

# Mantenimiento industrial centrado en la reducción del impacto medioambiental de los equipos y herramientas

Cristian Alejandro Zafra Rodríguez, Flor Alba Méndez Martín, y Alexander Reyes Moreno  
Universitaria Agustiniiana, Bogotá Colombia, [ing.cristianzafra@gmail.com](mailto:ing.cristianzafra@gmail.com)  
[floralbamm2@gmail.com](mailto:floralbamm2@gmail.com), [ing.areyes946@gmail.com](mailto:ing.areyes946@gmail.com).

**Resumen:** control de emisiones, y residuos solo son unos de los muchos aportes que el mantenimiento industrial puede aportar a la conservación del medioambiente, mediante la categorización y segmentación de los equipos y herramientas según su impacto ambiental se puede enfocar las estrategias de gestión de los activos para así lograr un mantenimiento industrial centrado en la conservación y protección del medioambiente.

**Palabras claves:** eco-sostenibles, mantenimiento industrial, Mantenimiento predictivo, Gestión de activos, RCM, AHP.

## I. INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad ambiental ha tomado mayor importancia como objetivo primordial de la humanidad, las consecuencias ambientales producidas por las actividades del hombre en la tierra han acarreado a un sin número de efectos no deseados tanto para el planeta como para las especies que allí habitan.

La extracción de minerales, quema de derivados de petróleo, uso indiscriminado de las fuentes hídricas, extracción de madera, en resumen las actividades industriales solo son unas de tantas actividades que producen daño ambiental

Si bien es cierto, la humanidad no puede darse el lujo de frenar sus actividades industriales para solear la ecología si puede encaminar sus esfuerzos y estrategias en la generación de alternativas *eco-sostenibles* con el fin de remplazar los procesos industriales ya existentes.

De ahí que desde el semillero de investigación LEGIOS de la universitaria agustiniana se busque brindar alternativas de solución para lograr reducir el impacto de los procesos industriales en el medioambiente.

## II. PROPÓSITO

Considerando que el propósito de la nueva generación industrial debe ser el generar procesos eco-sostenibles donde se logre salvaguardar el entorno y reducir el impacto producido en el ambiente.

Se busca identificar la metodología de gestión de activos óptima a implantar en las organizaciones con el fin de proteger el entorno o medioambiente con el uso del *mantenimiento industrial* como herramienta que permite hacer un uso eficiente de los recursos.

## III. ENFOQUE

Esta investigación es de tipo correlacional donde se emplea un método de estudio Hipotético-deductivo, con un enfoque mixto, donde se contemplan once etapas de investigación.



Figura 1 Etapa de investigación

En esta metodología de investigación cabe resaltar la importancia de la identificación del modelo matemático de optimización a utilizar siendo esta la herramienta base que permite una toma de decisiones idónea en pro del objetivo de contribuir al cuidado y protección medioambiental.

## IV. RESULTADOS PARCIALES

Actualmente la investigación se encuentra en la etapa de formulación del modelo determinístico de optimización que permitirá generar la metodología estratégica adecuada para llegar a tener un mantenimiento industrial centrado en la conservación del medio ambiente en las organizaciones.

### A. Metodología de mantenimiento.

Entre los principales resultado se destaca la identificación del *RCM*, mantenimiento centrado en la fiabilidad como herramienta y medio para la gestión del mantenimiento industrial en las organizaciones siendo este el pilar de la investigación, ya que el *RCM* plantea la aplicación segmentada del *mantenimiento predictivo*, programado y correctivo a los activos de la compañía.

### B. Determinación de Criterios de evaluación.

Entre los principales criterios de evaluación para la categorización de activos según su impacto ambiental se determinan: Rendimiento, disponibilidad, calidad, criticidad del activo, residuos, y emisiones entre otros ver figura 2.

Ahora bien en cuanto los criterios de evaluación para la elección del método de detección de fallos a implementar se determinan: Costo, frecuencia, experticia, modo de fallo, entre otros ver figura 3.

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

Siendo estos criterios de evaluación quienes permitan tanto la categorización de los activos en función al grado de importancia no solo para la organización si no que de igual manera en su impacto medio ambiental. Como la elección del método de detección de fallos idóneo, en función a las necesidades de la organización.

