y demás indicadores de conformidad con los procesos productivos. Dicho de otra manera, uno de los principales retos y problemas en la aplicación del mantenimiento industrial es lograr la aplicación adecuada de las acciones de mantenimiento entre los parámetros idóneos de costos y operatividad y buen uso de los recursos.

Lo anterior conduce a la formulación de la pregunta de investigación: ¿qué método se puede aplicar para administrar el mantenimiento industrial, de forma que se logren focalizar las actividades de mantenimiento predictivo, planeado y preventivo en los equipos y herramientas de la organización?

En consonancia con la pregunta, se expresa el objetivo principal de este texto, cuyo fin es desarrollar una guía metodológica para categorización de activos, basada en el algoritmo matemático determinístico Proceso de Jerarquía Analítica (PJA), con el fin de proporcionar una herramienta administrativa para la gestión y la toma de decisiones en las operaciones inherentes al mantenimiento industrial, que logren focalizar los métodos de mantenimiento predictivo, planeado y preventivo en los activos físicos, equipos y herramientas de las organizaciones, enmarcadas en el RCM.

Con este propósito, se aplicó la herramienta de investigación de operaciones, conocida como proceso de jerarquía analítica, desarrollado por el profesor Thomas L. Saaty de la Universidad de Pittsburgh en 1980, la cual propone un análisis global de datos por medio de la jerarquización de las variables influyentes en el problema u objeto de estudio. A grandes rasgos, esta herramienta para la toma de decisiones en un entorno complejo combina la corriente de análisis de datos cualitativos y cuantitativos y permite la toma de decisiones asertivas, con base en cada uno de los parámetros, restricciones y variables estudiadas.

El proceso de jerarquía analítica busca estructurar el problema de forma jerárquica, cuyo fundamento sea el objetivo del estudio. En el nivel más bajo se encuentran las alternativas, acciones finales o planes de desarrollo, y en los niveles intermedios, los criterios o variables para evaluar el objetivo final (Saaty, 1997). Este modelo permite la evaluación de los equipos o de la maquinaria con base en criterios o juicios de valor relevantes en la categorización de los equipos y herramientas que intervienen en los procesos productivos de la organización, con el fin de focalizar la planeación y la gestión del mantenimiento industrial.

Dado lo anterior, esta investigación plantea que el uso del algoritmo determinístico de investigación de operaciones PJA permite la categorización de los activos, equipos y herramientas, en función de la preponderancia del activo en los procesos industriales, a fin de focalizar de manera eficiente los métodos de mantenimiento predictivo, preventivo y planeado, aplicados a los equipos y herramientas. La búsqueda de evidencia que respalde dicha propuesta conduce a la formulación de la metodología a considerar dentro del marco de la situación de estudio. Así, se formulan ocho etapas metodológicas: primero, recolección de datos; segundo, análisis y depuración de datos; tercero, identificación y determinación de los criterios y alternativas a evaluar en la categorización de los equipos; cuarto, identificación y determinación de los criterios y alternativas a evaluar en la elección de las técnicas de mantenimiento, centrado en la confiabilidad a implementar; quinto, formulación del algoritmo PJA; sexto, análisis de sensibilidad y prueba de hipótesis; séptimo, evaluación; y, por último, octavo, conclusiones.

Sobre la base de las consideraciones anteriores, se expresan las variables de la situación de estudio, enmarcadas en el indicador de reconocimiento global Overall Equipment Efficiency (OEE). Entendido como eficiencia general de los equipos, este indicador nos permite evaluar globalmente la suma de los valores porcentuales de la disponibilidad, rendimiento y calidad de los equipos y herramientas, lo que faculta la clasificación de los procesos de la organización en términos de excelencia internacional.

En su libro, *La teoría de la medición del despilfarro*, José Agustín Cruelles expresa que un valor entre los niveles porcentuales del 0% al 65% clasifica los procesos de la organización como inaceptables —muy bajos competitivamente—, al ser la categoría de menor nivel; por su parte, un nivel porcentual del 95% al 100% clasifica los procesos de la empresa como de excelente competitividad —organización de nivel *word class*—, al ser la categoría de mayor nivel.

Finalmente, el trabajo concluye con la exposición de las principales pautas para la aplicación y el desarrollo de la metodología para la categorización de activos en el mantenimiento centrado en confiabilidad.

Formulación del problema

Con la industria 4.0 el mantenimiento industrial se posiciona como un factor preponderante en el éxito de las organizaciones, porque no se pueden concebir operaciones automatizadas sin el óptimo funcionamiento de los equipos o herramientas que intervienen en los procesos. Gracias a la aplicación de filosofías como el Mantenimiento Total Productivo (TPM), el RCM y mantenimiento centrado en confiabilidad, entre otras, sumadas a las normas técnicas de calidad como ISO 9000 o de gestión de activos ISO 55000, etc., las potencias industriales logran posicionar sus procesos de mantenimiento en los rankings más altos a nivel mundial.

En el XVIII Congreso Internacional de Mantenimiento y Gestión de Activos se pudo evidenciar el estado del mantenimiento industrial en Colombia, proceso que expone problemas asociados a la gestión, ejecución, costos, entorno y formación. Algunos de los principales problemas son: el 19% de la población encuestada tiene algún tipo de certificación en la gestión de activos; el 46% del mantenimiento practicado en las organizaciones es de carácter correctivo; el 32% hace mantenimiento preventivo. Así mismo, se observan otros factores como la falta de planeación, de capacitación y competencias laborales, los cuales derivan en que el mantenimiento en Colombia presente escasa competitividad frente a la comunidad global.

En consecuencia, esta investigación busca analizar y brindar posibles soluciones al problema de la gestión del mantenimiento. Por un lado, se propone lograr la reducción del porcentaje de aplicación del mantenimiento correctivo, al aumentar la ejecución de mantenimiento predictivo, preventivo y planificado, con el objetivo de hacer a la industria más propositiva y menos reactiva —todo bajo el marco de las buenas prácticas de mantenimiento industrial—. Por otro lado, en lo que compete a la descripción del problema, a continuación, en la figura 1, se plantea el árbol del problema, cuyo eje central es el fenómeno de investigación, desde el cual se despliegan, en niveles inferiores, las causas relacionadas con dicho problema, y, en niveles superiores, los efectos derivados de este.

De esta manera, se pueden identificar las causas principales de la deficiente gestión y la aplicación de los métodos de mantenimiento industrial; igualmente, se hace evidente la insuficiencia en cuanto a capacitación, recursos económicos, investigación, formación académica, experticia e información, entre otros. Estas causas derivan en

efectos tanto en los procesos productivos como en el ambiente organizacional: la baja productividad, la disminución del rendimiento de los equipos, los sobrecostos de mantenimiento, el incumplimiento en los pedidos y la pérdida de insumos y del buen nombre de la compañía son solo algunos de los efectos de este fenómeno.

Ante este panorama, el presente artículo busca desarrollar una guía metodológica para la categorización de activos, con base en el algoritmo matemático determinístico PJA, a fin de proporcionar una herramienta administrativa para la gestión y la toma de decisiones en las operaciones inherentes al mantenimiento industrial. De este modo, se espera poder focalizar los métodos de mantenimiento predictivo, planeado y preventivo, en los activos físicos, equipos y herramientas, de las organizaciones, enmarcados en el RCM.

