

Oportunidades de mejora en la planeación del mantenimiento mayor en plantas de refinación de crudo

Jairo Javier Almanza Correa¹
Universidad Tecnológica de Bolívar
jairo.almanza@hotmail.com

Fecha de recepción: 07 de abril de 2022
Fecha de aprobación: 22 de mayo de 2023

Cómo citar este artículo: Almanza Correa, J. J. (2022). Oportunidades de mejora en la planeación del mantenimiento mayor en plantas de refinación de crudo. *Revista Ontare*, 10, (páginas). DOI:

Resumen

Este artículo es el resultado de un proceso de investigación que se adelantó en relación con las oportunidades de mejora que han sido documentadas en conjunto con los procesos de planeación de mantenimientos mayores que periódicamente se realizan en las refinerías de crudo. Después de la introducción que aparece a continuación, se desarrolla un marco teórico de referencia y se describe el método que se utilizó para la selección y análisis de las publicaciones. El capítulo de resultados se divide en tres apartados, el primero de los cuales incluye una tabla en la que se listan y describen brevemente las publicaciones consideradas, lo que da paso a un primer apartado sobre la selección de estrategias de mantenimiento; a continuación, se explica la metodología FMEA y finalmente se confrontan las propuestas de otras publicaciones que enriquecen el debate sobre las tendencias que a nivel mundial se han ido convirtiendo en buenas prácticas, de acuerdo con los resultados de estudios tanto teóricos como empíricos. Las conclusiones muestran tres características del perfil que deben tener los profesionales que gerenciarán estos programas de mantenimiento; ese perfil debe incluir la habilidad para gestionar indicadores basados en complejos modelos matemáticos, así como la familiaridad con equipos tecnológicos, programas cada vez más avanzados y la sensibilidad por temas tanto ambientales como de seguridad.

Palabras clave: mantenimiento; planeación; refinerías; proyectos; gerenciamiento.

Opportunities for improvement in major maintenance planning in crude refining plants

Abstract

This article presents the findings obtained after a systematic literature review exercise developed within the framework of the project management master's program, in relation to the improvement opportunities that have been documented in relation to the major maintenance planning processes that periodically are made in crude oil refineries. After the introduction that follows, a theoretical reference framework is developed and the method used for the selection and analysis of the publications is described. The results chapter is divided into

¹ Ingeniero de Sistemas. Maestría en Gerencia de Proyectos. Universidad Tecnológica de Bolívar. Facture SAS, Cartagena, Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6926-996X>

three subchapters, the first of which includes a table listing and briefly describing the publications considered, which leads to a first section on the selection of maintenance strategies; next, the FMEA methodology is explained and, finally, the proposals of other publications that enrich the debate on the trends that have become good practices worldwide are compared, according to the results of both theoretical and empirical studies. The conclusions show three characteristics of the profile that the professionals who will manage these maintenance programs must have; This profile must include the ability to manage indicators based on complex mathematical models, as well as familiarity with increasingly advanced technological equipment and software, and sensitivity to both environmental and safety issues.

Keywords: Maintenance; planning; refineries; projects; management.

1. Introducción

La industria petrolera tiene una especial importancia en Colombia, por dos razones diferentes. En primer lugar, la exportación de crudo es la principal fuente de divisas que ha tenido el país por varios años; junto con el carbón han sustituido desde hace varias décadas a las exportaciones de café, por lo que es una actividad cuya permanencia tiene alto impacto en todos los proyectos financiados con recursos públicos, en sectores como la educación, la seguridad, la salud, entre otros (Gudynas, 2018). La segunda razón, tanto o más importante, es que los diferentes derivados del petróleo y, especialmente los combustibles, siguen siendo indispensables en el país y en el mundo para que se mantengan activas las industrias, los vehículos, las viviendas y todas aquellas máquinas o dispositivos que utilizan combustibles fósiles, lo que incluye también algunas centrales termoeléctricas (Corredor, 2018).

La parálisis de una planta de refinación de crudo representa un serio problema no solo para todos los usuarios y consumidores de sus productos, sino una seria amenaza para las finanzas públicas. Cuando se prolonga una parada programada de una de estas refinerías, el Estado, a través de Ecopetrol y el Ministerio de Minas y Energía, se ven en la necesidad de importar combustibles a precios normalmente muy altos y en cantidades muy grandes, lo cual puede poner en peligro no solo la actividad de diferentes sectores industriales y familiares, sino las reservas internacionales de dólares que administra el Banco de la República (Perry, 2019).

En resumen, una inadecuada gestión de estas paradas de mantenimiento representa al mismo tiempo un problema social y económico de importantes dimensiones.