C. *Alternativas de decisión*

Tal como se conciben criterios de evaluación en los objetivos de categorizar los activos según su impacto ambiental y en la elección de métodos de detección de fallos a aplicar. Es desnecesario determinar las alternativas de decisión las cuales serán evaluadas en función a cada uno de los criterios en aras de alcanzar el objetivo general planteado en los propósitos ya mencionados.

Por un lado las alternativas de decisión para la categorización de activos según su impacto ambiental no son otros que los activos de la compañía a los cuales será dirigida la categorización, es decir que las alternativas de decisión serán cuantos activos sean evaluados. Ver figura 2.

Por otro lado se determinan como alternativas de decisión para la elección del método de detección de fallos a implementar, a los métodos de detección de fallos abalados por las normas ISO 18436, métodos de detección de fallos, donde se encuentran análisis de: Vibraciones, aceites, termografías, entre otros. Ver figura 2.

D. *Normas técnicas.*

Se identifican como principales normas técnicas aplicables en la metodología estratégica de mantenimiento industrial centrado en la protección del medioambiente, las consagradas en la tabla 1.

Tabla 1  
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

Entre las normas contempladas se resalta la ISO 14000 gestión ambiental como uno de los principales medios para la obtención concreta y ajustada a los requerimientos ambientales de una estrategia de mantenimiento centrado en el medio ambiente.

Seguido de la norma ISO 55000 gestión de activos la cual plantea el uso eficiente de todos los activos de la compañía.

E. *Modelo de optimización AHP, proceso analítico jerárquico.*

Basados en la determinación del RCM como principal método de mantenimiento a implementar se vislumbra la importancia de optimizar los recursos inherentes en el mantenimiento industrial con el fin de hacer un uso eficiente de los mismos.

El modelo matemático AHP permitirá la categorización de los equipos y herramientas de las organizaciones en función del grado de criticidad frente al impacto ambiental que genera, lo que permite hacer una segmentación en niveles de criticidad ambiental para la posterior aplicación de las técnicas de mantenimiento y optimizando así los recursos involucrados y reduciendo el impacto o huella de daño ambiental producida por la organización.

A continuación en la figura 2 se puede observar la representación gráfica de la formulación del modelo AHP para la categorización de los equipos según su impacto ambiental.

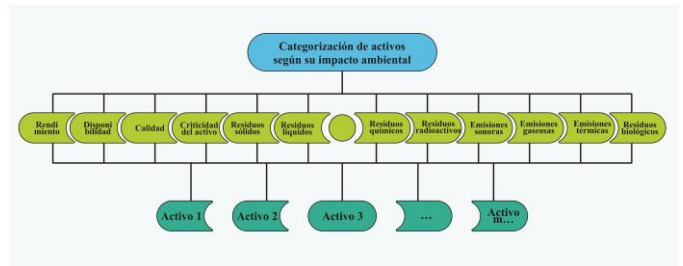


Figura 2. Categorización de los equipos según su impacto ambiental

En la figura anterior se observa en primer nivel el objetivo que se busca alcanzar seguido de un segundo nivel donde se plasman los criterios de evaluación para finalizar en el nivel inferior donde se encuentran las alternativas de decisión, siendo en este caso los equipos que serán evaluados.

En la figura 3 se observa la representación gráfica de la formulación del modelo correspondiente a la selección del método de detección de fallo a aplicar.

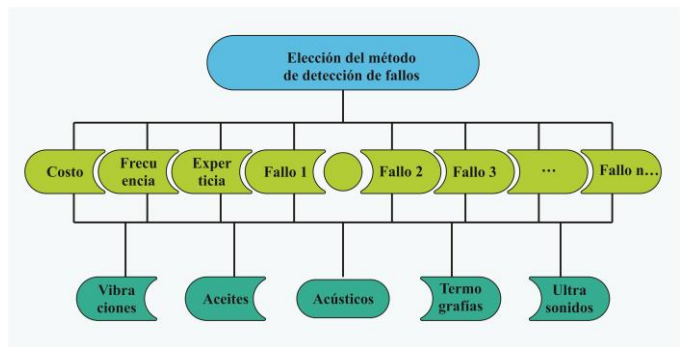


Figura 3 Elección del método de detección de fallo

En función de la optimización de los recursos empresariales se plantea la elección de un método de *mantenimiento predictivo* acorde con la categorización de los activos previamente obtenida con la aplicación del método propuesto.