A partir de esta pregunta, se busca desarrollar un método de focalización para el mantenimiento industrial, que dé prioridad a tipos de mantenimiento como el predictivo, planeado y preventivo, con el objetivo de optimizar los recursos de mantenimiento y fortalecer una tendencia anticipativa y planificada en las actividades de mantenimiento de los equipos y herramientas.

Conviene subrayar que, el propósito del proyecto es categorizar los activos con respecto a su grado de importancia y creatividad en los procesos de producción para poder suministrar un método de planeación y asignación de estrategias de mantenimiento; es decir que este método permitirá elegir y seleccionar el tipo de mantenimiento idóneo para los activos con respecto a su categorización. Así, por ejemplo, un activo con una importancia y criticidad alta puede ser gestionado con técnicas como mantenimiento predictivo, y los equipos o herramientas con un grado de relevancia más bajo deberán ser gestionados con métodos de mantenimiento como el preventivo, de manera que se optimice el mantenimiento industrial.

Justificación

Este proyecto busca mostrar la importancia de la jerarquización de los activos físicos, las maquinarias y herramientas, según su impacto en el desarrollo de las actividades de fabricación, con el fin de lograr una gestión eficiente del mantenimiento y proporcionar al administrador prioridades para fundamentar las estrategias y planes de mantenimiento.

La jerarquización y priorización pueden ser utilizadas como herramientas en la gestión del mantenimiento de las operaciones del sistema productivo. Así como se jerarquizan las máquinas y herramientas de acuerdo a su impacto, también se puede hacer con los fenómenos causantes de fallos en un activo físico específico, en el cual se deben priorizar elementos como la fatiga de materiales, el esfuerzo, los lubricantes, las vibraciones y todos aquellos que son susceptibles a ser aplicados a los equipos y buscan la prevención de fallos. Este es el objetivo de las técnicas basadas en investigación de operaciones, estadística y mantenimiento industrial de ejes, en los cuales basaremos el proyecto, debido a las contribuciones que aportan estas áreas del conocimiento al desarrollo de la investigación.

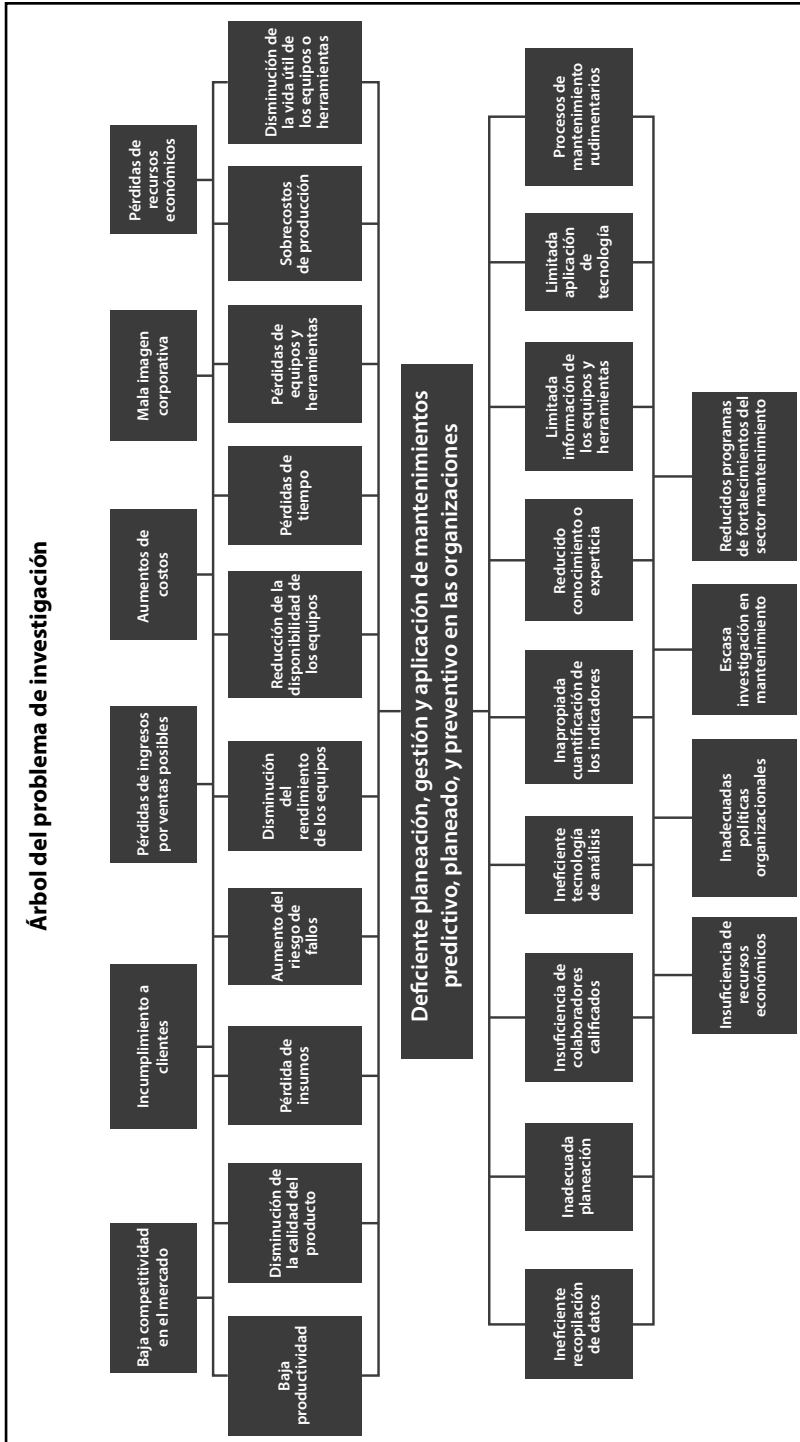


Figura 1. Árbol del problema.

La estadística es una herramienta a la cual acudimos en aras de recolectar, procesar y analizar datos numéricos derivados de la producción, los cuales influyen de manera directa en la categorización, jerarquización y priorización de los activos físicos del proceso. Sin embargo, en este caso, el eje principal es la investigación de operaciones, medio por el cual se lleva a cabo la formulación y el desarrollo del modelo Proceso de Jerarquía Analítica como herramienta para el análisis, ponderación y jerarquización de los activos físicos, maquinaria y herramientas.

Este último proceso se elige como herramienta pilar en este proyecto, gracias a la versatilidad y flexibilidad que presenta en la toma de decisiones bajo incertidumbre, ya que traslada variables cualitativas a un entorno cuantitativo medible por medio de la ponderación de los criterios que forman parte del objetivo:

Los planificadores, que usaran el PJA para estudiar este problema, primero definieron la situación minuciosamente e incluyeron la mayor cantidad posible de detalles importantes. Luego los estructuraron en una jerarquía según niveles de detalle. El nivel más alto fue el objetivo global de proteger la calidad ambiental. El más bajo comprende las acciones finales o planes de desarrollo (alternativas) que pueden constituir de manera positiva o negativa al principal objetivo, por medio del impacto sobre los criterios intermedios. (Saaty, 1997, p. 26)

Es así como se busca indexar este modelo matemático en la toma de decisiones en la gestión de mantenimiento, la cual, como previamente se ha manifestado, es de gran importancia en el desarrollo de las actividades de la industria y, por qué no decirlo, de la economía, pues el mantenimiento está ligado en gran parte a la capacidad competitiva de las organizaciones.