La situación descrita hace que se presente un alto nivel de exigencia en las fases de planeación y ejecución de los planes de mantenimiento de las plantas de refinación de crudo, más conocidas simplemente como refinerías. En Colombia existen solamente dos refinerías de crudo, una en Barrancabermeja y la otra en Cartagena; la presión que se ejerce desde los altos cargos relacionados con la actividad petrolera para que se reduzcan los tiempos destinados a hacerles mantenimiento a los equipos de las refinerías, representa un reto para los ingenieros y demás especialistas que en el campo tienen la responsabilidad de garantizar la operatividad de todos los componentes de esas plantas (Andrade, 2019).

Desde lo técnico, ese nivel de exigencia hace necesario que las fases de planeación y ejecución de los programas de mantenimiento de las refinerías se elaboren con la máxima eficiencia y eficacia posibles, es decir, que se logren no solamente los mejores resultados en cuanto a la conservación de los equipos intervenidos, sino que se haga en el menor tiempo posible y a un costo razonable (Calvo, 2020).

A lo anterior se suma el hecho de que en esas refinerías existen equipos e instalaciones que no son comunes en otras plantas industriales. Esto quiere decir que para darles mantenimiento a estas instalaciones se requieren conocimientos, instrumentos y prácticas de mantenimiento que solamente posee un grupo relativamente escaso de personas y empresas. A diferencia de otras empresas como las de alimentos u otro tipo de insumos o productos de consumo masivo, no se puede ir a una ferretería de barrio a adquirir tales componentes, y solamente se pueden vincular a esos proyectos de mantenimiento personas realmente expertas, conocedoras de las regulaciones técnicas aplicables, los procedimientos de seguridad, los estándares técnicos y demás especificaciones necesarias para poder generar la eficacia y la eficiencia esperadas.

Normalmente se trata de paradas que se prolongan por varios meses, con miles de horas-hombre invertidas, en donde la concentración es total, con jornadas de trabajo muy extensas

o incluso sin interrupciones por varios días, con múltiples equipos de trabajo simultáneos y/o alternos que deben actuar de manera muy sincronizada para poder cumplir los estrictos cronogramas que se hayan definido.

El presente artículo de reflexión se propone ampliar el conocimiento disponible en el país como producto de este tipo de paradas de planta de la refinería de Cartagena, con la incorporación de literatura internacional disponible sobre el tema, con el propósito de construir un documento que recoge oportunidades de mejora que se presentan específicamente en la fase de planeación de estos *overhaul*, que es el término que suele utilizarse en el idioma inglés para referirse a este tipo de paradas de mantenimiento total.

El enfoque que se dará a este documento se basará en la filosofía de la gerencia de proyectos, tomando en consideración que en la práctica se trata realmente de eso, de proyectos que deben cumplir con todas las exigencias de otros para la construcción de obras de infraestructura, solo que en este caso se trata de un reto que involucra diferentes fuentes de complejidad, por las razones previamente citadas. Para lograrlo, se realizará una revisión sistemática de literatura tanto en idioma español como en inglés, con el fin de seleccionar publicaciones en las que se presenten diferentes experiencias internacionales exitosas en la construcción de planes de mantenimiento de este tipo de instalaciones (García, 2020). Se consultaron bases de datos de publicaciones indexadas y reconocidas, con énfasis en trabajos que no solamente se sustentan en consideraciones teóricas, sino especialmente respaldadas por experiencias reales en campo.

2. Marco teórico

Independientemente del sector industrial que se estudie, la literatura reconoce diez tipos o técnicas de mantenimiento, que se diferencian entre sí por el carácter de las tareas que incluyen y con relación a lo anterior, se hace referencia a la definición breve de cada una de las técnicas (Mejía *et al.*, 2018).

