

Mantenimiento industrial centrado en la optimización de los recursos y la gestión de la vida útil de los activos

Cristian Alejandro Zafra Rodríguez

Universitaria Agustiniiana, Bogotá Colombia, ing.cristianzafra@gmail.com

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, que solo un 21% utiliza métodos de mantenimiento predictivo o bajo condiciones y aún más relevante es el hecho que solo 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 acarreado a problemas como sobrecostos, pérdidas económicas, pérdidas de mercado, mala calidad, baja productividad entre otras. A grosso modo la deficiente gestión del mantenimiento industrial acarrea a un uso ineficiente de los recursos empresariales es por esta razón que esta investigación busca brindar herramientas estratégicas para la gestión de activos, donde se logre efectuar un uso eficiente de los recursos desde la metodología de categorización de activos aquí propuesta y desde el método RCM, mantenimiento centrado en confiabilidad, se logre fortalecer aspectos como diseño, planeación, dirección y control de las operaciones en gestión del mantenimiento industrial de las organizaciones.

Palabras claves: Mantenimiento Industrial, Gestión de Activos, optimización, categorización de activos, RCM, PJA.

I. INTRODUCCIÓN

Teniendo como fin la identificación de la maquinaria que, por los diferentes factores atinentes al desarrollo de los procesos fabriles, se constituye o establece como de gran importancia en la cadena, bien sea por su inherente necesidad en la fabricación de los productos o por su predisposición a los fallos, o de igual manera presente una vida útil mermada que repercute en sobrecostos por remplazo de maquinaria para la organización

Para dicho análisis de criticidad se busca aplicar la herramienta de investigación de operaciones, conocida como proceso analítico jerárquico desarrollado por el profesor Thomas I Saaty de universidad de Pittsburgh en 1980, en el cual se 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 cualitativa y cuantitativa, llevando aspectos cualitativos de las variables presentes en los problemas que son objeto de estudio, a un aspecto cuantitativo medible, que permita una toma de decisiones asertiva teniendo en cuenta cada una de las variables estudiadas.

El proceso de jerarquía analítica busca estructurar el problema de forma jerárquica teniendo como cabeza de la

jerarquía el objetivo que se busca con el estudio, en el nivel más bajo son las alternativas acciones finales o planes de desarrollo y en los niveles intermedios criterios o variables para evaluar el objetivo final (Saaty T. I., 1997).

Este modelo nos permite la evaluación de los activos frente a criterios de evaluación relevantes en la categorización de los equipos y herramientas que intervienen en los procesos productivos de la organización, esto con el fin de focalizar la planeación y la gestión del mantenimiento industrial.

II. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

En el XVIII congreso internacional de mantenimiento y gestión de activos celebrado el 18 de mayo del 2016 en la ciudad de Bogotá a cargo de la Asociación Colombiana de Ingenieros ACIEM se pudo evidenciar el estado del mantenimiento industrial en Colombia, donde se vislumbraron problemas asociados con la gestión, ejecución, costos, entorno y por último formación.

Entre los principales problemas se identificó que solo el 19% de la población encuestada tiene algún tipo de certificación en la gestión de activos, que el 46% del mantenimiento practicado en las organizaciones es de carácter correctivo, y que el 32% realiza mantenimiento preventivo entre otros factores como lo son la falta de: planeación, capacitación, y competencias laborales, conllevan a que el mantenimiento en Colombia carezca de competitividad frente a la comunidad global.

De ahí que esta investigación se basa en analizar y dar solución al problema relacionado con la gestión del mantenimiento donde se propone por un lado lograr reducir el porcentaje de aplicación de mantenimiento correctivo aumentando la ejecución de mantenimiento predictivo, preventivo, planificado haciendo a la industria más propositiva y menos reactiva. Anudado de las buenas prácticas de mantenimiento industrial.

A. Formulación del problema.

Basado en la identificación de limitantes en la gestión del mantenimiento se busca brindar una solución a la pregunta de investigación:

¿Qué método se puede aplicar para administrar el mantenimiento industrial de forma que se logre focalizar actividades de mantenimiento predictivo, planeado, y preventivo en los equipos y herramientas de la organización?

Con esta pregunta de investigación se busca desarrollar un método de focalización para el mantenimiento industrial donde se le dé prioridad a tipos de mantenimiento como el predictivo, planeado, y preventivo, con lo cual se logre optimizar los recursos de mantenimiento y fortalecer una tendencia anticipativa y planificada en las actividades de mantenimiento de los equipos y herramientas.

B. Sistematización del problema.

- ¿cuáles deben ser los criterios de evaluación contemplados en el algoritmo proceso de jerarquía analítica para la categorización de los activos?
- ¿cuáles Deben ser los criterios y alternativas de evaluación contemplados en el algoritmo proceso de jerarquía analítica para la selección del método de detección de fallos a implementar en el mantenimiento predictivo?
- ¿Como evaluar el método de categorización de activos y de selección de método de detección de fallos?
- ¿Cómo se debe implementar el mantenimiento centrado en confiabilidad haciendo uso del método de categorización de activos propuesto?