Marco teórico

En lo que se refiere a los conceptos o bases teóricas aplicadas para este estudio, es necesario hacer énfasis en el RCM, luego, en el Despliegue de la Función de Calidad o QFD y, por último, en el PJA.

Dentro de este marco, en primera instancia se expone el concepto de mantenimiento centrado en la confiabilidad, que se puede definir como un proceso utilizado para determinar qué se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional actual (Moubray, 2004, p. 7). Es decir que el RCM pretende asegurar la funcionalidad de los equipos y herramientas y que los activos físicos de la compañía se mantengan disponibles en su operación; en otras palabras, procura incrementar la confiabilidad del sistema de mantenimiento en las organizaciones.

Entre las principales herramientas que se plantean en el RCM, se encuentra el pilar del mismo, o sea, el mantenimiento predictivo, que no es más que el medio que facilita la anticipación a los posibles fallos, antes de que comprometan el óptimo funcionamiento de los activos físicos de la compañía. En segundo lugar, está la dificultad para entender los requerimientos del cliente; bien sea por un canal de comunicación rudimentario

o por carencia de estrategias adecuadas de recolección de información, a menudo las necesidades del cliente se estancan o se pierden por el camino. En el caso de que dichas necesidades fueran atendidas, no solo podrían representar aumentos en las ventas de la organización, sino que, aún más importante, podrían constituir la oportunidad de nuevos negocios o mejoras potenciales en los procesos ejecutados en la compañía.

De ahí que el QFD se establezca como una alternativa de solución factible para mejorar la comunicación del cliente con la organización e incrementar así la calidad tanto de los procesos como de los bienes o servicios ofrecidos. Con ese propósito, este método plantea la aplicación de una serie de QFD, que pretenden transformar los deseos del cliente en especificaciones técnicas correctas, que ayuden a diseñar un producto que satisfaga las necesidades del cliente (González, Mera y Lacoba, 2007, p. 127). Quizás este sea, a grandes rasgos, el objetivo primordial. Así mismo, esta herramienta es la base central de la matriz de calidad —más conocida como la casa de la calidad matriz—, que busca identificar los principales deseos de los clientes y evaluarlos con respecto a las capacidades de la organización.

Así como la anterior herramienta se deriva del QFD, se pueden encontrar varias adicionales que, en últimas, permiten el desarrollo del concepto de calidad total en las organizaciones y, por lo tanto, la aplicación de certificaciones como la ISO 9000 Gestión de Calidad, mecanismos estratégicos que incrementan la competitividad de la compañía que lo aplique con éxito.

Por último, la investigación de operaciones proporciona diversos modelos matemáticos para la toma de decisiones, uno de los cuales es el PJA, que para Taha (2012) “está diseñado para situaciones en que las ideas, sentimientos y emociones que afectan el proceso de toma de decisiones se cuantifican y así obtener una escala numérica para priorizar las alternativas” (p. 513). Este modelo se caracteriza por la capacidad para evaluar las múltiples alternativas de un objetivo definido, con base en los criterios de decisión planteados para el modelo de acuerdo a lo expresado por Saaty (1997), cuando resalta la versatilidad del modelo y su capacidad de ajustarse a cualquiera que fuese el entorno, ya que permite el análisis de variables cuantitativas y cualitativas.

Estas últimas variables se constituyen a menudo en opiniones o criterios basados en las emociones y sentimientos —o en aquellos que, dado su grado de complejidad, difícilmente pueden ser explicados desde lo cuantitativo—, razón por la cual, este modelo contempla una escala de intensidad o importancia que busca medir el grado de relación o significación que tiene el criterio.

El objetivo de toda toma de decisiones es escoger la decisión más acertada posible frente a los criterios evaluados, en este caso el PJA, al contemplar criterios subjetivos que solo el analista o tomador de decisiones puede ponderar, de acuerdo a su experiencia o gustos. Esta ponderación está dada por la escala fundamental de importancia desarrollada para este modelo, que va del uno (1) al nueve (9) y le da a cada uno conceptos cualitativos de valor, que intentan representar qué tan importante es el criterio con respecto a la decisión. El fin de este proceso es brindar al modelo

una ponderación numérica que pueda ser operada en su ejecución, lo que, por último, arrojará la alternativa que mejor se ajuste a la decisión.

Metodología

En el desarrollo del proyecto, se implementa un tipo de investigación correlacional con un método hipotético deductivo, desde un enfoque mixto de investigación, que permite vincular los datos cuantitativos y cualitativos, con el objetivo de mantener una estructura clara durante el proceso. El principal propósito es obtener información estructurada, confiable y verídica, con la cual se puedan establecer parámetros claros e imparciales en la categorización de los equipos y herramientas. Esto se debe aplicar en las etapas de recolección y análisis de datos, identificación de los criterios y alternativas del modelo matemático, desarrollo del método de categorización y estructuración de la guía de implementación del método propuesto. Igualmente, se plantean cinco etapas de investigación, entre las cuales se encuentran la recolección de datos, el análisis y depuración de los datos y la formulación del algoritmo PJA, como se observa en la figura 2:

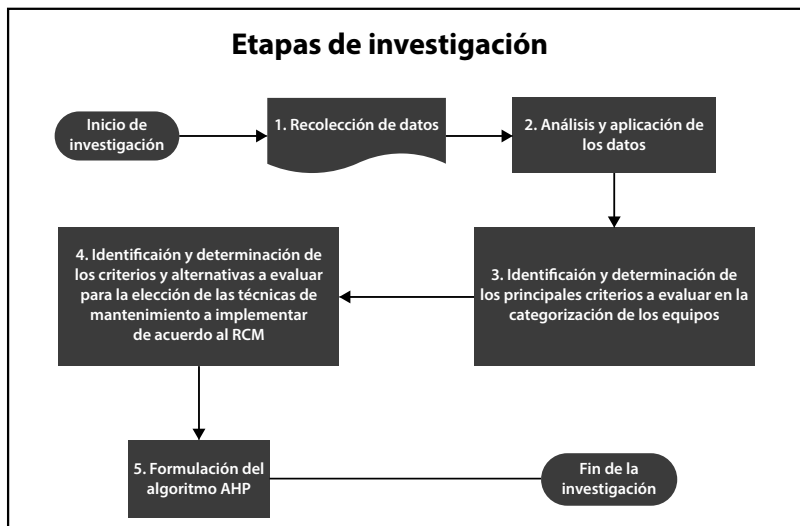


Figura 2. Mapa metodológico del proyecto.

