

Cómo citar este artículo:

Yam Cervantes, M. A., Pali Casanova, R. J., & Zavala Loría, J. C. (2019). Aplicabilidad de la criticidad en el mantenimiento de equipos. *Project, Design & Management*, 1(1), 33-48

APLICABILIDAD DE LA CRITICIDAD EN EL MANTENIMIENTO DE EQUIPOS

Marcial Alfredo Yam Cervantes
Ramón de Jesús Pali Casanova
José del Carmen Zavala Loría
Fundación Internacional Iberoamericana (México)

Resumen. Este trabajo presenta un sistema de información de mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo relacionado con los datos obtenidos a partir de una Matriz de Criticidad cuyos parámetros fueron basados en el historial de intervenciones de mantenimiento y la observación visual y auditiva de los equipos tales como: Básculas mecánicas, Malacates, Tolvas y Esterilizadores. El análisis de Criticidad determinó tendencias de mantenimiento preventivo y predictivo para los pares “Básculas mecánicas, Malacates” y “Tolvas, Esterilizadores”, respectivamente, estableciéndose de esta manera un sistema de planeación de mantenimiento preventivo para Tolvas y Esterilizadores mediante el diseño, elaboración y alimentación de datos al sistema de información que anticipa el control previsorio sobre las acciones del departamento de mantenimiento y producción. Estas acciones generan beneficios tales como la disponibilidad y seguridad de la planta de equipos, mejora en la calidad de los productos, un mejor registro con capacidad de información de primera mano sobre las condiciones de la maquinaria, una buena capacidad en cantidad y calidad de actividades de mantenimiento, optimización en el manejo de partes de reparación, mejoras del diseño de equipos, lo cual conduce a reducción de costos por mantenimiento.

Palabras clave: Mantenimiento, fallas, matriz de criticidad, planeación

APPLICABILITY OF CRITICISM IN THE MAINTENANCE OF EQUIPMENT

Abstract. This work presents an information system of preventive, predictive and corrective maintenance related to the data obtained from Criticality Matrix whose parameters were based on the history of maintenance interventions and the visual and auditory observation of equipment such as Mechanical scales, Winches, Hoppers and Sterilizers. Criticality analysis determined trends of preventive and predictive maintenance for the pairs “Hoppers, Sterilizers” and “Mechanical scales, Winches”, respectively, establishing in this way a preventive maintenance planning system for Hoppers and Sterilizers through the design, elaboration and data feed to the information system that anticipates the

planned control over the actions of the maintenance and production department. These actions generate benefits such as the availability and safety of the equipment plant, improvement in the quality of the products, a better register with the capacity of first hand information on the conditions of the machinery, a good capacity in quantity and quality of maintenance activities, optimization in the handling of repair parts, improvements in the design of equipment which leads to reduction of costs for maintenance.

Keywords: Maintenance, faults, criticality matrix, planning

Introducción

El mantenimiento de equipos es una de las principales estrategias que se aplican a nivel empresarial, ya que a través de él es posible reducir costos. El mantenimiento de equipos representa un ahorro para la economía de las empresas, además ofrece una forma de mantener la continuidad, seguridad y eficiencia de los mismos. El mantenimiento de equipos, se define como la mejora o restauración, asociado a servicios donde los requerimientos de un buen mantenimiento permiten agregar valor físico y de calidad a los equipos. También, el mantenimiento de equipos brinda alternativas de consideración que permiten la identificación de posibles problemas o causas de falla, así como las posibles consecuencias; mediante el mantenimiento, es posible decidir, si se ejecutaran reparaciones o remplazos de la parte o partes dañadas, llevar a cabo mantenimientos periódicos, fijar intervalos de revisión o simplemente dar respuesta a los requerimientos de los usuarios (Horner, El-Haram, Munns, 1997). La aplicación un sistema de mantenimiento a equipos en general está definido como una metodología relacionada a servicios administrativos y técnicos, que ayudan a su control y medición, facilitan su eficiencia a través de las operaciones que están enfocadas al diagnóstico y permiten garantizar procesos de calidad libres de fallas (Zul-Altfi, 2017). Un sistema de mantenimiento se puede construir mediante tres estrategias de diagnóstico como son el mantenimiento preventivo, el predictivo y el correctivo, que integran un sistema de coordinación global que permite mejorar la comunicación entre las partes operativas y de mantenimiento (Horner, El-Haram, Munns, 1997; Zul-Altfi, 2017).

Actualmente, el principio de un sistema de mantenimiento preventivo, predictivo, correctivo en la industria marca un gran avance para el logro de estándares de productividad, calidad mundial, y como resultado reducción de costos (Swamson, 2001). Cada día, más compañías implementan métodos de mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo basados en indicadores de desempeño, y prácticas encaminadas en la filosofía del mantenimiento, ya que estas permiten asegurar la funcionalidad de los equipos, así como a reducir el deterioro y aumento de los costos por reparación o cambio de equipos (Swamson, 2001; Nazmul, Taib, 2013).

El desarrollo de este tipo de sistemas se realiza a través de las tres fases antes mencionadas como son: a) el mantenimiento preventivo, que está basado en los tiempos de operación, y en el historial estadístico operacional específico de cada equipo; b) el mantenimiento predictivo, que se basa en el monitoreo directo, las condiciones de operación, eficiencia, y la distribución de temperatura en el equipo e indicadores no operacionales debidos a falla o pérdida de eficiencia (Nazmul, Taib, 2013; Fluke, 2005); y finalmente, c) la operación de mantenimiento correctivo, basado en la reparación total de equipos (Wang, Ye, Yin, 2016).