- **Mantenimiento preventivo (MP).** Una serie de tareas que se realizan con una frecuencia dictada por el paso del tiempo. Adaptación óptima con la reparación mínima. Mantenimiento basado en la condición. El servicio de mantenimiento preventivo se basa en una cierta lectura, la medición de ir más allá de un límite predeterminado. Si una máquina no puede sostener una tolerancia, se inició un mantenimiento basado en condiciones.
- **Mantenimiento productivo total (TPM).** Originario de Japón, se centra en la solución de los problemas de mantenimiento utilizando el método de los círculos de calidad. Algunas de las ventajas de la implementación de TPM en una organización son: mejor comprensión del funcionamiento de los equipos, mejora del trabajo en equipo, enfoque menos contradictorio entre la producción y el mantenimiento, etc. Sistemas de gestión de mantenimiento.
- **Computerized maintenance management system (CMMS).** Proporcionan capacidades para almacenar, recuperar y analizar la información. Utiliza un enfoque de análisis de decisión formalizada con base en múltiples criterios y el sistema basado en reglas para encontrar los peores equipos o máquinas (Medenou *et al.*, 2019).
- **Reliability Centred Maintenance (RCM) (mantenimiento centrado en fiabilidad/confiabilidad).** Enfoque centrado en la fiabilidad, fundada en la década de 1960, se orientó inicialmente hacia el mantenimiento de aeronaves. Dirige los esfuerzos de mantenimiento en aquellas partes y unidades donde la fiabilidad es crítica (Zeinalnezhad *et al.*, 2020).
- **Mantenimiento predictivo.** Consiste en decidir si debe o no mantener un sistema de acuerdo con su estado.
- **Externalización de mantenimiento.** Esto se refiere a la transferencia de la carga de trabajo a los extranjeros, con los objetivos de conseguir el mantenimiento de mayor calidad a un costo más rápido, más seguro y más bajo.

- **Mantenimiento centrado en la eficacia (ECM).** La eficacia del mantenimiento centrado hace hincapié en "hacer lo correcto", en lugar de "hacer las cosas bien". Este enfoque se centra en las funciones del sistema y servicio al cliente, y tiene varias características que son funcionales para mejorar el rendimiento de las prácticas de mantenimiento y abarca conceptos básicos de gestión de la calidad.
- **Gestión de mantenimiento estratégico.** El mantenimiento es visto como una actividad multidisciplinaria.
- **Mantenimiento centrado en el riesgo.** Asegura una reunión de estrategia y mantenimiento de sonido, con el doble objetivo de minimización de riesgos causados por un fallo inesperado de los equipos y una estrategia rentable (Cullum *et al.*, 2018).

El mantenimiento se puede definir como el conjunto de acciones que tienen como objetivo mantener un artículo o restaurarlo a un estado en el cual este pueda desplegar la función requerida, o las que venía desplegando hasta el momento en que se dañó, en caso de que haya sufrido alguna rotura que hizo que necesite del pertinente mantenimiento y arreglo. La acción de mantenimiento, de restauración, normalmente no solamente implica acciones de tipo técnico sino también administrativas.

Los diversos estudios, especialmente de la ingeniería, han parametrizado esta parte de la ciencia, (Amik, 2019); en la revisión de la literatura de la gestión de mantenimiento, se determinan seis áreas de estudio:

1. Modelos de optimización.
2. Técnicas.
3. Programación.
4. Medición de desempeño.
5. Sistemas de información.
6. Políticas.

Decker (1998), se pronuncia en relación con el impacto de los modelos de optimización en la toma de decisiones de mantenimiento y el estado de la técnica, y cómo los modelos de optimización del mantenimiento están establecidos a lo largo del tiempo, los cuales pretenden efectuar mediciones de desempeño, e inclusive de mediciones en relación con fallas presentadas con determinada frecuencia y sus consecuencias, así las cosas, se determinan además ciertas técnicas.

3. Método

La primera fase del trabajo consistió en la selección de las publicaciones relevantes dentro de la revisión sistemática de literatura. Con el propósito de que el trabajo tenga una categoría de clase mundial, se realizó la búsqueda de documentos de diferentes países; una vez encontrados los documentos, se estudió su resumen, para definir cuáles son pertinentes y cuáles no.

4. Resultados

Antes de realizar la confrontación de las proposiciones planteadas por los diferentes autores consultados, en la tabla 1 se presentan las investigaciones preseleccionadas para la revisión sistemática de literatura que sustenta el desarrollo del presente trabajo.

Tabla 1. Selección de estudios

Autor(es)	Título	Año y país	Descripción	Pertinente
Evrencan Özcan, Rabia Yumuşak, Tamer Erena.	A novel approach to optimize the maintenance strategies: a case in the hydroelectric power plant (un enfoque novedoso para optimizar las estrategias de mantenimiento: un caso en la central hidroeléctrica) (2021).	2021, Turquía.	Este estudio se centra en la optimización de la estrategia de mantenimiento de una de las centrales hidroeléctricas a gran escala. Se propone un nuevo modelo para el problema de optimización de la estrategia de mantenimiento considerando la	Sí