En líneas generales, las etapas de investigación propuestas se orientan a la identificación y determinación de los parámetros, criterios, alternativas y variables a evaluar a lo largo de la formulación del algoritmo determinístico aplicado; de ahí que las etapas tres y cuatro de la metodología planteada sean las acciones centrales del estudio y del adecuado desarrollo del proyecto.

Resultados

Uno de los principales objetivos planteados en el desarrollo de la guía metodológica para la implementación de mantenimiento centrado en confiabilidad es lograr optimizar los diferentes recursos involucrados en la gestión del mantenimiento industrial. Con este fin, se desarrolla el método de categorización de activos, que se puede definir como la jerarquización de los equipos y herramientas de la organización, en pro de focalizar óptimamente las estrategias y esfuerzos del mantenimiento centrado en confiabilidad. Por esta razón, se plantea la aplicación del algoritmo para la toma de decisiones en ambientes complejos PJA, que permite la elección entre una serie de alternativas frente a la evaluación objetiva de criterios de evaluación en función de un objetivo definido.

En otros términos, se puede decir que el algoritmo proceso de jerarquía analítica permite la elección de una opción en función del análisis de múltiples criterios basados en información de conocimiento seguro. Si bien es cierto que este algoritmo matemático es una herramienta para la toma de decisiones, este también puede ser aplicado a un proceso de categorización, ya que los resultados obtenidos son de carácter porcentual. Esta característica posibilita la segmentación o categorización en factor de niveles de importancia, en la cual, el activo que tiene mayor importancia es aquel obtenga un valor cercano a 100 %, y los de menor importancia son aquellos que obtengan un valor cercano a 0 %. Una vez definidos los aspectos generales referentes a la categorización de activos, es importante desenvolver el método en factores del algoritmo matemático, para lo cual se debe identificar y definir, en primer lugar, el objetivo general para la evaluación, y, en segundo lugar, las alternativas de decisión, seguidas de los criterios de evaluación. Por último, se formula el algoritmo, el análisis de sensibilidad y la evaluación de los resultados, comprendida como la escala de categorización.

Para empezar esta labor, se debe definir el objetivo general y la categorización de los activos, equipos o herramientas, según su grado de importancia en la organización. Ahora bien, en la toma de decisiones, es necesario evaluar las alternativas frente a criterios que aporten a la resolución del objetivo general. Para este caso, se identifican y determinan como criterios principales los siguientes:

- Rendimiento: hace referencia a la percepción que se tiene del rendimiento de los equipos o herramientas evaluadas. Dado que este es un criterio de carácter cuantitativo, su comparación con respecto a cada una de las alternativas de decisión puede ser medida de manera aritmética.
- Costo del activo: es un criterio cuantitativo que hace referencia al valor económico del activo, equipo o herramienta. Al igual que el criterio de rendimiento, este puede ser medido de manera aritmética mediante la comparación de los costos de cada una de las alternativas evaluadas.
- Prioridad en el sistema: es un criterio cualitativo que hace referencia a la prioridad o preferencia del activo, equipo o herramienta evaluada en el flujo del proceso productivo. Al ser un criterio de carácter cualitativo, su comparación con respecto a cada una de las alternativas de elección se debe hacer mediante juicios de valor.

- Vida útil del activo: es un criterio cuantitativo que hace referencia a la percepción que se tiene del periodo de tiempo que se estima que pueda tener el activo, equipo o herramienta evaluada, para cumplir correctamente con la función para la cual ha sido creado.
- Calidad: es un criterio que hace referencia al grado de satisfacción que se obtiene de las actividades o funciones desempeñadas por el activo evaluado.
- Criticidad del activo: criterio cualitativo que hace referencia al grado de riesgo frente al fallo, que presentan los activos evaluados.

Otros rasgos de gran importancia para la resolución del objetivo propuesto son la identificación y determinación de las alternativas de decisión, que para este caso se definen como los activos, equipos y herramientas a categorizar. Esto implica que el número de alternativas de decisión esté en función de la cantidad de equipos y herramientas sujetos a la implementación de mantenimiento centrado en confiabilidad, es decir que, en términos matemáticos: i subíndice que identifica el número de alternativas sea: $(i=1,2,3\dots m)$, donde m tome el valor asociado a tantas alternativas haya.

Consideremos ahora la formulación matemática del modelo a aplicar, el cual tiene como objetivo la toma de decisiones bajo certidumbre, mediante la comparación pareada de alternativas de decisión frente a criterios de evaluación. Es así que, en primera instancia, conviene considerar que cada matriz de comparación pareada del orden $A_{m \times n}$ debe cumplir con los siguientes axiomas:

Axioma 1: reciprocidad

$$Si a_{ij} * a_{ji} = 1 \rightarrow a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \forall 1 \leq a_{ij} \leq 9$$

Axioma 2: homogeneidad

$$si i = j \rightarrow a_{ij} = a_{ji} = 1$$

Axioma 3: consistencia

$$CR \begin{cases} \leq 0.1 \text{ se considera aceptable} \\ \geq 0.1 \text{ Las opciones y juicios deben ser reconsiderados} \end{cases}$$

De manera semejante, se exponen los siguientes subíndices del algoritmo matemático, donde:

i = índice que identifica las alternativas de decisión.

j = índice que identifica los criterios de evaluación.

c = índice que identifica las matrices de tipo comparación criterio a criterio j .

d = índice que identifica las matrices de tipo comparación alternativa a alternativa i frente al criterio j .

m = índice que identifica el número de filas que compone la matriz.

n = índice que identifica el número de columnas que compone la matriz.

k = índice auxiliar que identifica a j en los valores v_{ij} ; a_{ij} y a i en los valores V_{cij} ; V_{ij} en las matrices w_j ; λ_i .

λ_a = valor de ponderación de AIV en el coeficiente de consistencia.

a_{ij} = valor de comparación entre alternativa y alternativa i en con respecto al criterio j o comparación de criterio a criterio j .

x_{ij} = valor normalizado del valor de comparación entre alternativa y alternativa i en con respecto al criterio j o comparación de criterio a criterio j .

A = matriz cuadrada de comparación.

A_c = matriz cuadrada de comparación criterio a criterio j .

A_d = matriz cuadrada de comparación alternativa a alternativa i con respecto al criterio j .

A^N = matriz cuadrada normalizada.

A_c^N = matriz cuadrada normalizada de la comparación criterio a criterio j .

A_d^N = matriz cuadrada normalizada de la comparación alternativa a alternativa i con respecto al criterio j .

λ = matriz de $(m \times 1)$ que identifica el vector de ponderación de las comparaciones A^*V para el coeficiente de consistencia.

RC = razón de consistencia.

IC = índice de consistencia.

IA = índice de consistencia aleatorio.

Para avanzar en nuestro razonamiento, se presentan los parámetros del modelo matemático aplicado: en primer lugar, la escala fundamental de importancia (tabla 1); en segundo lugar, los criterios de evaluación; y, en tercer lugar, las alternativas de decisión.

Tabla 1.

Escala fundamental de importancia

Intensidad o importancia	Definición
1	Igual importancia
2	Leve o ligera
3	Importancia moderada
4	Más que moderada
5	Importancia fuerte
6	Más fuerte

Intensidad o importancia	Definición
7	Muy fuerte
8	Muy muy fuerte
9	Importancia extrema

Fuente: Saaty (2008).