De manera general, se puede mencionar que los procesos de mantenimiento preventivo, predictivo, y correctivo, se basan en la limpieza, verificación e inspección;

sin embargo, las fallas y los requerimientos de mantenimiento se han convertido en punto clave en la operación y planeación de diferentes procesos industriales (Kogbaa, Huang, 1992).

En los últimos años, el mantenimiento de los activos fijos en la industria ha experimentado una serie de transformaciones a nivel tecnológico, financiero, y organizacional que son consecuencia de la competitividad, lo que ha llevado a la implementación de nuevas herramientas que permiten una mayor confiabilidad en el ciclo de vida de los equipos. El mantenimiento de equipos de procesamiento permite incrementar la productividad y reducir los costos de operación, razón por la cual muchas organizaciones aplican este tipo de actividades para asegurar que no existan inconvenientes que afecten a la producción (Fluke, 2005). Contrariamente, las faltas de mantenimiento incurren en un mal funcionamiento de los equipos generando productos de mala calidad, reduce su tiempo de vida operacional, así como reparaciones frecuentes y finalmente el remplazo del equipo (Swamson, 2001). Como se puede observar el mantenimiento predictivo, preventivo y correctivo, representa una de las operaciones de análisis estratégica, adecuado para las operaciones críticas, ya que mejoran el funcionamiento de los equipos de producción y representa una elevada confiabilidad y disponibilidad para la productividad de las plantas industriales (Fore and Msipha, 2010).

Características generales del mantenimiento

Mantenimiento preventivo (MP)

El mantenimiento preventivo (MP), es un importante componente de la actividad de mantenimiento, ya que es una de las principales partes del esfuerzo de desempeño total dentro del sistema preventivo. Entre los objetivos se encuentran, reducir la desintegración crítica de los equipos, prolongar la vida productiva de los equipos, mejorar la planeación de programas y actividades tales como: horarios de mantenimiento de los equipos, reducción de las pérdidas de producción debido a fallas y promueve la salud y seguridad del personal de mantenimiento (Dhillon, 2002; Duffua-Salih, Raoluf and Dixon, 2000).

Este tipo de proceso de mantenimiento, presenta ventajas tales como disponibilidad del equipo, una buena capacidad del rendimiento en desempeño, un buen balance en la carga de trabajo, reducción de tiempos extra, aumento en las ganancias en producción, entre otros beneficios. Entre las desventajas, se encuentran la exposición a posibles fallas, uso de un mayor número de piezas, incremento en costos iniciales, fallas en partes nuevas y mayor frecuencia en demanda de equipo y piezas para reparación (Dhillon, 2002).

En un estudio realizado sobre la implementación de un programa de mantenimiento preventivo para la extracción de aceite de palma, en Malasia realizado por Ahmad-Rasdan, Rafis-Suizwam, Rozli, Nor-Kamilah (2009), demostró que la implementación del programa de mantenimiento preventivo puede proporcionar mayor disponibilidad de equipos y reducir la tasa de fallas en los equipos, ya que es posible clasificar los procesos principales desde la recepción y clasificación de los frutos de la palma aceitera, esterilización, trilladora, digestión, prensado, clarificación y producción de almendra, dando como resultado la organización, programación, inspección, y la frecuencia de los trabajos de mantenimiento.

Mantenimiento predictivo (MPd)

El mantenimiento predictivo (MPd), es una de las medidas de mantenimiento la cual ha revolucionado a la industria, debido a que a través de estas medidas es posible mejorar la seguridad, la calidad y disponibilidad de equipos en las plantas industriales; Es considerado como un programa que permite establecer decisiones estratégicas, planes de análisis, y estrategias relacionadas con el manejo y la supervisión de equipos de forma permanente o intermitente, trabaja como un indicador de control de calidad, ya que facilita la detección temprana de anomalías durante la operación de equipos, además de que evita fallas en los programas de proceso (Dhillon, 2002).

Este tipo de proceso posee una tecnología de herramientas que permite conocer el estado de funcionamiento de los equipos en operación mediante mediciones no destructivas como son: el análisis termográfico, mediciones de amplitud, velocidad y aceleración; análisis de lubricación y pruebas de ultrasonido para la medición de espesores. Entre los beneficios que presenta este tipo de mantenimiento, están las mejoras en la calidad de producto, del mantenimiento, así como en la cantidad y calidad obtenida sobre la información de la maquinaria industrial, la capacidad en la programación de actividades de mantenimiento, optimización en el manejo de las partes de repuesto, soporte y diseño de maquinaria industrial, reducción de costos y capacidad de identificar de raíz la causa del problema (Carnero, 2003).

En un estudio realizado por Kumar-Srivastava, Mondal (2014), se demostró que mediante el desarrollo de un modelo de análisis de efectos y modo de fallos modificado (FMEA, por sus siglas en inglés) para mantenimiento predictivo, se pueden obtener ventajas competitivas y adicionalmente beneficios que permiten minimizar el uso de tecnología costosa y sistemas de monitoreo en la tecnología de procesamiento para la extracción de aceite de palma de coco. Otros estudios como el de Mendel, Rauber, Varejao and Batista (2009), presentan que el método de diagnóstico por marcación para la detección de fallas en maquinarias de rodamiento para la extracción de petróleo, proporciona un vector característico para la identificación de fallos.

