



# **METODOLOGÍA PARA LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO DE LOS MATERIALES DESDE LOS MÉTODOS DE DETECCIÓN DE FALLOS TEMPRANOS**

**Cristian Alejandro Zafra Rodríguez, Flor Alba Méndez Martín, Alexander Reyes Moreno**

**Universitaria Agustiniana  
Bogotá, Colombia**

## **Resumen**

Basados en la detección de fallos tempranos, por medio del uso de las técnicas de mantenimiento predictivo y en pro de realizar uso eficiente de los recursos involucrados en la protección de los materiales se busca proporcionar una metodología de optimización de los recursos inherentes a las tareas u operaciones efectuadas en el mantenimiento de los materiales.

Para este fin esta investigación plantea desarrollar una metodología de mantenimiento, protección de la integridad, de los materiales mediante la aplicación de las técnicas de detección de fallos tempranos anudado a la metodología RCM, mantenimiento centrado en confiabilidad.

Por lo cual se busca brindar una herramienta que permita hacer una gestión idónea de los materiales asegurando la integridad de los mismos por medio de los planes de acción y tareas u operaciones de sostenimiento del estado óptimo de los materiales.

Así mismo haciendo uso del algoritmo determinístico para la toma de decisiones PJA, proceso de jerarquía analítica, se espera hacer un uso eficiente de los recursos, como también enfocar de manera óptima las estrategias de protección de los materiales.

Algoritmo el cual tiene como finalidad la selección de la técnica de detección de fallos tempranos más idónea para la protección de los materiales siendo esta herramienta un medio de evaluación para las diferentes estrategias de detección de fallos en función a múltiples criterios.

**Palabras clave:** materiales; mantenimiento; deterioro; optimización; RCM; PJA

### **Abstract**

*By detecting early failures using predictive maintenance techniques and in an attempt to perform an efficient use of the resources involving in the protection of the materials, it is sought to provide a methodology for optimizing of the inherent resources to the works and the operations carried out during the maintenance of the materials.*

*For that purpose, this investigation proposes to develop a methodology for protecting the integrity of the materials by applying detection technics of early failures concatenated to the methodology RCM, reliability centred maintenance.*

*Therefore, it is sought to offer a tool that allows carry out an ideal management of the materials ensuring their integrity by means of plans of action and works of sustenance of the optimal estate of the materials.*

*Also, it is expected to carry out an efficient use of the resources and to focus appropriately on strategies for protecting the materials making use of the deterministic algorithm for the decision making AHP, analytic hierarchy process.*

*This algorithm allows the evaluation of different strategies of detection of failures according to multiple criterions that enable the selection early failures detection technic manner more suitable for the protection of the materials.*

**Keywords:** materials; maintenance; deterioration; optimization; RCM; AHP

## **1. Introducción**

Sin importar donde se mire, los materiales rodean el mundo físico como lo conocemos a tal grado que en la actualidad no podemos concebir el diario vivir sin la relación con algún conjunto de materiales.

Y es que visto de la forma más intuitiva posible todo lo que nos rodea está compuesto por la suma de algunos materiales, si bien es cierto en la cotidianidad este aspecto pasa por alto puesto no requerimos hacer un control exacto de los materiales que conforman los objetos comunes y mucho menos de su interacción con el entorno.

Si existe algún tipo de control de los materiales con los que interactuamos no sobrepasa más allá de una observación subjetiva bien sea de su estética, forma y o su estado siendo estos componentes lo que nos permite determinar si el objeto ha presentado algún tipo de deterioro.

Por otro lado, el control que se ejerce es más detallado o particular sobre los materiales que hagan parte inherente de aquellos objetos o actividades que consideramos importantes.

Entre las actividades que el ser humano considera importante se encuentran las operaciones industriales o de producción donde una diversa gama de materiales

envuelven los procesos desde la maquinaria que mueve la industria hasta los materiales sujetos al cambio entre otras.

Dicha importancia deriva a su vez al grado de protección de la integridad que se requiera aplicar al material, este concepto se puede evidenciar de manera más objetiva en la importancia que toma un material que compone una pieza de una máquina, equipo o herramienta, involucrada en un proceso productivo, donde un fallo o daño en el material de la pieza desencadena en un fallo de mayor proporciones en la máquina causando así una infinidad de problemas y riesgos tanto para el proceso productivo como para los operadores.