III. JUSTIFICACIÓN

Con este proyecto se busca mostrar la importancia que tiene el jerarquizar los activos físicos, maquinarias y herramientas según el impacto que tiene en el desarrollo de las actividades de fabricación, esto con el fin de lograr una gestión eficiente del mantenimiento, proporcionando al administrador de los activos prioridades en las cuales fundamentar las estrategias y planes de mantenimiento.

Es decir que la jerarquización y priorización puede ser utilizada como una herramienta en la gestión del mantenimiento como también de la gestión misma de las operaciones del sistema productivo, de igual manera que se jerarquizan las máquinas y herramientas de acuerdo a su impacto se puede llevar a cabo dicho análisis con los fenómenos causantes de fallos en un activo físico específico, en el cual se priorizarían por ejemplo fenómenos de fatiga de materiales, esfuerzo, lubricantes, vibraciones y todos aquellos que son susceptibles a ser aplicados a los equipos y que busquen la prevención de fallos.

Para ello dispondremos de técnicas basadas en investigación de operaciones, estadística, y mantenimiento industrial ejes en los cuales basaremos el proyecto debido a las contribuciones que tiene estas áreas del conocimiento en el desarrollo de la investigación.

Como es el caso de la estadística herramienta a la cual acudimos en aras de realizar la recolección, procesamiento y análisis de datos numéricos derivados en la producción los cuales influyen de manera directa en la categorización, jerarquización y priorización de los activos físicos del proceso.

En definitiva, el eje principal es la investigación de operaciones medio por el cual se llevará a cabo la formulación y desarrollo del modelo (PJA), proceso de jerarquía analítica, como herramienta para el análisis, ponderación, y jerarquización de tanto los activos físicos, maquinaria y herramientas.

(PJA) proceso de jerarquía analítica fue elegido como la herramienta pilar en este proyecto debido a la versatilidad y flexibilidad que presenta para la toma de decisiones bajo incertidumbre ya que este modelo de análisis 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 (figura 1). 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 T. L., 1997)

Es así como buscamos indexar este modelo matemático a 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 económica, ya que el mantenimiento está ligado en gran parte a la capacidad de competitividad de las organizaciones.

IV. PROPÓSITO

Desarrollar una guía metodológica para categorización de activos basado en el algoritmo matemático determinístico PJA, proceso de jerarquía analítica, con el fin de proporcionar una herramienta administrativa para la gestión y la toma de decisiones en las operaciones inherentes al mantenimiento industrial, en el cual se logre focalizar los métodos de mantenimiento predictivo, planeado, y preventivo, en los activos físicos, equipos y herramientas, de las organizaciones enmarcados en el RCM, mantenimiento centrado en confiabilidad.

V. METODOLOGÍA

A. Tipo de investigación.

En el desarrollo del proyecto será implementado un tipo de investigación correlacional donde se empleará un método hipotético deductivo con un enfoque mixto de investigación que permitirá vincular los datos cuantitativos y cualitativos con el fin de mantener una estructura clara durante el proceso con el fin de obtener información estructurada, confiable y verídica con los cuales acceder al establecimiento de

parámetros claros e imparciales en la categorización de los equipos y herramientas.

Esto aplicado a una serie de etapas, recolección y análisis de datos, identificación de los criterios y alternativas del modelo matemático, desarrollo del método de categorización y por último la estructuración de la guía de implementación del método propuesto

B. Enfoque metodológico de la investigación.

En el desarrollo del proyecto será implementado un enfoque mixto de investigación que permitirá mantener una estructura clara durante el proceso con el fin de obtener datos confiables y verídicos con los cuales acceder al establecimiento de parámetros claros e imparciales en el plan de mantenimiento de los equipos e instalaciones.

Con el establecimiento de un proceso metódico y secuencial en cada etapa que guiará la investigación a la generalización y el control de resultados, de forma que la determinación de las diferentes variables sea confiable y el análisis de cada fenómeno sea objetivo.

Otorgándole características cuantitativas al proceso de recolección de los datos cualitativos, que permita obtener información confiable y a la vez conocer el dictamen de los analistas, estimando la reacción de los integrantes de las organizaciones que llegarían a ser afectados por la implementación de un plan de mantenimiento ya sea directo o indirecto.

Obteniendo información fácilmente analizable y estructurada, manteniendo conexión directa con el proceso que mejorara la etapa de implementación el plan de mantenimiento de los equipos e instalaciones.

C. Etapas de investigación.

Se plantea la estructura de investigación a desarrollar en 8 etapas de investigación ver figura 1.

Se logra identificar como eje temático del proyecto el modelo de investigación de operaciones PJA, proceso de jerarquía analítica, planteado como una herramienta en el análisis y ponderación de los factores críticos presentados en el proceso objeto de estudio, de igual manera se destaca la importancia de este modelo matemático para la generación de bases concretas para la categorización eficiente y enmarcado en la filosofía del mantenimiento centrado en la confiabilidad.