Autor(es)	Título	Año y país	Descripción	Pertinente
			estructura multiobjetivo y multicriterio.	
Ahad Ali, Abdelhakim Abdelhadi.	Condition-based monitoring and maintenance: state of the art review (supervisión y mantenimiento basados en la condición: revisión de vanguardia) (2022).	2022, Suiza.	El mantenimiento basado en la condición (CBM) se puede utilizar para administrar de manera efectiva las operaciones y el mantenimiento, mediante el monitoreo de información detallada sobre el estado de la máquina. Este artículo proporciona una revisión del desarrollo teórico y práctico en el campo del mantenimiento basado en la condición y sus avances actuales.	Sí
W.C. Shoua, J. Wanga, X.Y. Wanga.	4D BIM for improving plant turnaround maintenance planning and execution: a case study (BIM 4D para mejorar la planificación y ejecución del mantenimiento de la rotación de la planta: un estudio de caso) (2018).	2022, Australia.	Se ha atribuido al modelado de información de construcción (BIM) de cuatro dimensiones (4D) la mejora de los procedimientos de planificación de la construcción. Este documento presenta, en primer lugar, un marco novedoso de aplicación de 4D BIM para mejorar la planificación y ejecución de los procesos de mantenimiento. Luego, se seleccionó un proyecto real para validar la efectividad y eficiencia del marco propuesto.	Sí
Sara Bressi.	Environmental performance analysis of bitumen stabilized ballast for railway track-bed using life-cycle assessment (análisis de desempeño ambiental del balasto estabilizado con betún para lecho de vía férrea utilizando la evaluación del ciclo de vida).	2018, Italia.	El balasto estabilizado con betún (BSB) es una estrategia de construcción o mantenimiento novedosa y prometedora de la vía tradicional con balasto, que consiste en el uso de emulsión bituminosa (BE). Este documento presenta los resultados de una evaluación del ciclo de vida (ACV) realizada para comparar los impactos ambientales potenciales asociados con el uso de balasto estabilizado con betún (ligado con BE), y con los asociados a las capas de balasto tradicional (áridos no ligados).	No
Alix Andrea Angarita Castillo.	Gestión de activos de I&C en la gerencia de la refinería de Barrancabermeja, enfocado en la criticidad ASP de los equipos y sus repuestos para el plan de mantenimiento del 2019. Caso de	2018, Colombia.	Durante el desarrollo de esta práctica industrial en la refinería de Barrancabermeja, se buscó identificar las características de cada una de las válvulas de control instaladas en las plantas	No

Autor(es)	Título	Año y país	Descripción	Pertinente
	estudio: válvulas de control de las plantas de polietileno y aromáticos (2018).		petroquímicas de polietileno y aromáticos para listar sus partes requeridas para un mantenimiento de rutina. El objetivo final de este proceso es la elaboración de hojas de ruta que aceleren el proceso de ejecución del mantenimiento, mediante el aprovisionamiento en <i>stock</i> de los repuestos.	
El Werfalli.	Optimising turnaround maintenance (TAM) scheduling of gas plants (optimización del mantenimiento (TAM), programación de plantas de gas) (2019).	2019, Reino Unido.	El TAM es la mayor actividad de mantenimiento utilizada en la mayoría de las empresas de petróleo y gas en términos de costo y tiempo. El aporte de esta investigación está en el desarrollo del modelo TAM, que consta de cuatro etapas. Primera: eliminación de equipos no críticos. Segunda: seleccionar equipos estáticos críticos (CSE) que constituyen el riesgo más alto. Tercera: seleccionar equipos rotativos críticos (CRE) que constituyen el riesgo más alto. Cuarta: definición de la duración y el intervalo óptimos de TAM en función de las distribuciones de fallas.	Sí.
Lilian O., Iheukwume re-Esotu, Akilu Yunusa Kaltungo.	Assessment of barriers to knowledge and experience transfer in major maintenance activities (evaluación de barreras a la transferencia de conocimiento y experiencia en actividades de mantenimiento mayor) (2020).	2020, Reino Unido.	El análisis sistemático de fallas mejora la capacidad de tomar decisiones de ingeniería. Dichos análisis se hacen más difíciles debido a incertidumbres y complejidades, como revisiones importantes, interrupciones, paradas y paradas (en inglés, MoOST). El estudio actual explora la armonización de varias evaluaciones de riesgos y herramientas de análisis de decisión multicriterio para investigar las barreras percibidas para la gestión del conocimiento de MoOST, y la transferencia de experiencia.	Sí.
Islam M. y Mostafa M.	Environmental hazards of petroleum refinery in bangladesh: a review (riesgos ambientales de la refinería de	2021, Bangladesh	Los peligros ambientales potenciales relacionados con las fábricas de petróleo y petroquímicas causan	No.