En cuanto a la formulación del algoritmo matemático, se expresan las variables:

v_{ai} = valor de ponderación.

v_{aci} = valor de ponderación de la comparación criterio a criterio j.

v_{adi} = valor de ponderación de la comparación alternativa a alternativa i con respecto al criterio j.

w_{ai} = valor de prioridad global.

V = matriz de (mx1) que identifica el vector de ponderación de las comparaciones.

V_c = matriz de (mx1) que identifica el vector de ponderación de las comparaciones criterio a criterio j.

V_d = matriz de (mx1) que identifica el vector de ponderación de las comparaciones de alternativa a alternativa i con respecto al criterio j.

U = matriz de (mxn) que agrupa los vectores V_d de ponderación de las comparaciones de alternativas a alternativas i con respecto al criterio j.

W = matriz de (mx1) que determina el vector de prioridad global.

Finalmente, se desarrolla la contextualización del modelo matemático, donde se tienen las ecuaciones para:

Valor normalizado:

$$x_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_i^m a_{ij}} \quad \forall i = 1,2,3, \dots m; j = 1,2,3, \dots n \in A_c, A_d \quad (1)$$

Valor de ponderación:

$$V_{ai} = \frac{\sum_{j=1}^m x_{ij}}{n} \quad \forall i = 1,2,3, \dots m; j = 1,2,3, \dots n \in A_c, A_d \quad (2)$$

Valor de prioridad global:

$$w_{ai} = \sum_{k=1}^p v_{adik} v_{ackj} \quad \forall k = 1,2,3, \dots p : k = j \in V_d, k = i \in V_{dc} \quad (3)$$

Valor de ponderación para el coeficiente de correlación:

$$\lambda_{ai} = \sum_{k=1}^p a_{ik} v_{akj} \quad \forall k = 1,2,3, \dots p : k = j \in A, k = i \in V \quad (4)$$

Valor máximo para el coeficiente de correlación:

$$\lambda \max = \sum_{i=1}^m \lambda_{ai} \quad (5)$$

Razón de consistencia:

$$CR = \frac{IC}{IA} \quad (6)$$

Índice de consistencia:

$$IC = \frac{\lambda \max - n}{n - 1} \quad (7)$$

Índice de consistencia aleatorio:

$$IA = \frac{1.98(n - 2)}{n} \quad (8)$$

Matriz de orden (mxm) de comparación:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2j} \\ a_{31} & a_{32} & \cdots & a_{3j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{ij} \end{bmatrix} \forall A_c = 1,2,3 \dots m, \forall A_d = 1,2,3 \dots n \quad (9)$$

Matriz de orden (mxm) de normalización:

$$A^N = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1j} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2j} \\ x_{31} & x_{32} & \cdots & x_{3j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \cdots & x_{ij} \end{bmatrix} \forall A_c = 1,2,3 \dots m, \forall A_d = 1,2,3 \dots n \quad (10)$$

Matriz de orden (mx1) que indica el vector de ponderación:

$$V = \begin{bmatrix} v_{a11} \\ v_{a21} \\ v_{a31} \\ \vdots \\ v_{am1} \end{bmatrix} \forall V_c = 1,2,3 \dots m, \forall V_d = 1,2,3 \dots n \quad (11)$$

Matriz de orden (mxn) que agrupa los vectores de ponderación V_d :

$$U = [V_{d1} \quad V_{d2} \quad V_{d3} \quad \cdots \quad V_{dn}] \forall V_d = 1,2,3 \dots n \quad (12)$$

Matriz de orden (mx1) vector de prioridad global:

$$W = \begin{bmatrix} w_{a11} \\ w_{a21} \\ w_{a31} \\ \vdots \\ w_{am1} \end{bmatrix} \forall w_a = 1,2,3 \dots n \quad (13)$$

Síntesis en términos matriciales para el cálculo de la matriz W:

$$W = U * V_c \therefore W = \begin{bmatrix} v_{ad11} & v_{ad12} & \dots & v_{ad1k} \\ v_{ad21} & v_{ad22} & \dots & v_{ad2k} \\ v_{ad31} & v_{ad32} & \dots & v_{ad3k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{adim} & v_{adim} & \dots & v_{adik} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v_{ac11} \\ v_{ac21} \\ v_{ac31} \\ \vdots \\ v_{ackj} \end{bmatrix} \forall v_{ac}, \forall v_{ad} \quad (14)$$

Matriz de orden (mx1) vector prioridad coeficiente de consistencia:

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{a11} \\ \lambda_{a21} \\ \lambda_{a31} \\ \vdots \\ \lambda_{ai1} \end{bmatrix} \forall \lambda_a \quad (15)$$

Síntesis en términos matriciales para el cálculo de la matriz λ

$$\lambda = A * V \therefore W = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} \\ a_{31} & a_{32} & \dots & a_{3j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{ij} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v_{a11} \\ v_{a21} \\ v_{a31} \\ \vdots \\ v_{akj} \end{bmatrix} \forall A, \forall V \quad (16)$$

Para continuar conforme a la formulación del modelo matemático, es necesario hacer el despliegue del algoritmo matemático, proceso de jerarquía analítica en función del objetivo general: categorizar los activos, equipos o herramientas en la implementación del RCM. Con este fin, y en congruencia con lo planteado por el algoritmo de toma de decisiones bajo certidumbre PJA, es necesario identificar y determinar tanto los criterios de evaluación como las alternativas de decisión, los cuales han sido previamente aclarados. Esto conduce a la determinación de criterios de evaluación, que permiten el desarrollo del método de categorización; en este caso, se identifican como criterios de evaluación en la categorización de activos los consagrados en la tabla 2:

Tabla 2.

Parámetros: criterios de evaluación

J	1	2	3	4	5	6
Criterio	Rendimiento	Costo	Prioridad	Vida útil	Calidad	Criticidad

Como se observa en la anterior tabla, se identifican como principales criterios de evaluación para la categorización de los activos, equipos o herramientas: rendimiento, costo del activo, prioridad en el sistema, vida útil del activo, calidad y criticidad del activo. Estos son factores de gran importancia para el desarrollo del proceso productivo en las organizaciones.

Tras la identificación de los criterios, es necesario reconocer las alternativas de decisión en la categorización de los activos, tal como se exponen, a manera de ejemplo, en la tabla 3:

Tabla 3.

Parámetros: alternativas de decisión

i	Alternativa
1	#A
2	#B
3	#C
4	#D
5	#E
6	#F
7	#G
8	#H
9	#I
10	#J

Es importante entender que las alternativas de decisión, para el caso de la categorización de los activos, equipos y herramientas, serán los activos o máquinas involucrados en el proceso productivo de la organización; a su vez, estos serán los equipos o herramientas sujetos a la implantación del mantenimiento centrado en confiabilidad.

A modo de ejemplo, en la tabla 5 se indican las alternativas de decisión, es decir, los activos, equipos y herramientas, con el signo #, seguido de una letra mayúscula. Esto con el fin de asemejarlos a la nomenclatura de los activos, en la cual, el signo # representa el código de referencia del activo de la letra en mayúscula. De forma práctica, para el despliegue, se delimita el número de alternativas posibles a diez; sin embargo, este proceso no corresponde a una limitación en la implantación, ya que el método propuesto pretende evaluar cuantos activos existan en la organización.