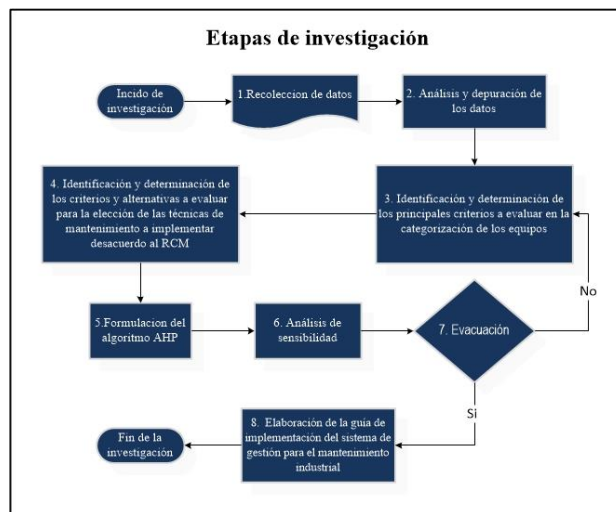


Fig. 1 Etapas de investigación (Autores, 2017)

VI. HIPÓTESIS

El uso del algoritmo determinístico de investigación de operaciones PJA, proceso analítico jerárquico permite la categorización de los activos, equipos y herramientas, en función de la preponderancia del activo en los procesos industriales, con el fin de focalizar de manera eficiente los métodos de mantenimiento predictivo, preventivo y planeado aplicados a los equipos y herramientas.

VII. VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN.

Ya que toda implementación de procesos, actividades o estrategias comprende en sus facetas la evaluación de los resultados obtenidos a raíz de lo implementado no es abstracto vincular indicadores de gestión que midan los resultados obtenidos por la implementación en este caso la implementación del mantenimiento centrado en confiabilidad y del método de categorización de activos propuesto en esta investigación.

Expresado lo anterior se puede afirmar que las variables de esta investigación girarán entorno a los aspectos comprendidos en la medición de resultados obtenidos es así como en términos generales se pueden agrupar las variables de la investigación en el indicador OEE Overall Equipment Efficiency (eficiencia general de los equipos).

La eficiencia de los equipos se puede definir a groso modo como los valores porcentuales que miden la disponibilidad, rendimiento y calidad de los equipos en las organizaciones donde la operación entre anteriores indicadores ver ecuación 1 genera el indicador general de eficiencia OEE.

$$OEE = Disponibilidad * Rendimiento * Calidad . (1)$$

Una vez obtenido el valor global de eficiencia de los equipos se puede clasificar según el nivel de excelencia siendo estos parámetros escalas de medida internacionales a la

excelencia como se puede observar en la tabla 1 donde se evidencia cinco niveles o clasificaciones: inaceptable, regular, aceptable, bueno, y excelente siendo los aproximados a cero por ciento los más inaceptables y los cercanos a cien por ciento excelentes como se dispone a continuación.

TABLA I
CLASIFICACIÓN OEE

Niveles porcentuales					Detalle	
0%	<	OEE	<	65%	=	Inaceptable. Muy baja competitividad
65%	<	OEE	<	75%	=	Regular. Baja competitividad. Aceptable sólo si se está en proceso de mejora
75%	<	OEE	<	85%	=	Aceptable. Continuar la mejora para avanzar hacia la World Class
85%	<	OEE	<	95%	=	Buena competitividad. Entra en Valores World Class
95%	<	OEE	<	100%	=	Excelente competitividad. Valores World Class

Fuente: La teoría de la medición del despilfarro. (Cruelles, 2010)

VIII. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.

A. Método de categorización de activos.

La implementación de mantenimiento centrado en confiabilidad busca lograr optimizar los diferentes recursos involucrados en la gestión del mantenimiento industrial, con este fin se desarrolla el método de categorización de activos.

Método el cual a groso modo se puede definir como la jerarquización de los activos, es decir equipos y herramientas de la organización con el fin de focalizar las estrategias y esfuerzos del mantenimiento centrado en confiabilidad de manera óptima.

Es por esto por lo que para el fin de categorizar los activos de la organización de estructura esta categorización en la aplicación del algoritmo matemático proceso de jerarquía analítica el cual en términos generales es aplicado en la toma de decisiones en conflicto bajo certidumbre.

En otros términos, se puede decir que el algoritmo proceso de jerarquía analítica permite la elección de una opción en función al análisis de múltiples criterios basados en información de conocimiento seguro.

Si bien es cierto el algoritmo matemático proceso de jerarquía analítico es una herramienta para la toma de decisiones y su uso se basa en la elección de la mejor alternativa frente a dos o más alternativas este puede ser aplicado a un proceso de categorización ya que los resultados obtenidos por la resolución del algoritmo son de carácter porcentual.

Característica que permite la segmentación o categorización en factor de niveles de importancia, siendo de mayor importancia el activo que obtenga un valor cercano a 100% y de menor importancia los activos que obtengan un valor cercano a 0%.