Mantenimiento correctivo

El mantenimiento correctivo es una importante actividad, que se define como una acción remediadora llevada a cabo debido a una falla o deficiencia que se presenta como parte o durante el mantenimiento preventivo, ya sea para reparar un equipo o mantenerlo en operación. Las acciones que se requieren son inmediatas, y tienen como fin evitar deficiencias en la operación, evitar incidentes o accidentes causados por el mal desempeño de las acciones de reparación y están clasificadas de la siguiente manera: reparación de averías, salvamento, reconstrucción, reparación y mantenimiento (Dhillon, 2002).

El mantenimiento correctivo es crucial para asegurar que los activos tengan buena capacidad de mantenimiento, disponibilidad y confiabilidad durante la operación de la planta; cualquier falla significa reducción de beneficios para la empresa y refleja un impacto negativo en su rendimiento (Salleh-Intan, Mohd-Yusof and Zahedi, 2012).

El mantenimiento correctivo es un modelo de mantenimiento primitivo o la versión más básica. Tiene por objetivo, acelerar la operacionalidad del equipo con rapidez y con mínimo costo de mantenimiento. Sin embargo, presenta desventajas como son disposición de partes, la cual genera retrasos en reparación, paros de producción y afectaciones en la calidad operacional del equipo por desgaste progresivo (Duffua-Salih, Raoluf and Dixon, 2000).

Criticidad

La planeación y control de sistemas de mantenimiento es complejo y ha sido probado para la solución y mejoramiento operacional de instalaciones y componentes asociados a aspectos fundamentales como son: la confiabilidad humana, proceso, diseño, mantenimiento y Criticidad. La teoría de Criticidad, es un modelo que realiza la jerarquización de los procesos, de los sistemas y de los equipos, permitiendo crear una estructura que facilita la toma de decisiones en forma efectiva en cuanto a los tipos de mantenimiento. La Criticidad se enfoca a la confiabilidad operacional de procesos y aun cuando es una teoría que no es tan nueva, sus alcances si resuelven realidades actuales en la industria; hace uso de modelos matemáticos contextualizados que pueden llevar a resultados que no necesariamente sean representativos del caso a analizar, pero en la mayor parte de los casos si lo son.

El análisis de Criticidad, se basa fundamentalmente en la calificación de dos atributos correspondientes: uno tiene que ver con el origen del fallo, y el segundo está relacionado con el nivel crítico que impera en el fallo. Por otro lado, aunque las valorizaciones de esos componentes de calificación son de índole cuantitativo, tienen también una parte cualitativa (Visual), pues se aplica la experiencia de los operarios de los equipos y del jefe de mantenimiento para tener una calificación más cercana a la realidad. La parte ingenieril de esta metodología está asociada a los componentes de seguridad, medio ambiente, producción, costos de operación, mantenimiento, número de fallas y tiempo de reparación de o los equipos. Como se presenta a continuación en algunos casos de estudio en donde se ha aplicado esta metodología; por ejemplo: en un estudio presentado por Díaz-Concepción, Pérez-Rodríguez, Del Castillo-Serpa & Brito-Vallina (2012), se realizó el análisis de Criticidad y complejidad en un proceso de producción de una planta de productos biológicos y se obtuvo una lista jerarquizada de los equipos a partir de la comparación, a través de la matriz de Criticidad y otros criterios que intervienen en el índice de criticidad y de la complejidad de cada activo.

En la investigación desarrollada por Aguilar-Otero, Torres-Arcique, Magaña-Jiménez (2010), en el que presentaron un análisis de modos de falla, efectos y Criticidad, denominado también como metodología AMFEC, para la planeación del mantenimiento, se emplearon criterios de riesgo y confiabilidad para la planeación del mantenimiento. Se concluyó que el grado de Criticidad del riesgo en equipos, es normalmente empleado para la planeación del mantenimiento centrado en la confiabilidad, ya que permite lograr un entendimiento global del sistema, así como del funcionamiento y la forma en la que pueden presentarse las fallas de los equipos que componen el sistema analizado.

Por otra parte, la Criticidad enfocada proporciona resultados relevantes, frente a planes de mantenimiento específicos para equipos aumentando las expectativas de eficiencia y confiabilidad en la producción. Cuando todos estos componentes se integran los resultados producen un impacto positivo en la industria, ya que de ello depende la clasificación y reducción de las operaciones de mantenimiento. Es por ello, que el presente estudio tiene la finalidad de generar un sistema de control que intervenga de manera adecuada y efectiva en los procesos de mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo para equipos como: Básculas mecánicas, Malacates, Tolvas y Esterilizadores. Mediante el análisis y evaluación actual de los equipos de extracción de aceite de palma de la semilla de coco en una empresa determinada, sea posible someterlos a mantenimiento encaminado a determinar acciones, rutas y jornadas que permitan sostener la producción a partir de un parque de maquinaria confiable y disponible en la mayor parte del tiempo de proceso.