## 2. Planteamiento del problema

Las operaciones o tareas de protección de los materiales no solo presentan retos a nivel estratégico si no que, de igual manera a nivel económico y operativo, en otras palabras, el mantenimiento de los materiales se torna en un concepto complejo para las organizaciones.

Si bien es cierto en el mercado actualmente existen múltiples mecanismos de protección para los materiales más específicamente de mantenimiento de los materiales, una de estas técnicas más usada a nivel mundial es la detección temprana de los fallos haciendo uso de la tecnología y el análisis a menudo estadístico físico y químicos de los materiales con el fin de lograr predecir a tiempo el deterioro de los materiales y así efectuar los planes de acción preventiva al fallo que se pueda presentar por el deterioro detectado, en últimas estos métodos buscan prevenir los fallos mediante el estudio de los modos de fallo que en el caso de los materiales se presentan con el desgaste, corrosión, oxidación, ruptura, degradación, es decir el deterioro de los materiales.

En resumen, todas estas tareas u operaciones que implican la aplicación de tanto las técnicas de detección de fallos como los planes de acción preventivos requieren un sin número de recursos los cuales deben ser administrados de manera óptima.

Por esta razón surge la pregunta de investigación:

¿Qué técnica de detección de fallos debe aplicar en función a los materiales analizados haciendo un uso eficiente de los recursos?

Siendo esta pregunta la base de esta investigación.

## 3. Hipótesis de investigación

Consideremos estas hipótesis:

- El algoritmo determinístico para la toma de decisiones PJA, proceso de jerarquía analítica, brinda medios para la óptima selección de técnicas de detección de fallos tempranos en la protección e integridad de los materiales.

- La estrategia RCM, mantenimiento centrado en confiabilidad, permite gestionar de manera idónea las tareas y operaciones de protección e integridad de los materiales.

## 4. Objetivo

### 4.1. Objetivo general

Desarrollar una metodología para la selección de técnicas de detección de fallos desde el algoritmo determinístico PJA, proceso de jerarquía analítica, para la implementación del RCM, mantenimiento centrado en confiabilidad, con el fin de proporcionar una herramienta administrativa para la gestión y la toma de decisiones en las operaciones inherentes al mantenimiento y o protección de los materiales.

### 4.2. Objetivos específicos

- Identificar y Determinar los criterios de evaluación en la selección de las técnicas de detección de fallos tempranos.
- Identificar y determinar las alternativas de decisión en la selección de las técnicas de detección de fallos tempranos a implementar
- Formular y desarrollar el modelo PJA para la selección de las técnicas de detección de fallos tempranos a implementar
- Desarrollar la guía metodológica para la aplicación del sistema de gestión del mantenimiento de los materiales basado en RCM propuesto en esta investigación.

## 5. Marco conceptual

A continuación, se presenta algunos de los conceptos base para el desarrollo de la investigación.

### 5.1. *Mantenimiento centrado en confiabilidad RCM.*

El RCM, mantenimiento centrado en confiabilidad, se contempla como una estrategia o filosofía de gestión del mantenimiento donde de forma estructurada y lógica se plantean las tareas y operaciones que se deben llevar a cabo con el fin de salvaguardar la confiabilidad del objeto de análisis, bien sea un material, pieza, máquina, estructura o todo aquello que este sujeto al mantenimiento basado en confiabilidad.

### 5.2. *Mantenimiento predictivo.*

El mantenimiento predictivo se puede definir como las tareas u operaciones de sostenimiento bien sea a objetos, materiales, piezas o máquinas basado en la predicción de los posibles escenarios futuros relacionados con el deterioro que presenta el objeto de estudio.

El mantenimiento predictivo es uno de los pilares fundamentales de las estrategias RCM ya que el mantenimiento centrado en confiabilidad basa sus planes de acción en la

detección temprana de los fallos la cual se realiza con la aplicación de las técnicas de detección de fallos.

Entre las técnicas de detección de fallos más usadas por el mantenimiento predictivo se encuentra los análisis de vibraciones, termografías, aceites, entre otros siendo estas las técnicas que permiten realizar una predicción de los posibles fallos.

### ***5.3. Proceso de jerarquía analítica PJA.***

El PJA se concibe como un modelo determinístico expresable de manera jerárquica donde la base de la jerarquía está constituida por las alternativas de decisión, seguido de los criterios de evaluación que se posicionan en un nivel superior a las alternativas, pero inferior al objetivo el cual determina el nivel superior de la jerarquía.