Una vez definido los aspectos generales referentes a la categorización de activos es importante el desenvolver el método en factores del algoritmo matemático proceso de jerarquía analítico para esto se deben identificar y definir las alternativas de decisión seguido de los criterios de evaluación, para continuar con la formulación del algoritmo, análisis de sensibilidad, y por último la evaluación de los resultados lo cual se comprende como la escala de categorización.

Objetivo general.

Se define como: la categorización de los activos, equipos y o herramientas, según su grado de importancia en la organización.

Criterios de evaluación.

En la toma de decisiones es necesario evaluar las opciones o alternativas frente a criterios o aspectos relevantes que aporten a la resolución del objetivo general de la toma de decisiones esto con el fin de ajustar la decisión o la elección en función de las apreciaciones planteadas en la resolución de la meta general.

Para el caso de la categorización de los activos según su grado de importancia en la organización se identifican como principales criterios, apreciaciones o llámense pautas de evaluación a: Productividad, costo del activo, prioridad en el sistema, vida útil del activo, calidad, y criticidad del activo siendo estos los principales criterios de evaluación que permiten establecer el grado de importancia de los equipos y herramientas para su posterior categorización.

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

Digital Object Identifier: (to be inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

tiempo estimado que el activo, equipo o herramienta evaluada puede tener cumpliendo correctamente con la función para la cual ha sido creado.

- **Calidad:** Criterio cualitativo que hace referencia a la percepción que se tiene del grado de calidad o satisfacción que se obtiene de las actividades o funciones desempeñadas por el activo, equipo o herramienta evaluada.
- **Criticidad del activo:** Criterio cualitativo que hace referencia a la percepción que se tiene del grado de riesgo al fallo que presenta los activos, equipos o herramientas, evaluados.

Alternativas de decisión.

Ya que el objetivo general es categorizar los activos, equipos y herramientas, según su grado de importancia para la organización las alternativas de decisión no son otras más que los activos, equipos y herramientas, a categorizar lo cual implica que el número de alternativas de decisión este en función a 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: $(i=1,2,3...m)$ donde ,m, tome el valor asociado a tantas alternativas hayan.

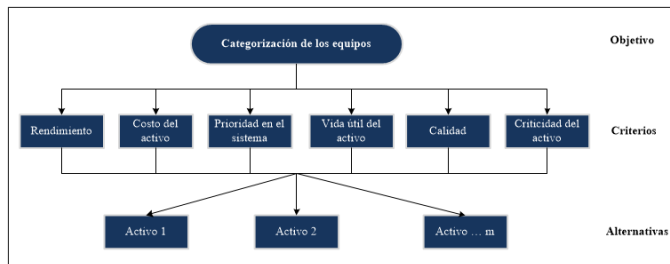


Figura 2 Representación gráfica del algoritmo PJA para la categorización de los equipos fuente: (Autores, 2017)

B. Selección del método de detección de fallos.

El mantenimiento predictivo implica el uso de grandes recursos económicos, tecnológicos, técnicos, entre otros que hacen de este tipo de mantenimiento uno de los más costosos actualmente, ya que no solo requiere del uso de ciertas tecnologías si no que adicional requiere de conocimientos expertos, de un nivel exorbitante de documentación, y de una fuerte disciplina.

A menudo la aplicación de técnicas de detección de fallos temprana 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 los cuales posteriormente tendrán que ser analizados por personal cualificado y experto en el tema con el fin de obtener un pronóstico de los posibles fallos más probables.

Pronósticos que a su vez implican 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 lo que deriva a la necesidad si bien de hacer un uso eficiente de los recursos a optimizarlos.

Si bien las organizaciones determinan el nivel o alcance de las medidas preventivas que aplicaran en función a las estrategias corporativas, es importante realizar un uso eficiente de los recursos u optimizarlos de manera tal que se obtenga el mayor beneficio sin utilizar de más recursos, sea cual sea el alcance de las técnicas de detección de fallos temprana a aplicar en los proceso de mantenimiento se debe hacer una elección idónea de aquella técnica que preste las mayores ventajas para la organización.

Es por la anterior razón que se concibe emplear el 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.

Objetivo general.

Se define como: la selección del método de mantenimiento de detección de fallos que mejor se amolde a los requerimientos de los activos, equipos o herramientas, a los cuales se les aplicara.

Criterios de evaluación

En toda toma de decisiones se involucran criterios o parámetros de evaluación que en últimas 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 se contemplan como criterios de evaluación: Costo de aplicación, experticia requerida, frecuencia de aplicación, y modos de fallo, siendo estos los principales criterios de evaluación en la selección del método de detección de fallos a implementar en las medidas preventivas del RCM, mantenimiento centrado en la confiabilidad.

- **Costo de aplicación:** Criterio cuantitativo que hace referencia a la percepción del valor económico requerido en la aplicación de la técnica de detección de fallos, alternativa de selección, al ser este criterio de carácter cuantitativo su comparación, juicios de valor, puede efectuarse de forma aritmética mediante la comparación de los costos de aplicación de las alternativas de decisión, métodos de detección de fallos.