En la figura anterior se puede evidenciar la evaluación de las alternativas de decisión frente a criterios de evaluación según su impacto empresarial en la cual convergen criterios de costo, modo de fallo, frecuencia de aplicación entre otros, esto con el fin de aplicar el método se ajuste idóneamente a los activos de la compañía.

F. Formulación algoritmo AHP, proceso analítico jerárquico.

Subíndices.

i = índice que identifica las alternativas de decisión.

j = índice que identifica los criterios de evaluación.

RC = razón de consistencia

IC = índice de consistencia

IA = índice de consistencia aleatorio

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.

Parámetros.

Escala fundamental de importancia

Tabla 2  
Escala fundamental de importancia

Intensidad o importancia	Definición
1	Igual importancia
2	Leve o ligera
3	Importancia moderada
9	Importancia extrema

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

Criterios de evaluación

Alternativas de evaluación

Axiomas.

Axioma 1: Reciprocidades.

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

Axioma 2: Homogeneidad.

$$Si, i = j \rightarrow a_{ij} = a_{ji} = 1 \quad (2)$$

Axioma 5: Consistencia.

$$CR \begin{cases} \leq 0.1 \text{ se considera aceptable} \\ \geq 0.1 \text{ Las opciones y} \\ \text{juicios deben ser reconsiderados} \end{cases} \quad (3)$$

Algoritmo.

Valor normalizado:

$$x_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}} \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, m; j = 1, 2, 3, \dots, n \in A_c, A_d \quad (4)$$

Valor de ponderación:

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

Valor de prioridad global:

$$w_{ai} = \sum_{k=1}^p v_{aik} v_{ackj} \quad \forall k = 1, 2, 3, \dots, p : k = j \in V_d, k = i \in V_{de}, \quad (6)$$

Valor de ponderación para el coeficiente de correlación:

$$\lambda_{ai} = \sum_{k=1}^p a_{ik} v_{akj} \quad \forall k = 1, 2, 3, \dots, p : k = j \in A, k = i \in V \quad (7)$$

Valor máximo para el coeficiente de correlación

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^m \lambda_{ai} \quad (8)$$

Razón de consistencia:

$$CR = \frac{IC}{IA} \quad (9)$$

Índice de consistencia:

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (10)$$

Índice de consistencia aleatorio:

$$IA = \frac{1.98(n-2)}{n} \quad (11)$$

Matriz de orden (mxm) de comparación:

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

Matriz de orden (mxm) de normalización:

$$A^N = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} \\ x_{31} & x_{32} & \dots & x_{3j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} \end{bmatrix} \quad \forall A_c = 1, 2, 3, \dots, m, \forall A_d = 1, 2, 3, \dots, n \quad (13)$$

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

$$V = \begin{bmatrix} v_{a11} \\ v_{a21} \\ v_{a31} \\ \vdots \\ v_{am1} \end{bmatrix} \quad \forall V_c = 1, 2, 3, \dots, m, \forall V_d = 1, 2, 3, \dots, n \quad (14)$$

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

$$U = [V_{d1} \quad V_{d2} \quad V_{d3} \quad \dots \quad V_{dn}] \quad \forall V_d = 1, 2, 3, \dots, n \quad (15)$$

Matriz de orden (mx1) vector de prioridad global:

$$W = \begin{bmatrix} w_{a11} \\ w_{a21} \\ w_{a31} \\ \vdots \\ w_{am1} \end{bmatrix} \quad \forall w_a = 1, 2, 3, \dots, n \quad (16)$$

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

$$W = U * V_c \therefore W = \begin{bmatrix} v_{ad11} & v_{ad12} & \dots & v_{ad1k} \\ v_{ad21} & v_{ad22} & \dots & v_{ad2k} \\ v_{ad31} & v_{ad32} & \dots & v_{ad3k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{adim} & v_{adim} & \dots & v_{adik} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v_{ac11} \\ v_{ac21} \\ v_{ac31} \\ \vdots \\ v_{ackj} \end{bmatrix} \quad \forall v_{ac}, \forall v_{ad} \quad (17)$$