Autor(es)	Título	Año y país	Descripción	Pertinente
	petróleo en Bangladesh: una revisión) (2021).		preocupación entre las personas cercanas. Esta información proporciona una impresión general de los procesos involucrados y alguna posible contaminación ambiental asociada con las industrias petroleras.	
Abdallah L., I-Shennawy T.	Improving energy efficiency in electric systems in oil refineries: economical and environmental evaluation (mejorando la eficiencia energética en sistemas eléctricos en refinerías de petróleo: evaluación económica y ambiental) (2019).	2019, Egipto.	El sector petrolero egipcio había lanzado un programa de modernización que consta de siete pilares; el cuarto es mejorar la eficiencia energética aguas abajo. En este documento, se examinan algunas de las mejores tecnologías disponibles en eficiencia energética eléctrica. Se propone una metodología para priorizar estas oportunidades y se ilustra con estudios de casos.	No.
Nematpour Malek Abad M. J., Sheikhdavodi I., Hazbavi A., Marzban.	Optimization of refinement operations of sugarcane harvester hydraulic oil (optimización de operaciones de refinamiento de aceite hidráulico de cosechadoras de caña de azúcar) (2020).	2020, Irán.	El propósito fue modelar y optimizar las operaciones de refinamiento fuera de línea del aceite hidráulico de cosechadoras de caña de azúcar utilizando RSM. Para ello se estudiaron los efectos de las variables independientes de horas de operación, tamaño de la malla del filtro y tiempos de refinación del aceite hidráulico sobre variables de contaminación del agua.	No.
Nematpour M. A. H., Sheikhdavodi M., Hazbavi I., Marzban A.	Economical assessment of replacing and refining methods of hydraulic oil of sugarcane harvesters in sugarcane cultivation industry of Khuzestan. (evaluación económica de los métodos de reemplazo y refinación del aceite hidráulico de las cosechadoras de caña de azúcar en la industria de cultivo de caña de azúcar de Juzestán) (2021).	2021, Irán.	La contaminación debida a los fluidos hidráulicos ejerce efectos nocivos después de un largo tiempo. Para evitar la probabilidad de que ocurran tales problemas, se presentan las siguientes dos estrategias: usar el método de cambio de aceite para reemplazar todos los fluidos hidráulicos del sistema de descarga con el aceite nuevo y usar el sistema de filtración de aceite hidráulico fuera de línea para la eliminación de partículas de aceite contaminadas.	No.
Ferney López Martínez.	Optimización de las operaciones en el mantenimiento correctivo de motores síncronos en la refinería Ecopetrol de	2020, Colombia.	Estimar y planificar acciones de servicio, con el fin de minimizar el tiempo de inactividad. A través de la herramienta SAP se creó un	No.

Autor(es)	Título	Año y país	Descripción	Pertinente
	Barrancabermeja para el año 2020 (López, 2020).		inventario de repuestos de estos motores síncronos que son importantes y escasos para distintos procesos de la refinación, logrando una información completa en la base de datos en donde se muestre de manera puntual y detallada el tipo de repuesto y su cantidad que debe existir en el <i>stock</i> , para que cuando lleguen estos motores a su respectivo mantenimiento el tiempo de reparación sea el estipulado.	
Kaveh H., Esmaeeli H.	A system dynamics model for evaluating the firms' capabilities in maintenance outsourcing and analyzing the profitability of outsourcing (un modelo de dinámica de sistemas para evaluar las capacidades de las empresas en la subcontratación de mantenimiento y analizar la rentabilidad de la subcontratación) (2021).	2021, Irán.	La subcontratación del mantenimiento es una práctica común en las plantas petroquímicas. Sin embargo, la subcontratación está asociada con muchos riesgos. Este estudio, basado en la dinámica del sistema, diseña un modelo para identificar variables que influyen en la efectividad del equipo, la eficacia y la rentabilidad. También examina el alcance de los efectos de estas variables y sus relaciones para decidir sobre la subcontratación del mantenimiento en las refinerías de gas.	Sí.
Iheukwumere L., Yunusa.	Knowledge criticality assessment and codification framework for major maintenance activities: a case study of cement rotary kiln plant (evaluación de la criticidad del conocimiento y el marco de codificación para las principales actividades de mantenimiento: un estudio de caso de una planta de horno rotatorio de cemento) (2021).	2021, Reino Unido.	En este estudio se adoptaron dos métodos para priorizar las actividades de mantenimiento; uno involucró un método cualitativo tradicional para la evaluación de la criticidad de la tarea. El otro, un método cuantitativo, utilizó un sistema de inferencia Fuzzy, asignando funciones de membresía de dos entradas y salidas nítidas acompañadas de reglas Si-Entonces desarrolladas específicamente para este estudio.	Sí.
Iheukwumere-Esotu, L., Yunusa-Kaltungo.	Knowledge management and experience transfer in major maintenance activities: a practitioner's perspective (gestión del conocimiento y transferencia de experiencia en actividades de	2022, Reino Unido.	Los objetivos de este estudio son dos. En primer lugar, examinar el grado de alineación entre los hallazgos de la literatura en relación con los desafíos encontrados durante MoOST, así	Sí.