Método

Problema a resolver

Se ha reconocido que el diagnóstico brinda conciencia a la dirección acerca de la problemática y el cumplimiento de las tareas del área y las repercusiones que pueden acarrear la falta de organización y planeación de los procesos de mantenimiento tanto predictivos como correctivos (Wang, Ye, Yin, 2016; Duffua-Salih, Raoluf and Dixon, 2000; Bohórquez, 2004). Al analizar el estado actual del desempeño de la maquinaria del departamento de mantenimiento se encontró que no existe un programa adecuado de mantenimiento para los equipos de la planta y parámetros que encaminen a una proyección real y futura hacia la planeación y programación sobre los equipos, por tal motivo se requiere la tecnificación y organización del departamento de mantenimiento.

Para ello, se realizó un estudio mediante la aplicación sistemática de 7 pasos que son presentados a continuación los cuales tienen relación constante con el control de mantenimiento mecánico y eléctrico, en pro del mejoramiento de las condiciones de operación de la maquinaria.

- Ficha técnica de equipos. Que presenta la información relevante a las características generales de los equipos; marca, referencia, piezas y capacidad.
- Hoja de vida. En la que se presentan las actividades realizadas a las máquinas en forma consecutiva y por orden cronológico.
- Planos. Que permiten visualizar las piezas que incluyen diseños especiales y en determinado caso ser fabricadas por el departamento.
- Fotos. De la mayoría de los equipos de la planta para referenciar rápidamente su ubicación.
- Orden de trabajo. Evaluado e implementado como documento de campo que permite revisar y evaluar tiempo y herramientas utilizados para desarrollar una función programada o de emergencia sobre los equipos.
- Alarmas. Que muestran las principales operaciones planeadas y establecidas según rutas de mantenimiento, fechas y jornadas analizadas para conveniencia de los equipos; y comunican en forma oportuna el momento de intervención además de materiales y repuestos necesarios.
- Empresa. Que vincula la información general de la compañía, sus representantes, sus empleados, las sedes, y proveedores.

El desarrollado de las secciones y los valores de puntuación para cada tema se asignó de acuerdo con los parámetros obtenidos de forma directa a partir de los equipos de producción, los límites de costos para repuestos o reparaciones, así como la confiabilidad de cada máquina basados en la hoja de vida.

Teoría de Criticidad

La implementación de la Teoría de Criticidad se basa en la operación de los equipos y de las bitácoras. La calificación de los equipos se realiza mediante inspección visual y auditiva de cada uno de los componentes del sistema, considerando, el aporte de tiempo de vida y duración, así como el ambiente de trabajo al que están sometidos, asegurando así, la disponibilidad y confiabilidad de las operaciones mediante un óptimo mantenimiento (Bohórquez, 2004; Grall, Berenguer, Dieulle, 2002).

En concordancia con el objetivo trazado para el proyecto se implementó el desarrollo de un plan de mantenimiento sostenible con el fin de idear el mejoramiento en la producción a partir del departamento de mantenimiento y sus acciones. Por tal motivo se propone una técnica especializada (estudio de Criticidad) que ayude a resolver esta problemática (Grall, Berenguer, Dieulle, 2002; Duffua-Salih, Raoluf and Dixon, 2000).

Los alcances de esta investigación de acuerdo con el objetivo del trabajo se enfocaron en el diseño, desarrollo e implementación de un sistema que facilita las acciones y jornadas de mantenimiento, conformando un desempeño y una eficacia operacional de los equipos al contar con bases de datos que permiten brindar criterios necesarios para hacer inversión oportuna sobre ellos. Además de obtener las rutinas de mantenimiento analizadas, establecidas y recomendadas que fomenten en los operarios y personal de mantenimiento una cultura de cuidado y revisión continua sobre los equipos. El sistema permitirá arrojar resultados a partir de formatos de lenguaje simples, fáciles y cómodos basados en el análisis de Criticidad (Kyiakidis, Dimitrakos, 2006).

Las limitaciones de este trabajo están relacionadas con la falta de un sistema de soporte informático adecuado, ya que se presenta en tablas asignada por hojas de cálculo sencillas para cada equipo donde se registran datos tales como: especificaciones de la máquina, hoja de vida distribuida en las últimas acciones realizadas, y datos faltantes descritos en forma poco clara (Kenne, Nkeungoue, 2008). Los inconvenientes presentados se dan al intentar definir con exactitud las operaciones realizadas y los implementos utilizados. La falta de documentación sobre las piezas necesarias, así como algunos planos sobre partes relevantes de las maquinas; es decir, que no existe una ficha técnica de equipos o bien que se encuentra incompleta (Swamson, 2001; Fore and Msipha, 2010; Grall, Berenguer, Dieulle, 2002; Kenne, Nkeungoue, 2008). Por lo tanto, el estudio de Criticidad podría verse afectado por la falta de información. Basados en lo anterior se pudo observar que existe una influencia directa entre los equipos de producción, límites de costos en repuestos y reparaciones, así como en la confiabilidad de cada equipo. A continuación, en la tabla 1, se presenta la información general de variables de Criticidad utilizadas para este estudio.