Cabe aclarar que, el desarrollo del algoritmo matemático PJA es igual cuando se tienen dos alternativas de decisión que cuando se tiene un número muy grande de alternativas, situación en la que, un número de alternativas reducidas conlleva un número reducido de comparaciones, ponderaciones y matrices, y un número mayor de alternativas derivan en un número mayor de comparaciones y ponderaciones. Un ejemplo de lo anterior es cuando se tienen diez alternativas de decisión con seis criterios de evaluación, entonces, se tendrán seiscientos treinta y seis (636) comparaciones, setenta y seis (76) ponderaciones, y dieciséis matrices.

Por último, la figura 3 muestra la representación gráfica del *algoritmo proceso de jerarquía analítica para la categorización de los activos*. En la imagen se logra identificar de forma jerárquica, en su nivel más alto, el objetivo general —que en este caso es la categorización de los activos frente a los criterios de evaluación que están en el segundo nivel de jerarquía—, y, en el nivel más bajo de la jerarquía, las alternativas de decisión.

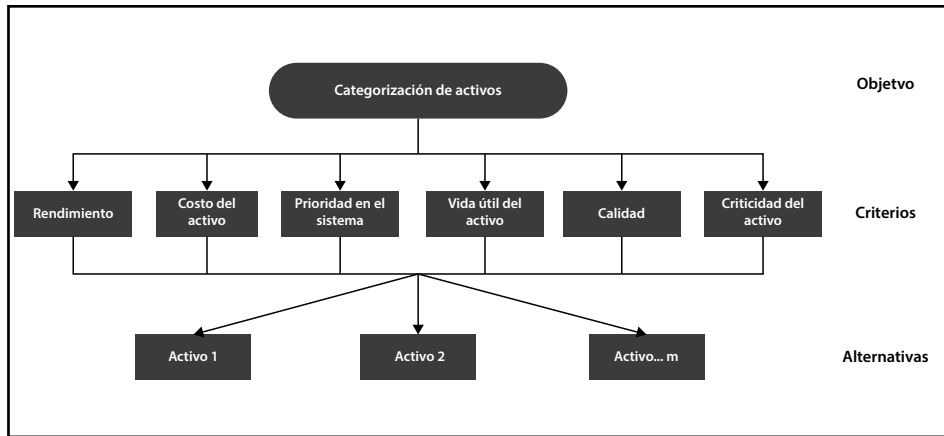


Figura 3. Representación gráfica del algoritmo PJA.

Ahora bien, será preciso mostrar que el mantenimiento centrado en confiabilidad fundamenta sus estrategias en el uso de métodos predictivos de detección temprana del fallo, lo que permitirá al administrador del mantenimiento en las organizaciones cumplir con el objetivo principal del RCM, que, en últimas, es asegurar el óptimo funcionamiento de los activos de la compañía en la medida en que cada uno de los equipos o herramientas involucrados en los procesos productivos presten siempre las funciones para las cuales fueron creados de manera ininterrumpida y con la calidad esperada.

Este planteamiento no solo supone el uso de herramientas de detección temprana del fallo, sino también la implementación de todas las técnicas de mantenimiento industrial disponibles. Aun cuando esto es flexible, en tanto que se puede prescindir de ciertas técnicas, es importante recalcar que en el planteamiento del RCM son de gran importancia los métodos de mantenimiento como el predictivo, el programado, el planificado y el correctivo, aplicados en las medidas preventivas, los procedimientos y tareas de mantenimiento.

A menudo la aplicación temprana de técnicas de detección de fallos como análisis de vibraciones o termografías requiere de equipos de medición altamente costosos que, a su vez, deben ser operados por personal altamente capacitado con el fin de obtener datos fehacientes. Posteriormente, estos tendrán que ser analizados por personal cualificado y experto en el tema, con el fin de obtener un pronóstico de los posibles fallos. Dichos pronósticos, así mismo, conllevan el uso de una gran cantidad de datos, información que solo puede ser obtenida del análisis constante de los equipos o herramientas estudiados.

En resumen, todo este trasfondo hace del mantenimiento predictivo una herramienta de alto costo, que motiva a hacer un uso eficiente de los recursos. Si bien las organizaciones determinan el nivel o alcance de las medidas preventivas que aplicarán en función a las estrategias corporativas, es importante hacer un uso eficiente de los

recursos u optimizarlos, de manera tal que de ellos se pueda obtener el mayor beneficio sin utilizarlos de más. Sea cual sea el alcance de las técnicas tempranas de detección de fallos en los procesos de mantenimiento, se debe hacer una elección idónea de aquella que ofrezca las mayores ventajas para la organización.

Esta es la razón por la que se concibe el empleo del algoritmo matemático proceso de jerarquía analítica para la toma de decisión bajo certidumbre en la selección del tipo de mantenimiento a aplicar, con el fin de seleccionar y aplicar el método de detección de fallos que mejor se ajuste a las necesidades y restricciones de la organización. Para empezar esta labor, se debe definir el método de mantenimiento de detección de fallos que mejor se amolde a los requerimientos de los activos, equipos o herramientas.

En toda toma de decisiones se involucran criterios o parámetros de evaluación que se encargan de moldear la decisión para que esta se ajuste a dichos criterios y represente la mejor opción en función al objetivo general. Para el caso de la selección del método de detección de fallos a implementar, en primer lugar, se contempla como criterios de evaluación el costo de aplicación criterio cuantitativo, que hace referencia al valor económico requerido en la aplicación de la técnica de detección de fallos. Dado que este criterio es de carácter cuantitativo, su comparación se puede efectuar de forma aritmética mediante la comparación de los costos de aplicación de los métodos de detección de fallos. En segundo lugar, se considera la experticia requerida para la aplicación del criterio cualitativo, que hace referencia al grado de conocimientos técnicos o profesionales necesarios para la aplicación del método de detección de fallos. Dado que este es un criterio de carácter cualitativo, su comparación estará en función de los requerimientos específicos de cada alternativa de decisión. En tercer lugar, se estima la frecuencia de aplicación, criterio cuantitativo que hace referencia a la periodicidad tanto en la recolección de datos como en el análisis que requiere el método de detección de fallos en la ejecución de sus tareas. En cuarto lugar, se contempla el modo de fallo, criterio cualitativo que apunta a los modos de fallo de mayor relevancia de cada uno de los activos, a los cuales se le aplica el método de detección de fallos. El criterio modo de fallo es uno de los más importantes, ya que el objetivo de la selección es elegir el método de detección de fallos que presente mayores beneficios para la organización.