Este modelo se caracteriza por la capacidad que tiene para evaluar las múltiples alternativas de un objetivo definido tomando en cuenta los criterios de decisión planteados para el modelo (Saaty T. I., 1997), en términos generales lo que permite el PJA es evaluar de manera holística un objetivo no solo basando la decisión en criterios netamente cuantitativos si no también dando la posibilidad de evaluar la alternativa bajo criterios de carácter cualitativo que en otras circunstancias serian subjetivos al tomador de decisiones.

Esto permite evaluar (n) número de alternativas con respecto a (m) número de criterios que se consideren a un único objetivo, esto se logra mediante la ponderación e interacción matricial pareada entre cada una de las alternativas de decisión y cada uno de los criterios de evaluación.

## **6. Marco metodológico**

### **6.1. Enfoque metodológico de la investigación**

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

### **6.2. Etapas de investigación**

Esta investigación es desarrollada desde el semillero de investigación LEGIOS de la universitaria agustiniana Bogotá Colombia contando con el apoyo de estudiantes y docentes de ingeniería industrial donde se plantea una metodología de investigación de once etapas ver figura 1



Figura 1 Etapas de investigación Fuente: (Autores, 2017)

Entre las etapas de investigación plasmadas en la figura anterior se destacan por su importancia la etapa cuatro y cinco: determinación de los criterios de evaluación y alternativas de decisión en la selección de la técnica de detección de fallos a implementar, siendo estas los ejes o bases de la metodología de mantenimiento de los materiales. Seguido de la formulación y análisis de sensibilidad del algoritmo implementado con el mismo fin etapas que permiten obtener un método para la selección de la técnica a implementar.

Por último, la etapa de evaluación y prueba de hipótesis previas a la elaboración de la guía de implementación siendo estas etapas las que permiten medir las variables de la investigación y así identificar las principales conclusiones y las posibles mejoras al modelo.

Culminando de esta manera con el desarrollo de la guía de implementación donde se plasmarán las pautas y procedimientos para replicar o poner en marcha esta investigación.

## 7. Avances de resultados

Actualmente la investigación se encuentra finalizando la etapa de formulación del algoritmo matemático PJA Proceso de jerarquía analítica para la selección de la técnica de detección de fallos tempranos a implementar.

En las etapas anteriores de la investigación se logró identificar y determinar primero los criterios de evaluación segundo las alternativas de decisión para la selección de la técnica de detección de fallos a implementar en el mantenimiento de los materiales como también la formulación del algoritmo para el anterior fin.

Hecha esta salvedad examinaremos ahora los avances obtenidos en conformidad con la estructura planteada por el algoritmo matemático PJA.

Para comprender mejor la metodología que se plantea con la aplicación del PJA en la selección de las técnicas de detección de fallos temprano primero es necesario definir los axiomas del modelo siendo estos los supuestos que determinan la metodología a seguir. En detalle estos axiomas se pueden clasificar en dos tipos primero de estructura lógica y segundo de carácter matemático siendo ambos de completo cumplimiento para el desarrollo o aplicación del modelo.

### 7.1. Axiomas

Axioma 1 Reciprocidades:

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

(1)

Axioma 2 Homogeneidad:

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

Axioma 3 Consistencia

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

En consonancia con los axiomas previamente presentados se estructura los adelantos obtenidos de la siguiente manera.

### 7.2. Objetivo del modelo

Objetivo general del modelo: la selección de la técnica de detección de fallos temprano.

### 7.3. Criterios de evaluación

Como principales criterios (j) de evaluación se identifican y determina los plasmados en la tabla 1.

Tabla 1.  
Criterios de evaluación

Criterio (j)	Detalle
Costo	Criterio cuantitativo que evalúa el valor económico requerido por la aplicación de la técnica
Experticia	Criterio cualitativo que evalúa el grado de conocimiento que debe tener el operador de la técnica
Frecuencia	Criterio cuantitativo que evalúa la periodicidad que requiere la aplicación del método
Modo de deterioro j	Criterio Cualitativo que evalúa el nivel de detección con respecto al modo de deterioro j de la técnica evaluada
Así para todos los modos de deterioro j= 1, 2, 3, 4, 5,6 Criterio Cualitativo que evalúa el nivel de detección con respecto al modo de deterioro j de la técnica evaluada.	