Tabla 1
Variables aplicadas en el estudio de Criticidad

Tipo de variable	Variable evaluada	Puntaje
Frecuencia de fallas, (FF)	Pobre a mayor, 4 fallas por año:	4
	Promedio 2-3 fallas por año:	3
	Buena 1-2 fallas por año:	2
	Excelente menos de 1 falla por año:	1
Costo de mantenimiento, (CM)	Mayor o igual a \$60,000	2
	Inferior a \$20,000	1
Impacto Operacional, (IO)	Parada de toda la planta	10
	Parada del sistema o sección y tiene repercusión en otros sistemas.	7
	Impacta niveles de inventario	4
	No genera ningún efecto significativo sobre operaciones y producción	1
Impacto seguridad ambiente e higiene, (ISAH)	Afecta seguridad humana tanto interna como externa y requiere de la notificación de	8

		agentes internos y externos de la organización.	
		Afecta el ambiente e instalaciones.	7
		Afecta Instalaciones causando daños severos.	5
		.Provoca daños menores.	3
		No provoca ningún daño a personas, medio ambiente e instalaciones.	1
Flexibilidad (FO)	Operacional,	No existe opción de producción, ni repuesto disponible para Compra.	4
		Hay opción de fabricación del repuesto.	2
		Repuesto disponible en almacén.	1

Nota: información tomada de la tesis "Variable aplicada en el estudio de criticidad", de la Universidad de Ingeniería Industrial de Santander, Facultad de Ingeniería, Colombia, (2004).

Para el cálculo de la Criticidad se utilizaron las siguientes operaciones dadas por las ecuaciones (1 y 2) que son mostradas a continuación:

$$\text{Criticidad total (CT)} = \text{Frecuencia (FF)} \times \text{Consecuencias (CC)} \quad (1)$$

Dónde las consecuencias son calculadas de la siguiente manera, ecuación (2):

$$\text{Consecuencias (CC)} = \text{IO} \times \text{FO} + \text{CM} + \text{ISAH} \quad (2)$$

Dónde: **FF**, es la frecuencia; **CC**, son las consecuencias; **IO**, es el impacto operacional; **FO**, es la flexibilidad operacional; **CM**, es el Costo de mantenimiento y **ISAH**, Impacto seguridad ambiente e higiene.

Calculo de la matriz de mantenimiento

A cada uno de los equipos a estudiar se les asignó una calificación correspondiente con cada factor, y el valor final de Criticidad se calculó usando las ecuaciones 1 y 2. Se utilizaron las columnas de frecuencia y consecuencia para el desarrollo de la Matriz de Criticidad, la cual ayuda a determinar la tendencia de mantenimiento aplicable para cada equipo. En la tabla 2, se muestra el modelo para la construcción de la Matriz de Criticidad a utilizar. Esta Matriz de Criticidad señala la dependencia de la Frecuencia (**FF**) como función de la Consecuencia (**CC**) y en ella se plasma el grado de Criticidad de los mantenimientos.

Tabla 2

Matriz de Mantenimiento medianamente Crítico (**MC**), Mantenimiento Crítico (**C**) y Mantenimiento no Crítico, (**NC**)

	4	MC	MC	C	C	C
	3	MC	MC	MC	C	C
Frecuencia, FF	2	NC	NC	MC	C	C
	1	NC	NC	NC	MC	C
		10	20	30	40	50
		Consecuencia, CC.				

Nota: elaboración propia por parte de los autores, 2019.

Las zonas señaladas por colores designan la aplicación de operaciones con determinadas tendencias; el área en rosa representa un mantenimiento predictivo, el color amarillo denota un mantenimiento preventivo y el color verde simboliza un mantenimiento correctivo. Esta metodología adecuada para el desarrollo de programas de mantenimiento, refleja el desempeño real de los equipos, lo que significa que es posible obtener de resultados positivos de productividad a partir de este modelo.

Plan integral de mantenimiento

El plan integral de mantenimiento está basado en el concepto de Criticidad, mediante el cual se diseñó un programa de mantenimiento capaz de operar, almacenar, procesar y presentar datos en forma anticipada para la operación de los procesos de mantenimiento, con el fin de optimizarlos y que permitan tomar decisiones adecuadas, en equipos como: Básculas mecánicas, Malacates, Tolvas y Esterilizadores que son clave en la extracción de aceite.

Como primer paso, cada uno de los equipos fue inspeccionado físicamente, junto con el análisis de los datos plasmados de las bitácoras de operación de cada equipo, así como la recuperación de datos de las placas. En el análisis se obtuvieron las calificaciones de los rubros señalados en la tabla 1, como son: Frecuencia de fallas (**FF**), Costo de mantenimiento (**CM**), Impacto Operacional (**IO**), Impacto seguridad ambiente e higiene (**ISAH**) y Flexibilidad Operacional (**FO**). A partir de estas estimaciones se calculó las Consecuencias (**CC**), Ecuación 2, y se graficó la Matriz de Criticidad **FF** vs **CC** de la tabla 2, que permitió clasificar el tipo de mantenimiento en cada uno de los equipos. Los tipos de mantenimiento se describen a continuación:

Mantenimiento correctivo

El mantenimiento correctivo consiste en la reparación total hasta corregir el defecto y se libera hasta el punto de que el equipo funcione de manera eficiente (Duffa-Salih, Raouf and Dixon, 2000). Este tipo de proceso implica un alto grado de análisis y de responsabilidad sobre los equipos, debido a que se debe tener un amplio conocimiento de las posibles fallas, disponibilidad de piezas para una rápida y efectiva ejecución frente a imprevistos, de ahí que se justifique el mantenimiento correctivo en los siguientes factores:

- Equipo fuera de línea o Punto Crítico del proceso: no ocasiona trastornos serios a la producción o al mantenimiento.
- Equipo en estado de desuso u obsolescencia.
- Existencia de un equipo igual.
- Fácilmente sustituible por un equipo nuevo.