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

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{a11} \\ \lambda_{a21} \\ \lambda_{a31} \\ \vdots \\ \lambda_{aim} \end{bmatrix} \quad \forall \lambda_a \quad (18)$$

Síntesis en términos matriciales para el cálculo de la matriz  $\lambda$ :

$$\lambda = A * V \therefore W = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} \\ a_{31} & a_{32} & \dots & a_{3j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{ij} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v_{a11} \\ v_{a21} \\ v_{a31} \\ \vdots \\ v_{akj} \end{bmatrix} \quad \forall A, \forall V \quad (19)$$

### G. Escala de Categorización de los activos.

Por un lado la categorización de los activos pretende organizar los valores porcentuales obtenidos con el desarrollo del algoritmo de mayor a menor, siendo los activos de mayor impacto quienes obtengan valores porcentuales cercanos a 100% y de menor impacto los que sus valores porcentuales se aproximen a 0%.

Por otro lado se plantea la escala de aplicación de mantenimiento basada en la teoría 80-20 de Pareto la cual dice que el 20% de las causas derivan al 80% de los problemas, esto en términos del objetivo de categorización de los activos se puede traducir, que el 20% de los activos de la organización representan 80% de la huella o impacto medioambiental. Ver figura 4.

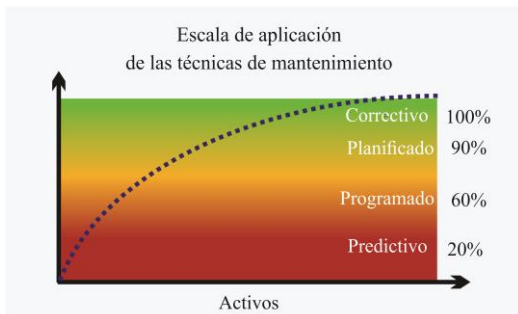


Figura 4 Escala de aplicación de las técnicas de mantenimiento

En la figura anterior se puede observar las escalas de aplicación de los métodos de mantenimiento. Donde el 20% de los activos de mayor impacto serán gestionados de manera predictiva, que el 21% al 60% se hará de programada, seguido del 61% al 90% de forma planificada y que el 10% restante sea de forma correctiva.

Con esto se busca focalizar de forma eficiente los métodos de mantenimiento disponibles en función al grado de importancia que presenta cada uno de los activos evaluados optimizando así los recursos involucrados en el mantenimiento industrial y mermando el impacto ambiental que produce los activos por su deteriorado funcionamiento.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARCIALES

Como principales conclusiones se extrae la importancia de categorizar y segmentar los diferentes activos es decir los equipos y herramientas que convergen en los procesos productivos esto con el fin de focalizar las estrategias de mantenimiento industrial haciendo un uso eficiente de los recursos.

De la misma manera se evidencia el valor de analizar y evaluar el impacto de cada uno de los equipos y herramientas en el medioambiente puesto el primer paso para la conservación y protección ambiental es la identificación y concientización de las causas que generan los efectos contaminantes.

Igualmente se subraya los beneficios de conllevar la implantación tanto de metodologías como el mantenimiento centrado en la fiabilidad RCM, como de las diversas normas técnicas que se tejen alrededor de la gestión ambiental, gestión de activos y sin restar importancia las relacionadas con la gestión de calidad.

Por último se resalta la contribución de la nueva corriente industria 4.0 con la automatización industrial y el concepto de internet de las cosas en la generación de procesos cada vez más eficientes y autónomos lo que contribuye tanto a un uso eficiente de los recursos como también a un control adecuado de los residuos generados en los procesos productivos.

### 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] Duffuaa, S., Raouf, A., & Dixon, J. (2000). *Sistemas de Mantenimiento planeacion y control*. Mexico D.F: Grupo noriega editores .
- [3] 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.
- [4] Moubay, J. (2004). *RCM II Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*. España: Aladon Ltd.
- [5] Robles, F. B. (2005). El mantenimiento predictivo es un pilar fundamental del RCM. *Preditecnico*, 18.
- [6] Saaty, T. I. (1997). *Toma de decisiones para lideres el proceso analitico jerarquico la toma de decisiones en un mundo complejo* . Pittsburgh: RWS Publications.
- [7] 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.
- [8] Taha, H. A. (2012). *Investigacion de operaciones* . Mexico: Pearson Educacion.