Autor(es)	Título	Año y país	Descripción	Pertinente
	mantenimiento mayor: la perspectiva de un profesional) (2022).		como investigar sus causas subyacentes en la práctica. En segundo lugar, mostrar cuán relevantes serían los hallazgos de este estudio para proporcionar una línea de base para establecer una propuesta para capturar el conocimiento de MoOST y la transferencia de experiencia. Con base en los resultados, se identificaron nueve desafíos como temas críticos, seis de los cuales estaban asociados a la gestión del conocimiento.	

Fuente. Elaboración propia.

Como se observa, cada investigación hace énfasis en un aspecto específico relacionado con el mantenimiento mayor de las refinerías, por lo que su aporte se amplía en la medida en que se complementan los aportes de cada trabajo.

A continuación, se resumen los hallazgos de los trabajos más significativos de esas investigaciones. En primer lugar, se describen dos conceptos que son transversales en varios de los hallazgos y, posteriormente, se confrontan otras contribuciones igualmente relevantes para los propósitos del presente artículo de reflexión.

4.1 Selección de estrategias de mantenimiento

El mantenimiento es un conjunto de actividades para evaluar y mantener las capacidades de los instrumentos o equipos. Sin embargo, otra tarea del mantenimiento es restaurar la maquinaria o equipo que ha perdido su función a su estado anterior. Además de los costos de mantenimiento, las paradas de planta ponen en peligro la seguridad del suministro. Dado que la planificación del mantenimiento es importante y costosa, es fundamental determinar las estrategias de mantenimiento óptimas que se aplicarán a la máquina o equipo. Determinar las estrategias de mantenimiento que se aplicarán a los equipos es una primera etapa indispensable de una planificación de mantenimiento efectiva y factible.

Existen diferentes estrategias de mantenimiento en la literatura: basado en la confiabilidad, la condición, el riesgo, preventivo, predictivo, correctivo y el mantenimiento de revisión, descritas en la tabla 2.

Tabla 2. Estrategias de mantenimiento

Nombre	Descripción
Estrategia de mantenimiento correctivo.	Permite que ocurran fallas antes de que se realice el mantenimiento. Se realiza después de una corrección o cuando se detecta una probabilidad obvia de falla. El objetivo es devolver el sistema al estado en el que puede realizar su función requerida en el mínimo tiempo posible. Se considera primitivo y no tiene en cuenta las pérdidas causadas por mal funcionamiento y fallas.
Estrategia de mantenimiento preventivo periódico.	Se realiza según periodos predeterminados o criterios previstos, para evitar el deterioro del funcionamiento. Tiene como objetivo aumentar la confiabilidad y disponibilidad al minimizar el número de fallas y eliminar el mantenimiento correctivo no planificado.
Estrategia de mantenimiento predictivo.	Su objetivo es reducir el tiempo de inactividad y los costos de mantenimiento bajo la premisa de no generar fallas al monitorear el estado operativo del equipo y predecir cuándo puede ocurrir una falla. A través de la predicción, proporciona planificación de mantenimiento para futuras fallas potenciales antes de que ocurran. Idealmente, el programa de mantenimiento se optimiza para minimizar los costos de mantenimiento y eliminar completamente la generación de fallas.
Estrategia de mantenimiento de revisión.	Involucra la implementación de cambios positivos en el diseño, método de operación, condiciones de operación, instalación, programación y métodos de mantenimiento de la máquina o equipo relevante para lograr el más alto nivel de desempeño.

Fuente. Elaboración propia, a partir de Özcan *et al.* (2021).

La primera e indispensable etapa de la planificación del mantenimiento es la selección de la estrategia de mantenimiento adecuada. Este problema de selección es un problema muy complejo debido a que las unidades del sistema tienen muchas y diferentes funciones, la obtención de los datos que reflejan el sistema es difícil y contiene muchos criterios cuantitativos y cualitativos. Kumar *et al.* (2017) evaluaron esta situación en detalle al examinar los métodos de decisión multicriterio (*multicriteria decision method* - MCDM) utilizados para la selección de la estrategia de mantenimiento. Entre los métodos de toma de decisiones multicriterio, los métodos más comúnmente utilizados para el problema de selección de estrategias de mantenimiento en la literatura son: proceso de jerarquía analítica (*analytic hierarchy process* - AHP), proceso analítico de red (*analytical network process* - ANP), técnica de orden de preferencia por semejanza a solución ideal (*technique for order of*

preference by similarity to ideal solution - TOPSIS), ponderación aditiva simple (*simple additive weighting - SAW*), elección de eliminación y traducción la realidad (*elimination et choix traduisant la réalité electre*) y solución de compromiso y optimización multicriterio (*visekriterijumska optimizacija i kompromisno resenje vikor*).