Dichos factores deben ser evaluados periódicamente en base al concepto de Criticidad, de modo que pueda establecerse que el mantenimiento correctivo sea adecuado.

Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo es un mantenimiento planificado y programado en base en el estado o condición del equipo (NASA, 2008). La condición se determina mediante el monitoreo de variables tales como: Temperatura, Presión, Humedad, Tensión, Deformación, Movimiento mecánico, Acción cíclica, Desplazamiento, Grado de cambio, Tiempo, Acidez/pH, Descargas, Concentración, Composición, Función

eléctrica, Función mecánica y Secuencia, Secuencia eléctrica, Aceleración, Desaceleración, Características eléctricas, magnéticas y electromagnéticas, Condición de aceites y otros Fluidos (NASA, 2008; Chang, Young, 1986).

El estudio se llevó a cabo para cada equipo mediante el control de frecuencia (ciclo, mes y año) de mantenimiento que se brinda al equipo para evitar retrasos continuos en los procesos de producción (Duffa-Salih, Raouf and Dixon 2000; NASA, 2008; Domínguez-Giraldo, 1998; Zho, Xi, Lee, 2007). A continuación, se presenta en la tabla 3 el plan integral de programación para cada equipo, frecuencia, ciclo y día estimado para los respectivos mantenimientos.

Tabla 3

Plan Integral de programación de los equipos para mantenimiento correctivo, preventivo: Báscula mecánica, Esterilizador, Malacate y Tolvas

Báscula mecánica	Frecuencia	Ciclo	Día
Calibrar en sensores de kilos a toneladas	Semanal	1	Sábado
Revisión general sistema eléctrico	Diario	1	Sábado
Revisión del área de pesaje	Diario	1	Sábado
Esterilizador			
Revisar fugas de vapor por tapas y camisas	Diario	1	Diario
Aseo general	C/ 6 días	1	Sábado
Verificación y calibración de válvula de seguridad	Diario	1	Diario
Inspección de la tubería de condensados y vapor	C/6 días	1	Sábado
Inspección de rieles y camisas de desgaste	C/6 días	1	Sábado
Inspección de partes móviles de vías	Mensual	1	Sábado
Limpieza de la trampa de vapor	Mensual	1	Sábado
Disparo de la válvula de seguridad	Mensual	1	Sábado
Revisión de bandeja de vapor	Mensual	1	Sábado
Revisión del sello de válvula de entrada de vapor	Mensual	1	Sábado
Revisión del sello de válvula de descarga y condensado	Mensual	1	Sábado
Malacate			
Revisión de tambor cilíndrico	Diario	1	Lunes
Revisión del estado del reductor	Mensual	1	Lunes
Revisión general del sistema eléctrico	semanal	1	Lunes
Tolva			
Revisión de la cadena y rastra	Mensual	1	Lunes
Revisión de piñones	Mensual	1	Lunes
Revisión general del sistema eléctrico	Diario	1	Lunes
Revisión de la cadena de transmisión	Mensual	1	Lunes
Revisión de chumaceras	trimestral	1	Lunes

Nota: Elaboración propia de los autores, 2019.

El procedimiento de las actividades realizadas se llevó a cabo mediante la aplicación sistemática de los 7 pasos antes mencionados cuya relación constante con el control de mantenimiento eléctrico y mecánico fueron necesarios para alcanzar el objetivo del trabajo

Resultados

Calificación de los equipos

Los resultados de Criticidad *FF*, *IO*, *FO*, *CM*, *ISAH* y *CT* obtenidos muestran la tendencia de mantenimiento a través de las columnas *CC* y *FF* (tabla 4), para cada uno de los equipos; Básculas Mecánicas, Malacates, Tolvas y Esterilizadores. Los datos permiten clasificar los mantenimientos, basados en la inspección visual y auditiva de cada uno de los componentes del sistema de clasificación de equipos, considerando su tiempo de vida, duración y ambiente al que es sometido; evaluado mediante la escala Criticidad aplicada a cada uno de los rubros que se mencionaron en la tabla 1. Los resultados obtenidos permiten programar proyectos de mantenimiento a mediano y largo plazo con acciones que direccionan el buen funcionamiento de los equipos en las industrias.

Tabla 4
Valores de Criticidad estimados para los equipos estudiados

EQUIPO	FF	IO	FO	CM	ISAH	CT	CC	FF
Báscula mecánica	1	4	4	2	1	19	19	1
Malacate	2	7	1	2	1	20	10	2
Tolva	3	7	2	1	1	48	16	3
Esterilizador	3	7	1	2	7	48	16	3

Nota: Elaboración propia por parte de los autores, 2019.

En base a los datos obtenidos se graficó la Matriz de Criticidad (tabla 5), para los equipos antes mencionados (Básculas mecánicas, Malacates, Tolvas y Esterilizadores). De acuerdo con la Matriz de Criticidad, equipos tales como Básculas mecánicas y Malacates deben ser sometidos a mantenimientos predictivo mientras que las Tolvas y Esterilizadores deben ser sometidos a mantenimiento preventivo, con ello también se pudo observar que ningún equipo indica su aplicación en mantenimientos correctivos.

Tabla 5
Matriz de Criticidad para los equipos; básculas mecánicas, Malacates, Tolvas y Esterilizadores

	4	MC	MC	C	C	C
	3	MC	Tolva Esterilizador	MC	C	C
Frecuencia, FF	2	Malacate	NC	MC	C	C
	1	NC	Báscula mecánica	NC	MC	C
		10	20	30	40	50
		Consecuencia, CC.				