- *Experticia requerida para su aplicación:* Criterio cualitativo que hace referencia a la percepción del grado de conocimientos técnicos o profesionales para la aplicación del método de detección de fallos, alternativas de decisión, este al ser un criterio de carácter cualitativo su comparación estará en función de los requerimientos específicos de cada alternativa de decisión.
- *Frecuencia de aplicación:* Criterio cuantitativo que hace referencia a la percepción que se tiene de 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, si bien es cierto la frecuencia de aplicación depende específicamente del grado de exactitud que se desee obtener con el análisis o con respecto al funcionamiento de la máquina este puede ser comparado de manera numérica.
- *Modo de fallo:* Criterio cualitativo que hace referencia a los modos de fallo de mayor relevancia de cada los activos, equipos o herramientas, al cual se le aplicara el método de detección de fallos, el criterio modo de fallo es una de los más importantes en la selección del método de detección de fallos a aplicar ya que en ultimas el propósito de la selección es elegir el método de detección de fallos que presente mayores beneficios para la organización.

Alternativas de decisión

Se identifican como alternativas de decisión en la elección del método de detección de fallos a implementar 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 monitoreo de estado y diagnóstico de máquinas - Requisitos para calificación y evaluación de personal en diagnóstico y análisis como Vibraciones, Aceites, emisiones acústicas, termografías y ultrasonidos Ver tabla II.

TABLA II
PRINCIPALES NORMAS TÉCNICAS APLICABLES EN LA INVESTIGACIÓN

Norma	Concepto
ISO 18436	Métodos de detección de fallos
ISO 55000	Gestión de activos
ISO 9000	Gestión de la calidad
ISO 14000	Gestión ambiental
SEAJA 1011	Evaluación en el RCM
SEAJA 1011	Guía de implementación RCM

Fuente (Autores, 2017)

Los anteriores tipos de análisis fueron elegidos y determinados como los métodos más idóneos para la detección de fallos basado la pertinencia y relevancia de los mismo

demostrada a lo largo de la historia, ya 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 que mejor que implementar métodos de detección de fallos abalados y normalizados mundialmente.

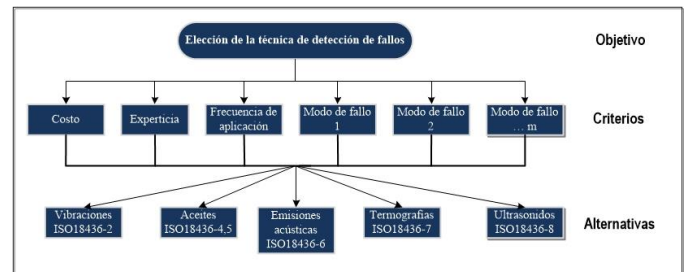


Figura 3 Representación gráfica del algoritmo PJA para la selección del método de detección de fallos fuente: (Autores, 2017)

C. Formulación matemática del modelo.

El objetivo de este modelo es la toma de decisiones bajo certidumbre mediante la comparación pareada de alternativas de decisión frente a criterios de evaluación teniendo donde:

El algoritmo matemático PJA, proceso de jerarquía analítica, determina que Cada matriz $A_{m \times n}$ de comparación pareada debe cumplir con los siguientes axiomas:

Axiomas.

Axioma 1: Reciprocidades.

$$Si, a_{ij} * a_{ji} = 1 \rightarrow a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \forall 1 \leq a_{ij} \geq 9 \quad (2)$$

Axioma 2: Homogeneidad.

$$Si, i = j \rightarrow a_{ij} = a_{ji} = 1 \quad (3)$$

Axioma 5: Consistencia.

$$CR \begin{cases} \leq 0.1 \text{ se considera aceptable} \\ \geq 0.1 \text{ Las opciones y} \\ \text{juicios deben ser reconsiderados} \end{cases} \quad (4)$$

Subíndices.

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 en los valores V_{cij} ; V_{ij} en las matrices w_i ; λ_i
 λ_a = valor de ponderación de APIV en el coeficiente de consistencia
 a_{ij} = valor 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 .
 AN = matriz cuadrada normalizada.
 AcN = matriz cuadrada normalizada de la comparación criterio a criterio j .
 AdN = 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

Parámetros.

- Escala fundamental de importancia

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	Mas fuerte
7	Muy fuerte
8	Muy muy fuerte
9	Importancia extrema

Tomado de (Saaty T. L., 2008) Rev. R. Cien. Serie. A. Mat. vol. 102

- Criterios de evaluación
- Alternativas de evaluación

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 $(m \times 1)$ que identifica el vector de ponderación de las comparaciones.
 V_c = matriz de $(m \times 1)$ que identifica el vector de ponderación de las comparaciones criterio a criterio j .
 V_d = matriz de $(m \times 1)$ que identifica el vector de ponderación de las comparaciones de alternativa a alternativa i con respecto al criterio j .
 U = matriz de $(m \times n)$ que agrupa los vectores V_d de ponderación de las comparaciones de alternativas a alternativas i con respecto al criterio j .
 W = matriz de $(m \times 1)$ que determina el vector de prioridad global.

Algoritmo.