En lugar de encontrar una solución al problema de seleccionar una estrategia de mantenimiento usando solo un método de toma de decisiones multicriterio, también se puede utilizar una combinación de métodos. En este punto, los investigadores han resuelto el problema de la selección de la estrategia de mantenimiento para múltiples equipos mediante el uso de GP, uno de los métodos de toma de decisiones de criterios múltiples. En esta etapa, el problema de selección de estrategia de mantenimiento ha sido reemplazado por MSO. El método GP también se puede integrar con métodos de toma de decisiones de criterios múltiples.

Por ejemplo, Mostafa y Fahmy (2020), han determinado la estrategia de mantenimiento óptima para bombas centrífugas en una refinería de petróleo con la integración de métodos AHP y GP. El método GP ha tomado lugar en la literatura como una solución para MSO multiobjetivo para múltiples equipos; sin embargo, la presencia de más de un objetivo aumenta la complejidad del problema y genera problemas para obtener el resultado óptimo, además de que pone de manifiesto la necesidad de más datos. Debido a estas desventajas, la investigación se ha desplazado hacia la programación entera (*integer programming - IP*) como una alternativa al método GP; por ejemplo, Wessiani y Yoshio (2018), utilizaron el análisis del efecto del modo de falla y los métodos IP para determinar los costos de cada estrategia y qué implementación de mantenimiento era aplicable a cada falla.

Özcan *et al.* (2021), resolvieron el problema de optimización de la estrategia de mantenimiento (*maintenance strategy optimization - MSO*) dentro del sistema en una planta de energía por primera vez, mientras que solo se habían identificado los equipos críticos y se propusieron soluciones solo para estos equipos, con este método se obtuvo una solución para todos los equipos eléctricos de la planta. En el modelo propuesto se determinaron las estrategias óptimas de mantenimiento de 571 equipos.

Dado que el problema se maneja a nivel del sistema y la planta consta de unidades, este puede incluir equipos idénticos ubicados en distintas unidades, lo que hace que sean sometidos a diferentes procesos de mantenimiento, lo que redundaría en diferencias de desgaste entre equipos idénticos; al final, las diferencias afectan directamente la estrategia de mantenimiento para aplicar a equipos idénticos ubicados en diferentes unidades. En este estudio, el efecto del desgaste se calculó mediante AHP, que es uno de los métodos MCDM, y se reflejó en el modelo por primera vez en la literatura, con lo que se logró la consistencia de la vida real del modelo.

En la literatura se proponen modelos de objetivo único, que normalmente implican la minimización de costos, o modelos multiobjetivo que implican la minimización de tiempos de mantenimiento, costos, tiempo de inactividad, etc. En el estudio de Özcan *et al.* (2021), se propuso un modelo para reflejar las características de la vida real del sistema al expresar muchos objetivos con un solo objetivo: minimizar el tiempo de inactividad de generación del sistema. En otras palabras, el objetivo de minimizar las paradas genera un contexto que incluye un conjunto de objetivos como minimización de costos, minimización de factores de riesgo y maximización de la confiabilidad.

La integración de los métodos AHP-COPRAS-IP eliminó el problema de la subjetividad siguiendo una metodología de solución de cinco pasos. Con la solución obtenida se combinan problemas como la determinación de índices de desgaste de equipos, niveles de criticidad de equipos para la planta y determinación del valor agregado que aporta cada estrategia de mantenimiento a la planta; de esa forma se asignan estrategias de mantenimiento óptimas de acuerdo con la dinámica de la vida real del sistema.

4.2 La metodología FMEA

FMEA es un método para el análisis de confiabilidad orientado al establecimiento de un proceso sistemático que, antes de la implementación de un diseño/proceso, busca todos los problemas potenciales que pueden causar fallas y proporciona una evaluación de riesgos para que se puedan aplicar las medidas apropiadas para eliminar o reducir el riesgo de dichas

fallas (Villarini *et al.*, 2017). También, se puede describir como un método de análisis de confiabilidad destinado a identificar fallas que tienen consecuencias que afectan el funcionamiento de un sistema. Se aplica en diversas industrias, incluida la aviación, automóviles, electrónica, semiconductores y equipos médicos; también se está aplicando gradualmente en la industria de servicios, como en el comercio electrónico (Filz *et al.*, 2019).