Nota: Elaboración propia por parte de los autores, 2019.

De acuerdo con los resultados obtenidos de las inspecciones efectuadas en los equipos, se logró la programación de procedimientos preventivos en Tolvas y Esterilizadores, como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6
Inspecciones programadas para los equipos Tolvas y Esterilizadores acciones preventivas

Equipo	Acciones preventivas
Tolvas	<i>Mangueras de tubo flexible Mangueras de tubo rígido Racores de la Tolva Rodamiento de la compuerta de la Tolva</i>
Esterilizadores	<i>Empaque de puertas Camisas de desgaste Electrodos Warrick Sensor de nivel Sensor de presión Trampa de condensados Correas del compresor</i>

Nota: Elaboración propia por parte de los autores, 2019.

Como ya fue discutido anteriormente, la aplicación de una buena planeación de mantenimiento genera beneficios tales como: reducción de horas de operación, tiempos muertos, ahorro de costos de producción y mejora la productividad (Eficiencia x Eficacia) evitando así, fallas ocultas, daños inesperados y mantenimientos correctivos (Swamson, 2001; Fluke, 2005; NASA, 2008; González, 2001). En base al análisis realizado y los resultados visuales y auditivos, se establece que el sistema de información para cada equipo (SIE), debe ser modificado bajo las siguientes recomendaciones (tabla7).

Tabla 7
Modificaciones recomendadas para el sistema de información los equipos de mantenimiento

Sistema de información de equipos, SIE	Modificaciones recomendadas
Ficha técnica	Que presente información relevante a las características generales del equipo: marca, referencia, piezas y capacidad.
Hoja de vida	Que presenten las actividades realizadas a las maquinas en orden cronológico y en forma consecutiva.
Planos	Que permitan visualizar las piezas e incluyan diseños especiales y en determinado caso ser fabricadas por el departamento.
Fotos	Equipos de la planta para referenciar su ubicación.
Orden de trabajo	Evaluado e implementado como documento de campo que permita revisar y evaluar el tiempo y las herramientas utilizadas para desarrollar una función programada o de emergencia sobre los equipos.
Alarmas	Que muestren las principales operaciones planeadas y establecidas según: rutas de mantenimiento, fechas y jornadas analizadas, para conveniencia de los equipos; que comuniquen en forma oportuna el momento de intervención, además de los materiales y repuestos.
Empresa	Que vincule la información general de la compañía, con sus representantes, empleados, sedes, y proveedores

Nota: elaboración propia por parte de los autores, 2019.

Conclusiones

Se obtuvo una Matriz de Criticidad en base a las observaciones visuales de cada uno de los equipos (Básculas mecánicas, Malacates, Tolvas y Esterilizadores) estudiados. En base al análisis de Criticidad, se determinaron las tendencias de mantenimiento preventivo y predictivo para los pares Básculas Mecánicas, Malacates y Tolvas, Esterilizadores, respectivamente. Se estableció un sistema de planeación de mantenimiento preventivo para Tolvas y Esterilizadores. Finalmente se diseñó, elaboró y alimentó un sistema de Información que anticipa el control previsorio sobre las acciones del departamento de mantenimiento y producción. Estas acciones generan beneficios tales como la disponibilidad y seguridad de la planta de equipos, mejora en la calidad de los productos, un mejor registro con capacidad de información de primera mano sobre las condiciones de la maquinaria, una buena capacidad en cantidad y calidad de actividades de mantenimiento, optimización en el manejo de partes de reparación, mejoras del diseño de equipos lo cual conduce a reducción de costos por mantenimiento. La implementación de sistemas de mantenimiento reduce los reprocesos, y la práctica y capacitación constante facilita diagnósticos y control, mejorando las operaciones de mantenimiento.

El análisis de Criticidad se recomienda como una herramienta para la mejora continua de la industria. Basado en el análisis de Criticidad se recomienda la estandarización de los procedimientos de mantenimiento que se ejecutan, poniendo énfasis en aquellos que están clasificados como preventivos, puesto que este tipo de mantenimiento reditúa en mayor medida en el ahorro, al reducir fallas y paros de producción por desperfectos en equipos. Se debe tomar en cuenta que los procedimientos para mantenimientos preventivos deben estar sujetos a tiempos adecuados para no interferir en la producción. Además, tomar en cuenta que el mantenimiento derivado del modelo de Criticidad no es inflexible, ya que éste debe ajustarse a través de las continuas inspecciones de supervisión que deben ser llevadas a cabo por el personal de mantenimiento. En caso necesario de establecer paro de equipos por mantenimiento correctivo y que se generen tiempos muertos mayores a los establecidos en el plan de mantenimiento, deben ser justificados adecuadamente, porque de otra manera se entendería que los valores ponderados de las calificaciones de los equipos mostrados en la tabla 1, fueron seleccionados de forma incorrecta. Para estos casos se recomienda hacer nuevamente el análisis de Criticidad considerando las ponderaciones de cada equipo para la obtención de la consecuencia correcta que da lugar a la Matriz de Criticidad.