Valor normalizado:

$$x_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}} \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, m; j = 1, 2, 3, \dots, n \in A_c, A_d \quad (5)$$

Valor de ponderación:

$$v_{ai} = \frac{\sum_{j=1}^m x_{ij}}{n} \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, m; j = 1, 2, 3, \dots, n \in A_c, A_d \quad (6)$$

Valor de prioridad global:

$$w_{ai} = \sum_{k=1}^p v_{aik} v_{ackj} \quad \forall k = 1, 2, 3, \dots, p : k = j \in V_d, k = i \in V_{de} \quad (7)$$

Valor de ponderación para el coeficiente de correlación:

$$\lambda_{ai} = \sum_{k=1}^p a_{ik} v_{akj} \quad \forall k = 1, 2, 3, \dots, p : k = j \in A, k = i \in V \quad (8)$$

Valor máximo para el coeficiente de correlación

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^m \lambda_{ai} \quad (9)$$

Razón de consistencia:

$$CR = \frac{IC}{IA} \quad (10)$$

Índice de consistencia:

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (11)$$

Índice de consistencia aleatorio:

$$IA = \frac{1.98(n-2)}{n} \quad (12)$$

Matriz de orden $(m \times m)$ de comparación:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} \\ a_{31} & a_{32} & \dots & a_{3j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nj} \end{bmatrix} \quad \forall A_c = 1, 2, 3, \dots, m, \forall A_d = 1, 2, 3, \dots, n \quad (13)$$

Matriz de orden $(m \times m)$ de normalización:

$$A^N = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} \\ x_{31} & x_{32} & \dots & x_{3j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} \end{bmatrix} \quad \forall A_c = 1, 2, 3, \dots, m, \forall A_d = 1, 2, 3, \dots, n \quad (14)$$

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

$$V = \begin{bmatrix} v_{a11} \\ v_{a21} \\ v_{a31} \\ \vdots \\ v_{am1} \end{bmatrix} \quad \forall V_c = 1, 2, 3, \dots, m, \forall V_d = 1, 2, 3, \dots, n \quad (15)$$

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

$$U = [V_{d1} \ V_{d2} \ V_{d3} \ \dots \ V_{dn}] \quad \forall V_d = 1, 2, 3, \dots, n \quad (16)$$

Matriz de orden (mx1) vector de prioridad global:

$$W = \begin{bmatrix} w_{a11} \\ w_{a21} \\ w_{a31} \\ \vdots \\ w_{am1} \end{bmatrix} \quad \forall w_a = 1, 2, 3, \dots, n \quad (17)$$

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

$$W = U * V_c \therefore W = \begin{bmatrix} v_{ad11} & v_{ad12} & \dots & v_{ad1k} \\ v_{ad21} & v_{ad22} & \dots & v_{ad2k} \\ v_{ad31} & v_{ad32} & \dots & v_{ad3k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{adim} & v_{adim} & \dots & v_{adik} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v_{ac11} \\ v_{ac21} \\ v_{ac31} \\ \vdots \\ v_{ackj} \end{bmatrix} \quad \forall v_{ac}, \forall v_{ad} \quad (19)$$

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

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{a11} \\ \lambda_{a21} \\ \lambda_{a31} \\ \vdots \\ \lambda_{am1} \end{bmatrix} \quad \forall \lambda_a \quad (20)$$

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

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

D. Escala de Categorización.

Uno de los aspectos más importante si no el más importante en el método de categorización de los activos es la escala de categorización es decir la categorización de los activos evaluados en función al grado de importancia obtenido

mediante el desarrollo del algoritmo matemático PJA, proceso de jerarquía analítica.

Ahora bien, la focalización u optimización de las tareas u operaciones de mantenimiento industrial pretenden asignar acciones de mantenimiento basados en técnicas como predictivo, programado, planificado, y correctivo a los activos de la organización.

Es por esta razón que mediante el análisis de Pareto técnica del 80-20 se generara la segmentación de los datos obtenidos basándose en la teoría de Pareto la cual indica que el 80% de los problemas se derivan del 20% de las causas esto en términos del método de categorización de activos se puede expresar como que el 80% de la eficiencia general de los activos, equipos y o herramientas, se deriva al 20% de los activos de mayor importancia.

En otras palabras, si se focaliza el mantenimiento predictivo al 20% de los activos más importantes se cubre el 80% de la confiabilidad del sistema ya que en este caso la importancia fue evaluada en función a criterios como rendimiento, costo, calidad, vida útil, prioridad en el sistema y criticidad del activo se cubre en gran medida los aspectos más importantes en la administración o gestión de los activos.

En la figura 4 se muestra la escala de aplicación de las técnicas de mantenimiento con base al análisis de Pareto.