Posterior a la identificación de los criterios de evaluación, es necesario determinar las *alternativas de decisión* en la elección del método de detección de fallos a implementar. Para este caso, se definen como alternativas de decisión a los métodos de detección de fallo consagrados en las normas ISO 18436-2 a 18436-8, por las cuales se establecen las pautas internacionales para el monitoreo de estado y diagnóstico de máquinas, requisitos para la calificación y evaluación de personal en diagnóstico y análisis como vibraciones, aceites, emisiones acústicas, termografías y ultrasonidos. Estos tipos de análisis fueron elegidos y determinados como los métodos más idóneos para la detección de fallos, con base en la pertinencia y relevancia de los mismos, demostradas a lo largo de la historia. Si se tiene en cuenta que uno de los objetivos de la selección del método de detección de fallos es proporcionar herramientas idóneas para la gestión de

activos a la organización, qué mejor que implementar métodos de detección de fallos abalados y normalizados mundialmente.

De manera puntual, se hace referencia a las técnicas de detección de fallos como el análisis de vibraciones, que estudia las vibraciones en los equipos o hermanitas, enmarcado en la norma ISO 18436-2; el análisis de aceites, que estudia los componentes presentes en los aceites usados en los equipos o hermanitas, el diagnóstico y análisis de vibraciones, consolidado en la norma ISO 18436-4 a 18436-5, el análisis de aceites en taller y el análisis de aceites en laboratorio, respectivamente; el análisis de emisiones acústicas, que estudia y analiza la diferentes emisiones acústicas de los equipos o hermanitas, tareas que se enmarcan en la normas ISO 18436-6; el análisis de termografías, que estudia y analiza la radiación térmica de los equipos o hermanitas en tiempo real para su diagnóstico, enmarcado en la norma ISO 18436-7; y, por último, el análisis de ultrasonidos, que estudia y analiza los movimientos o vibraciones de ultrasonido de los equipos o hermanitas para su diagnóstico, aglomerado en la norma ISO 18436-8.

En este punto, se debe considerar la formulación del modelo matemático para la elección del método de detección de fallos a aplicar, el cual se efectúa de manera similar a como ocurre en la categorización de activos, equipos o hermanitas, mediante el uso del algoritmo matemático PJA, para la toma de decisiones bajo certidumbre. Además, se debe hacer el despliegue del algoritmo matemático proceso de jerarquía analítica en función del objetivo general: la selección del método de detección de fallos a implementar en el RCM. Lo anterior conlleva la determinación de criterios de evaluación que permiten el desarrollo del método de categorización; en este caso, se identifican como criterios de evaluación en la selección del método de detección de fallos (tabla 4):

Tabla 4

Criterios de evaluación para la selección del método de detección de fallos

j	1	2	3	4	5	6	7
Criterio	Costo	Experticia	Frecuencia	Modo de fallo 1	Modo de fallo 2	Modo de fallo 3	Modo de fallo 4

De la anterior tabla, se colige que, en la selección del método de detección de fallos en primera instancia, se han determinado como criterios de evaluación, por un lado, aquellos inherentes a su aplicación como el costo, la experticia y la frecuencia, y, por otro lado, los criterios de evaluación en función a los requerimientos de detección. En este caso, con los modos de fallo que deben ser detectados, se hace una delimitación de manera práctica a los cuatro principales modos de fallo presentes en el activo, equipo o hermanita; frente a esto, se hace la salvedad de que, en la implementación, es posible y recomendable extender el número de modos de fallo analizados. Luego de la identificación y determinación de los criterios de evaluación, se deben identificar y determinar las alternativas de decisión para la selección del método de detección de fallos a implementar, según expone la tabla 5:

Tabla 5.

Alternativas de decisión en la selección del método de detección de fallos

i	Alternativa
1	Análisis de vibraciones
2	Análisis de aceites
3	Análisis emisiones acústicas
4	Análisis de termografías
5	Análisis de ultrasonidos

La anterior tabla demuestra la determinación de cinco alternativas de decisión, las cuales son herramientas o métodos para la detección de fallos. Como se ha expresado previamente en este documento, los métodos de detección de fallos aquí plasmados corresponden a métodos con resultados demostrados a lo largo de la historia a nivel global.

Por último, en la figura 4 se indica la representación gráfica del algoritmo proceso de jerarquía analítica para la selección del método de detección de fallos:

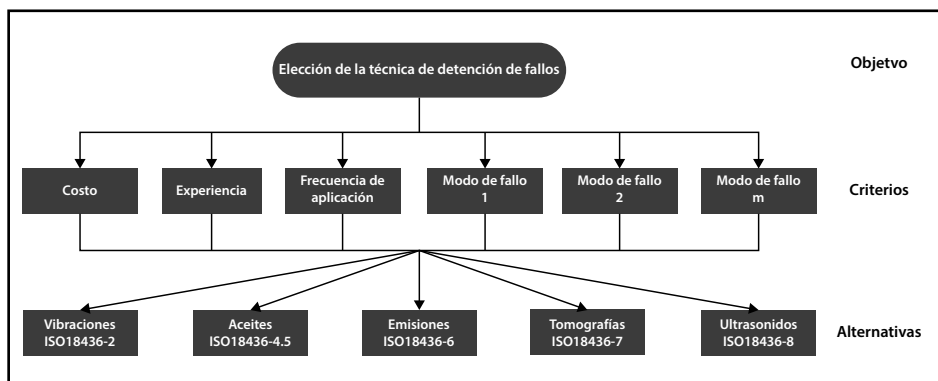


Figura 4. Representación gráfica del algoritmo PJA para la selección del método de detección de fallos.

En la figura anterior, se logra identificar de forma jerárquica, en su nivel más alto, el objetivo general, que en este caso es la categorización de los activos, frente a los criterios de evaluación, que se encuentran en el segundo nivel de jerarquía, y las alternativas de decisión, que están en el nivel de jerarquía más bajo.

Conclusiones

A continuación, se exponen las principales conclusiones en torno a la investigación.

En primer lugar, la descripción del problema deja entrever que sus principales causas son de carácter administrativo, es decir que obedecen a la gestión y administración del mantenimiento; específicamente, las causas del problema de investigación se

relacionan con el déficit en el diseño, planeación, dirección, control y retroalimentación de los procesos de administración del mantenimiento industrial.

Esta carente gestión del mantenimiento industrial en las organizaciones se suma a la inadecuada y casi nula integración de los sistemas empresariales. Solo las empresas de gran bagaje y éxito en el mercado logran una unión amalgamada de todas sus áreas; aquellas organizaciones que no lo consiguen, están condenadas al fracaso, al no poder dar respuesta ágil a las necesidades cambiantes y crecientes del mercado.

Existen múltiples estrategias administrativas para amalgamar la estructura empresarial y hacer de la organización un sistema eficiente proactivo y unido; el mantenimiento industrial no es la excepción. Así como las estrategias administrativas buscan la integración vertical de la compañía en función a los objetivos estratégicos, técnicas como el RCM pretenden la integración de los procesos de mantenimiento industrial en las estrategias corporativas. Por esta razón, el RCM se establece como base importante en la solución del problema de investigación, ya que una gran parte de sus causas se deriva de la inexistencia de gestión de los activos en el mantenimiento industrial; entonces, es necesario implementar técnicas o métodos que brinden herramientas tanto administrativas como técnicas a los procesos de mantenimiento industrial.