Referencias

- Aguilar-Otero, J. R., Torres-Arcique, R., Magaña-Jiménez, D., (2010). Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad. *Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ)* 25 (1), 15-26. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48215094003>
- Ahmad-Rasdan, I., Rafis-Suizwam, I., Rozli, Z., Nor-Kamilah, M., (2009). A study on implementation of preventive maintenance programme at Malaysia Palm Oil Mill. *European Journal of Scientific Research*, 29(1), 126-135.

- Bohórquez, O., (2004). Tesis Licenciatura, Universidad Industrial de Santander Facultad De Ingenierías Físico – Mecánicas, Colombia.
- Carnero, M.C., (2003). The control of the setting up of a predictive maintenance program using a system of indicators. *Omega*, 32, 57-75. doi: 10.1016/j.omega.2003.09.009
- Chang, H.L., Young, H.Ch., (1986). An algorithm for preventive maintenance policy. *IEEE Trans. Reliab.*35, 71-75. doi: 10.1109/TR.1986.4335352
- Domínguez-Giraldo, G., (1998). *Indicadores de Gestión*. Biblioteca Jurídica.
- Dhillon, B.S., (2002). *Engineering maintenance: A modern Approach*. U.S. CRC Press LLC.
- Díaz-Concepción, A., Pérez-Rodríguez, F., Del Castillo-Serpa, A., & Brito-Vallina, M.L. (2012). Propuesta de un modelo para el análisis de criticidad en plantas de productos biológicos. *Ingeniería Mecánica*, 15 (1), 34-43. Retrieved from http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S18159442012000100004&lng=es&tlng=es
- Duffua-Salih, O., Raouf, A. and Dixon, C.J., (2000). *Sistemas de mantenimiento, planificación y control*. México: LIMUSA WILEY.
- Fluke Corporation, (2005). Basics of Predictive/preventive maintenance. 1-4. Retrieved from https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/2534401_b_eng_w.pdf
- Fore, S. and Msipha, A., (2010). Preventive maintenance using reliability centred maintenance (RCM): A case study of a ferrochrome manufacturing company. *South African Journal of Industry Engineering*, 21(1), 207-235. Retrieved from http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-78902010000100018
- González, B.C.R., (2001). *Conferencias ingeniería de mantenimiento*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Grall, A., Berenguer, C., Dieulle, L., (2002). A condition-based maintenance policy for stochastically deteriorating systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 76 (2), 167-180. doi: 10.1016/S0951-8320(01)00148-X
- Horner, R.M.W., El-Haram, M.A. Munns, A.K., (1997). Building maintenance strategy: anew management aproach. *Journal of Quality in Maintenance Engineering.*, 3 (4), 273-280. Retrieved from <https://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/13552519710176881>
- Kenne, J.P., Nkeungoue, L.J., (2008). Simultaneous control of production, preventive and corrective maintenance rates of a failure-prone manufacturing system. *Applied Numerical Mathematics* 58 (2), 180–194. doi: 10.1016/j.apnum.2006.11.010
- Kogbaa, G., Huang, J., (1992). Database design for predictive preventive maintenance system of automate manufacturing system. *Comp.and Ind.Eng.* 23 (1), 7-10. doi: 10.1016/0360-8352(92)90051-K
- Kumar-Srivastava, N., Mondal, S., (2014). Development of a predictive Maintenance Model Using Modified FMA Aproach. *The UPI Journal of Operations Management*.13(2) 1-17.
- Kyriakidis, E. G. K., Dimitrakos, T. D., (2006). Optimal preventive maintenance of a production system with an intermediate buffer.*Europ.J.Op.Res.*168 (1), 86-99.
- Mendel, E., Rauber, T.W., Varejao, F.M. and Batista, R.J., (2009). Rolling element bearing fault diagnosis in rotating machines of il extraction rigs. In *17th European Signal Processing conference (EUSIPCO)*.

- NASA, (2008). RMC Guide Reliability-Centered Maintenance Guide For Facilities and Collateral Equipment. Public, Law 109-58. Energ. Pol. Act. 1-474. Retrieved from https://fred.hp.nasa.gov/Assest/Docs/2015/NASA_RCMGuide.pdf
- Nazmul, A.S.; Taib, S., (2013). Application of infrared thermography for predictive/preventive maintenance of thermal defect in electrical equipment. *App.Ther. Eng.* 61 (2) 220-227. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.07.028
- Salleh-Intan, S., Mohd-Yusof, K. and Zahedi, G., (2012). Maintenance needs of a palm oil refinery. 14th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering congress. Singapore. doi: 10-3850/978-981-07-1445-1_510.
- Swamson, L., (2001). Linking maintenance strategies to performance. *Int. J. Productions.Economics.*70 (3), 237-244.
- Wang, H., Ye, X., Yin, M., (2016). Study on Predictive Maintenance Strategy. *International. Journal of Science and Technology.* 9 (4), 295-300. doi: 10.14257/ijunesst.2016.9.4.29
- Zhou, X., Xi, L., Lee, J., (2007). Reliability centered predictive maintenance scheduling for a continuously monitored system subject to degradation. *Reliability Engineering and System Safety, Elsevier.* 92(4), 530-534. doi: 10.1016/j.res.2006.01.006
- Zul-Altfi, I., (2017). Improving conventional method on precast concrete building maintenance: towards BIM. *Industrial management & data system.* doi: 10.1108/IMDS-09-2016-0380.

Fecha de recepción: 08/02/2019

Fecha de revisión: 08/02/2019

Fecha de aceptación: 26/02/2019