Fuente: (Autores, 2017)

### 7.4. Alternativas de decisión

Como principales alternativas (i) de decisión se identifican y determinan como técnicas de detección de fallo aplicables aquellas contenidas en las normas ISO 18436-2 a ISO 18436-8. Ver tabla 2.

Tabla 2.  
Alternativas de decisión

Alternativa (i)	Norma
Análisis de Vibraciones	ISO 18436-2
Análisis de aceites en taller	ISO 18436-4
Análisis de aceites en laboratorio	ISO 18436-5
Análisis de emisiones acústico	ISO 18436-6
Análisis termografico	ISO 18436-7
Análisis de ultrasonidos	ISO 18436-8

Fuente: (Autores, 2017)

En resumen, la figura 2 muestra la representación gráfica del algoritmo PJA para la selección de la técnica de detección de fallos en congruencia con los axiomas 1 y 2.

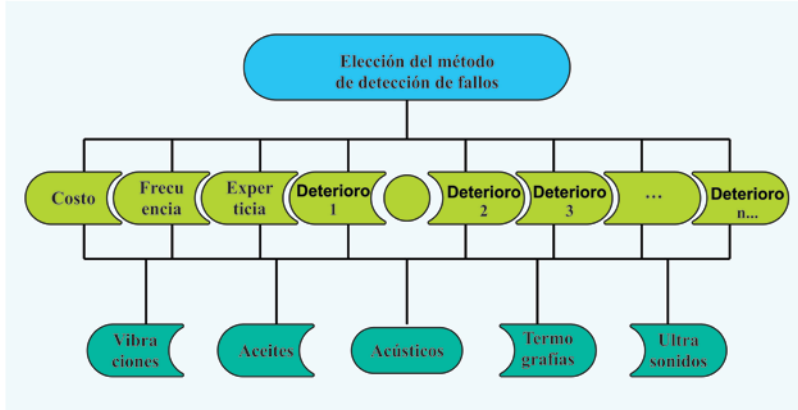


Figura 2 Representación gráfica del algoritmo PJA para la selección de la técnica de detección de fallos tempranos Fuente: (El autor, 2017)

Una vez determinado el objetivo general junto a los criterios de evaluación (j) y las alternativas de decisión (i) se dispone a realizar el despliegue del algoritmo en función a las siguientes ecuaciones.

### 7.5. Algoritmo

Valor normalizado:

$$x_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_i a_{ij}} \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots m; j =$$

$$1, 2, 3, \dots n \in A_c, A_d \quad (4)$$

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:

$$w_{ai} = \sum_{k=1}^p v_{adik} v_{ackj} \quad \forall k = 1, 2, 3, \dots p :$$

$$k = j \in V_d, k = i \in V_{dc} \quad (6)$$

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:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} \\ a_{31} & a_{32} & \dots & a_{3j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{ij} \end{bmatrix} \forall A_C =$$

$$1, 2, 3 \dots m, \forall A_d = 1, 2, 3 \dots n \quad (12)$$

Matriz de orden (mxm) de normalización:

$$A^N = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} \\ x_{31} & x_{32} & \dots & x_{3j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} \end{bmatrix} \forall A_C =$$

$$1, 2, 3 \dots m, \forall A_d = 1, 2, 3 \dots n \quad (13)$$

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

$$V = \begin{bmatrix} v_{a11} \\ v_{a21} \\ v_{a31} \\ \vdots \\ v_{am1} \end{bmatrix} \forall V_C = 1, 2, 3 \dots m, \forall V_d =$$

$$1, 2, 3 \dots n \quad (14)$$

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

$$U = [V_{d1} \quad V_{d2} \quad V_{d3} \quad \dots \quad V_{dn}] \forall V_d =$$

$$1, 2, 3 \dots n \quad (15)$$

Matriz de orden (mx1) vector de prioridad global:

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

Siendo esta formulación la base del método de selección de la técnica de detección de fallos temprano a aplicar.