En sus fases, el RCM otorga las herramientas necesarias para establecer una eficiente gestión de los activos, equipos y herramientas. *Grosso modo*, las fases que conforman el RCM son:

- Fase 1: la planificación del proceso RCM
- Fase 2: la determinación de objetivos
- Fase 3: la elaboración del árbol jerárquico
- Fase 4: especificaciones y funciones
- Fase 5: fallos y modos de fallo
- Fase 6: la evaluación de la criticidad
- Fase 7: la adopción de medidas preventivas o paliativas.

De forma general, se identifican dos grandes etapas del RCM: 1) la relacionada con el empalme o amalgamamiento con los objetivos y metas de la organización, desde la fase 1 hasta la fase 2, en la cual, el despliegue de dichas fases brinda a la organización una conjunción entre los objetivos de la organización y los objetivos propios del RCM; 2) la relacionada con el análisis de los activos, desde la fase 3 hasta la 6, en la cual, el despliegue de dichas fases ofrece al mantenimiento industrial las bases necesarias para efectuar un mantenimiento centrado en la confiabilidad, a fin de asegurar la confiabilidad de los equipos.

Una vez establecido el RCM como el caballo de batalla que puede solucionar los problemas del mantenimiento industrial en las organizaciones, se debe pensar

en la optimización de dichos recursos, tema frente al cual, este estudio planteó la categorización de los activos.

En ese orden, se concluye que la categorización de los activos permite la optimización de los recursos requeridos en la gestión del RCM. La segmentación o priorización de los activos, equipos y herramientas, se debe hacer no solo con base en su criticidad —como lo plantea el RCM—, sino desde los criterios de costo, producción y otros adicionales, que posibiliten un análisis global del activo con respecto a los procesos productivos y así poder enfocar de manera más eficiente los recursos. Este proceso debe propender por la focalización de las medidas de prevención o paliativas de mayor envergadura e importancia para los activos, equipos o herramientas, que presenten un grado de prioridad; asimismo, aquellos activos de menor importancia deben ser gestionados de manera general en conformidad con los objetivos de la compañía y del RCM.

En resumen, la categorización de activos faculta que la gestión de los activos de mayor rango de importancia se haga a través de técnicas como el mantenimiento predictivo y la de los demás activos se gestione gracias a técnicas programadas, planificadas y/o correctivas. Ahora bien, esta conclusión permite deducir la necesidad de seleccionar un método de detección de fallos acorde a los requerimientos técnicos del activo a gestionar por mantenimiento predictivo. En este caso, al igual que con la categorización de activos, la implantación del algoritmo matemático determinístico PJA permite evaluar las múltiples alternativas de decisión no solo en función de sus capacidades de detección, tal como se suele hacer de manera comercial, sino en función de los modos de fallo a detectar en los aspectos de sus aplicación.

Finalmente, tanto el RCM, la categorización de activos y la selección de métodos de detección temprana de fallos no estarían completos sin una herramienta como el QFD, que contribuye a la gestión de calidad y mejora continuamente los procesos, seguida del Método Delphi, técnica ampliamente usada en la resolución de problemas y en la emisión de información, en su mayoría, de carácter cualitativo, la cual contribuye en la comunicación de los juicios de valor de las comparaciones requeridas en el algoritmo matemático PJA. Por último, normas como la ISO 55000, la gestión de activos y la norma SEA JA IOII, son criterios de evaluación para los procesos de mantenimiento centrados en confiabilidad, gracias a las cuales, se buscan ofrecer a las organizaciones herramientas normalizadas, con el fin de lograr posteriores certificaciones.

Para finalizar, la implementación de RCM y la categorización de los activos dan lugar a que la organización sea más competitiva y pueda aumentar indicadores como el OEE, que permite evaluar los procesos de mantenimiento con respecto a índices globales y el incremento de los indicadores propiamente medidos por la organización.

Referencias

Acevedo, A. M. (2012). *Preditécnico*. Recuperado de: <https://goo.gl/NXftBG>

Augusto, L. (2000). *Administración moderna de mantenimiento*. Brasil: Novo Polo Publicación.

- Barraza, M. F. (2007). *El Kaizen, la filosofía de la mejora continua e innovación incremental detrás de la administración por calidad total*. México D. F.: Panorama Editorial. S. A.
- Chase, R. B., Jacobs, F. R. y Aquilano, N. J. (2009). *Administración de operaciones, producción y cadena de suministros*. España: McGraw Hill Companies Inc.
- Cruelles, J. A. (2010). *La teoría de la medición del despilfarro*. Torrijos: Artef, S. L.
- DANE. (2014). *Encuesta Anual Manufacturera (EAM)*. Bogotá: DANE.
- DANE. (s. f.). *Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las actividades económicas. Revisión 3.I. Adaptada para Colombia*. Bogotá: DANE.
- Duffuaa, S., Raouf, A. y Dixon, J. (2000). *Sistemas de Mantenimiento Planeación y Control*. México D. F.: Grupo Noriega Editores.
- García, S. (2003). *Organización y gestión integral del mantenimiento. Manual práctico para la implantación de sistemas de gestión avanzados de mantenimiento industrial*. España: Ediciones Díaz de Santos S. A.
- González, F. J. (2005). *Teoría y práctica del mantenimiento industrial*. España: Fundación Confemetal.
- González, F. M., Mera, A. C. y Lacoba, S. R. (2007). *Introducción a la gestión de calidad*. Madrid España: Delta Publicaciones.
- Ipinza, F. D. (2004). *Administración y dirección de la producción. Enfoque estratégico y de calidad*. México D. F.: Pearson Educación.
- Márquez, A. C., León, P. M. y Herguedas, A. S. (2004). *Ingeniería de mantenimiento. Técnicas y métodos de aplicación a la fase operativa de los equipos*. España: Asociación Española de Normalización y Certificación (Aenor).
- Moubray, J. (2004). *RCM II. Mantenimiento centrado en confiabilidad*. España: Aladon Ltd.
- Niebel, B. y Freivalds, A. (2000). *Ingeniería Industrial. Métodos, estándares y diseño del trabajo*. México D. F.: Alfaomega.
- Robles, F. B. (2005). El mantenimiento predictivo es un pilar fundamental del RCM. *Preditécnico*, 18.
- Saaty, T. (1997). *Toma de decisiones para líderes. El proceso analítico jerárquico en la toma de decisiones en un mundo complejo*. Pittsburgh: RWS Publications.
- Saaty, T. (2008). Relative measurement and its generalization in decision making why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors the analytic hierarchy network process. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 102, pp. 251-318.
- SAE JA1012. (2002). SAE JA1012. *Una guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC)*. Society of Automotive Engineers.
- Schroeder, R. G., Goldstein, S. M. y Rungtusanatham, M. J. (2011). *Administración de operaciones conceptos y casos contemporáneos*. México D. F.: McGraw Hill Companies Inc.

- Taha, H. A. (2012). *Investigación de operaciones*. México: Pearson Educación.
- Velasco, J. A. (1994). *Gestión de la calidad empresarial, calidad en los servicios y atención al cliente en calidad total*. Madrid: ESIC Editorial.
- Villanueva, E. D. (2014). *La productividad en el mantenimiento industrial*. México: Grupo Editorial Patria.