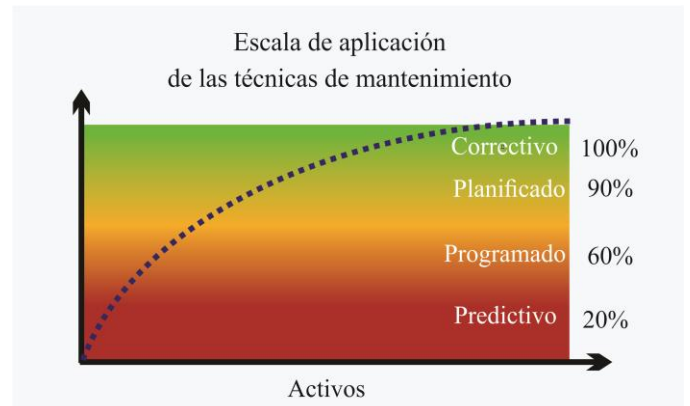


Figura 4 Escala de aplicación de las técnicas de mantenimiento Fuente: (Autores, 2017)

Donde se propone como ya se ha expresado previamente que el 20% de los activos más importantes sean administrados o gestionados de manera predictiva. Que el posterior 40 % de los activos, equipos o herramientas, sean administrados de forma programada, seguido del 30% de activos posteriores que sean tratados con mantenimiento planificado, y que solo el 10% restante de los activos sean gestionados de manera correctiva.

Conviene subrayar que las acciones o planes de mantenimiento deben ser gestionadas de acuerdo con las capacidades y necesidades de la organización. El uso y la asignación de las técnicas de mantenimiento pueden ser deliberadamente propuestas en función a las estrategias organizacionales de la compañía donde se genere un plan de

mantenimiento óptimo y eficiente para los activos. Si bien es cierto esta propuesta plantea el uso de mantenimiento predictivo cabe aclarar que siendo el caso de las organizaciones que no cuenten con las capacidades bien sea económicas, administrativas, u operativas para la implementación de técnicas de mantenimiento predictivo puede aplicar las demás técnicas de mantenimiento en función al grado de importancia obtenido por la categorización de los activos.

IX. Conclusiones.

La investigación tiene como resultado: Primero la descripción del problema deja entrever que las principales causas son de carácter administrativo, es decir corresponde a la gestión y administración del mantenimiento más en específico las causas del problema de investigación se relacionan con 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 empresas de gran bagaje y éxito en el mercado logran una unión amalgamada de todas sus áreas y aquellas organizaciones que no lo logran están condenadas al fracaso al no poder dar respuesta ágil a las necesidades cambiantes y crecientes del mercado.

Por un lado existen múltiples estrategias administrativas para amalgamar la estructura empresarial y hacer de la organización un sistema eficiente proactivo y unido, y el mantenimiento industrial no es la excepción al igual que las estrategias administrativas buscan la integración vertical de la compañía en función a los objetivos estratégicos técnicas como el RCM, mantenimiento centrado en confiabilidad, buscan la integración de los proceso de mantenimiento industrial, en las estrategias corporativas.

Es por la anterior razón que el RCM se establece como base importante en la solución del problema de investigación ya que gran parte de las causas del problema de investigación se derivan a la inexistencia de gestión de los activos en el mantenimiento industrial es necesario implementar técnicas o métodos que brinden herramientas tanto administrativas como técnicas a los procesos de mantenimiento industrial.

Es así como el RCM en sus fases brinda las herramientas necesarias para establecer una ineficiente gestión de los activos, equipos y herramientas, a 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 paliativa

A grosso modo se identifica dos grandes etapas del RCM primero la relacionada al empalme o amalgamamiento con los objetivos y metas de la organización desde la fase 1 hasta la fase 2, donde el despliegue de dichas fases brinda a la organización una conjunción entre los objetivos de la organización y los objetivos propios del RCM, la segunda etapa se relaciona con el análisis y de los activos desde la fase 3 hasta la 6, donde el despliegue de dichas fases brindan al mantenimiento industrial las bases necesarias para efectuar mantenimiento centrado en la confiabilidad y así lograr asegurar la confiabilidad de los equipos.

Llegado a este punto donde se establece el RCM, mantenimiento centrado en la confiabilidad como el caballo de batalla para solucionar los problemas del mantenimiento industrial en las organizaciones se debe ahora pensar en la optimización de dichos recursos para lo cual esta investigación planteo la categorización de los activos.

Por lo tanto se concluye que la categorización de los activos permite la optimización de los recursos requeridos en la gestión del RCM de forma tal que la segmentación o priorización de los activos, equipos y herramientas, no solo por su criticidad como lo plantea el RCM si no que de igual manera sean priorizados desde criterios de costo, producción y otros criterios adicionales que permitan un análisis global del activo con respecto a los procesos productivos, permiten enfocar de manera más eficiente los recursos.

Donde se logre focalizar las medidas de prevención o paliativas de mayor envergadura e importancia a los activos, equipos o herramientas, que presenten un grado mayor de prioridad, y aquellos activos de menor importancia sean gestionados de manera general en conformidad con los objetivos de la compañía y del RCM.

En otras palabras y resumiendo la categorización de activos permite que se gestione los activos de mayor rango de importancia con técnicas como el mantenimiento predictivo y los demás activos sean gestionados con técnicas programadas, planificadas, y o correctivas.