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

$$W = \begin{bmatrix} v_{ad11} & v_{ad12} & \dots & v_{ad1k} \\ v_{ad21} & v_{ad22} & \dots & v_{ad2k} \\ v_{ad31} & v_{ad32} & \dots & v_{ad3k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{adim} & v_{adim} & \dots & v_{adik} \end{bmatrix} *$$

$$\begin{bmatrix} v_{ac11} \\ v_{ac21} \\ v_{ac31} \\ \vdots \\ v_{ackj} \end{bmatrix} \forall v_{ac}, \forall v_{ad} \quad (17)$$

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

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{a11} \\ \lambda_{a21} \\ \lambda_{a31} \\ \vdots \\ \lambda_{ai1} \end{bmatrix} \forall \lambda_a \quad (18)$$

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

$$\lambda = A * V \therefore W = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} \\ a_{31} & a_{32} & \dots & a_{3j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{ij} \end{bmatrix} *$$

$$\begin{bmatrix} v_{a11} \\ v_{a21} \\ v_{a31} \\ \vdots \\ v_{akj} \end{bmatrix} \forall A, \forall V \quad (19)$$

## 8. Conclusiones y recomendaciones parciales

Dentro de los procesos de productivos de las organizaciones uno de los factores preponderantes para el óptimo funcionamiento, es sin duda la aplicación de conceptos tales como el mantenimiento o protección de los materiales para el aseguramiento de la confiabilidad y disponibilidad de los equipos o herramientas.

Esto a su vez puede ser anudado a filosofías y metodologías de mantenimiento como el RCM, mantenimiento centrado en la confiabilidad técnica que permite determinar las necesidades de los elementos que deban ser analizados, identificando las posibles

causas de fallo, siendo este el caso la causa de deterioro de los materiales para seleccionar la estrategia adecuada para su posterior mantenimiento, reemplazo o modificación.

Seguido de la utilización del modelo matemático de investigación de operaciones PJA Proceso de jerarquía analítica, como herramienta de análisis en la identificación y jerarquización de los modos de deterioro presentes en los materiales analizados dicho modelo permite un análisis global de los datos tanto cualitativos como cuantitativos y presenta una estructura lógica adecuada para analizar las diversas variables que convergen en el desgaste general de los materiales.

Por último, es importante destacar el uso de la teoría de Pareto o 80-20 la cual indica que el 80% de los problemas es causado por el 20% de las causas, siendo este el caso que el 80% de los fallos en los materiales son causados por el 20% de los modos de deterioro. Siendo esta metodología la que permite la interpretación de la categorización de los posibles modos de deterioro presentes en los materiales. Permitiendo así desarrollar una gestión de materiales más eficiente.

Las organizaciones deben contemplar la aplicación de los conceptos de planeación, organización, dirección, control y retroalimentación en la proporción que la compañía lo permita para implementar la gestión de activos, optimizando la administración del ciclo de vida de los activos físicos y los recursos en general, tales como: materias primas, tiempo, dinero, calidad, capacidad entre otros, de una empresa con el fin de maximizar su valor y la productividad que se logre obtener, y de igual forma minimizar los riesgos internos e incluso en el mercado.

Todo esto con el fin de generar un plan de mantenimiento acordes a los equipos e instalaciones identificadas en el desarrollo del proyecto, lo que permitirá una gestión más eficiente de los recursos y del mantenimiento.

## 9. Referencias

### Artículo de revista

- Robles, F. B. (2005). El mantenimiento predictivo es un pilar fundamental del RCM. *Preditecnico*, 18.
- Saaty, T. L. (1997). Toma de decisiones para líderes el proceso analítico jerárquico la toma de decisiones en un mundo complejo. Pittsburgh: RWS Publications.
- 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.

## Libros

- 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.
- Duffuaa, S., Raouf, A., & 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 Diaz de Santos S.A.
- Taha, H. A. (2012). Investigación de operaciones. México: Pearson Educación.
- Villanueva, E. D. (2014). La productividad en el mantenimiento industrial. México: Grupo editorial patria

## Fuentes electrónicas

- 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>

## Sobre los autores

- **Cristian Alejandro Zafra Rodríguez:** Estudiante de ingeniería industrial universitaria agustiniana. [Ing.cristianzafra@gmail.com](mailto:Ing.cristianzafra@gmail.com).
- **Flor Alba Méndez Martín:** Estudiante de ingeniería industrial universitaria agustiniana. [floralbamm2@gmail.com](mailto:floralbamm2@gmail.com).
- **Alexander Reyes Moreno:** Ingeniero Industrial, Master en Administración de Empresas con Especialidad en Gestión de la Calidad, Seguridad y Medio Ambiente, Master en Administración Ambiental, Estudiante Doctorado en Ciencias Económicas y Administrativas. Profesor auxiliar. [alexander.reyesm@unиаgustiniana.edu.co](mailto:alexander.reyesm@unиаgustiniana.edu.co).

---

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2017 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)