Ahora bien esta conclusión permite dilucidar la necesidad de seleccionar un método de detección de fallos acorde a los requerimientos técnicos del activo a gestionar por mantenimiento predictivo, es en este caso que de igual forma que con la categorización de activos la implantación del algoritmo matemático determinístico PJA, proceso de jerarquía analítica, permite evaluar las múltiples alternativas de decisión no solo en función de sus capacidades de detección tan cómo se suele hacer de manera comercial si no que se evalué en función a los modos de fallo a detectar como también en los aspectos de sus aplicación.

Por último, tanto el RCM, mantenimiento centrado en la confiabilidad, la categorización de activos, y la selección de métodos de detección de fallos temprano no estarían completas sin la complementación con herramienta como: QFD, despliegue de la función de calidad, que contribuyen a la gestión calidad y mejora continua.

Seguido del Método Delphi, panel de expertos, 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 emisión de los juicios de valor de las comparaciones requeridas en el algoritmo matemático PJA.

Finalizando con normas como la ISO 55000, gestión de activos, la norma SEA JA 1011, criterios de evaluación para procesos de mantenimiento centrado en confiabilidad, con las cuales se buscan brindar a las organizaciones herramientas normalizadas con el fin de lograr posteriores certificaciones.

Para finalizar como última conclusión la implementación de RCM, y la categorización de los activos permiten a la organización ser mayormente competitivo y aumentar indicadores como lo son el OEE, eficiencia general de los equipos, el cual permite el medir los procesos de mantenimiento con respecto a índices globales como de igual manera el incremento de los indicadores propiamente medidos por la organización.

X. Recomendaciones

La constante revolución tecnológica plantea nuevas estrategias y alternativas para las organizaciones actuales, cada vez es más común la utilización de la tecnología para la administración, en realidad al pasar del tiempo se ha buscado lograr que los procesos productivos sean lo más autónomos posibles, los PLC, Controlador lógico programable, que en última busca proveer a las industrias de una herramienta tecnológica para el control de la producción.

Esta tecnología presenta ventajas que un operario difícilmente puede igualar en tareas de ejecución o recolección de datos, este es el caso del control de calidad realizado por PCL donde tareas de identificación a nivel microscópico y a altas velocidades pueden ser llevadas a cabo sencillamente, acciones difícilmente igualadas por el hombre.

La sustitución de acciones, tareas u operaciones complejas para el hombre es uno de los objetivos que se pueden resaltar en el uso de los adelantos tecnológicos en pro de la productividad, es este objetivo el punto de partida para las investigaciones futuras.

Investigaciones donde se pueda logra la generación de herramientas tecnológicas accesibles para toda la industria, que permitan a empresas con poco capital de invención hacer uso e implementación de la tecnología en pro de su productividad, lo cual permitan a estas organizaciones estar al nivel del mercado global.

Y con esta manera lograr fortalecer la economía nacional a medida que las organizaciones se vuelvan más competitivas y eficientes, generando un mercado atractivo globalmente y poniendo en posición competitiva a las industrias nacionales con los grandes oferentes internacionales.

Con esto se pretende enriquecer las diversas áreas de las organizaciones y en este caso primordialmente al mantenimiento industrial de los equipos y o instalaciones, el

cual se vería favorecido a medida que se pueda desarrollar avances tecnológicos con la capacidad de detectar y analizar la serie de fenómenos ocurridos durante el funcionamiento de los equipos de producción, conllevando a una certera planeación del mantenimiento programado, que en últimas se traduciría en una vida útil más prolongada para los activos físicos y de igual manera un aseguramiento en costos, calidad y productividad.

REFERENCIAS

- [1] Aceved, A. M. (3 de 12 de 2012). *preditecnico*. Recuperado el 03 de 06 de 2016, de <http://www.preditecnico.com/2012/12/tesis-doctoral-modelo-para-la.html>
- [2] Augusto, L. (2000). Administración moderna de mantenimiento. Brasil: Novo polo publicación.
- [3] Cruelles, J. A. (2010). La teoría de la medición del despilfarro. Torrijos, Toledo, España: Artef, S.L.
- [4] Duffuaa, S., Raouf, A., & Dixon, J. (2000). *Sistemas de Mantenimiento planeacion y control*. Mexico D.F: Grupo noriega editores .
- [5] García, S. (2003). *Organizacion y gestion integral del mantenimiento manual practico para la implantacion de sistemas de gestion avanzados de mantenimiento industrial*. España: Ediciones Diaz de Santos S.A.
- [6] Moubray, J. (2004). *RCM II Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*. España: Aladon Ltd.
- [7] Robles, F. B. (2005). El mantenimiento predictivo es un pilar fundamental del RCM. *Preditecnico*, 18.
- [8] Saaty, T. I. (1997). *Toma de decisiones para lideres el proceso analitico jerarquico la toma de decisiones en un mundo complejo*. Pittsburgh: RWS Publications.
- [9] Saaty, T. L. (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. *RACSAM; Rev, R, Acad. Cien. Serie A. Mat*, 102, 251-318.
- [10] Taha, H. A. (2012). *Investigacion de operaciones*. Mexico: Pearson Educacion.