Convencionalmente, la estimación de FMEA utiliza el cálculo del número de prioridad de riesgo (en inglés, *risk priority number* - RPN), que indica la gravedad, frecuencia de ocurrencia y detección de productos, que se muestra como

$$RPN = S \times O \times D \quad (1)$$

En esta ecuación, S mide la severidad del impacto de un modo de falla potencial en relación con la satisfacción del cliente, como la preocupación primordial y la pérdida de equipo o personal que se evalúa; la frecuencia de ocurrencia O predice la frecuencia del factor/estructura de falla; y la detección (D) detecta los factores de falla o el índice de evaluación (Battirola *et al.*, 2017).

S, O y D se califican de 1 a 10, de acuerdo con la menor o mayor gravedad, frecuencia de ocurrencia y una detección más baja. Además, el número de prioridad de riesgo (RPN) se puntúa con base en el hecho de que cuanto mayor es el RPN general, más importante es el modo de falla. Se deben tomar las medidas de mejora necesarias cuando el RPN es superior a 100 y S es mayor o igual a 8. Además, una vez que se ha abordado la falla, el RPN debe volver a calcularse para comprender mejor la reducción del riesgo relacionada y confirmar la efectividad de las correcciones realizadas. En conclusión, el RPN se aplica a menudo para identificar problemas potenciales y se puede utilizar para emprender un sistema de mantenimiento activo, de modo que el departamento de gestión pueda estar al tanto de los problemas potenciales y también hacer predicciones como las condiciones de funcionamiento del equipo (Srivastava *et al.*, 2018).

Este método fue utilizado por primera vez por expertos de la NASA en 1963 (Cervantes *et al.*, 2019). Mediante el uso de FMEA, se puede definir qué defecto se puede prevenir y si es

posible realizar alguna acción para evitar fallas accidentales. Cuando se utiliza FMEA en la metodología de mantenimiento basado en la confiabilidad RCM, puede optimizar los procedimientos de mantenimiento para reducir el tiempo de inactividad de emergencia, disminuir la duración del ciclo de mantenimiento y reducir significativamente los costos (Pérez, 2018). Entre las mejores características de FEMA se pueden mencionar acciones proactivas en lugar de reactivas para gestionar errores, fallas, defectos, etc. De hecho, FEMA es un método preventivo, lo que significa que, al usar este método, los errores potenciales pueden eliminarse antes de que se presenten.

Este método se aplica en otros países e industrias con nombres similares como *system FMEA* (SFMEA), *design FMEA* (DFMEA), *process FMEA* (PFMEA), *service FMEA* (SFMEA) y *machinery FMEA* (MFMEA) (Shahrabi y Abbas, 2014). Este método se acompaña de un proceso de ponderación a factores como gravedad, ocurrencia, capacidad de detección, procesos necesarios y unidades para realizar acciones correctivas. De hecho, el valor del número de prioridad de riesgo (RPN) como el número básico de caso de falla potencial es el resultado de la multiplicación de tres factores que incluyen la gravedad, la ocurrencia y la capacidad de detección. En la tabla 3 se presenta una guía sugerida para definir el nivel de severidad, propuesta por la norma QS9000; esta norma define las expectativas fundamentales del sistema de la calidad de Chrysler, Ford y General Motors, y de los fabricantes de camiones y otras compañías, respecto de los proveedores internos y externos de piezas para producción y servicio posventa, así como de materiales (Gruszka y Misztal, 2017).

Tabla 3. Guía sugerida para la selección del nivel de severidad

Efecto	Indicador: significancia del efecto de falla	Grado
Peligro sin preaviso.	Efecto de muy alta intensidad en la seguridad del operador, la fábrica o el personal de mantenimiento o que no cumpla con reglas estatales.	10.
Peligro con preaviso.	Efecto de alta intensidad en la seguridad del operador, la fábrica o el personal de mantenimiento o que no cumpla con las reglas estatales.	9.
Tiempo de inactividad muy largo con alta tasa de producción de fallas.	Más de 8 horas de inactividad o producción de piezas defectuosas durante 4 horas.	8.

Efecto	Indicador: significancia del efecto de falla	Grado
Tiempo de inactividad prolongado con alta tasa de producción de fallas.	Tiempo de inactividad de 4-8 horas o fallas durante 2-4 horas.	7.
Tiempo de inactividad promedio con tasa de fallas de operación.	1-3 horas de inactividad o fallas durante 1-2 horas.	6.
Bajo tiempo de inactividad con tasa de fallas de operación.	Tiempo de inactividad de ½ a 1 hora o fallas durante 1 hora.	5.
Efecto muy bajo.	Tiempo de inactividad de media hora sin fallas.	4.
Efecto insignificante.	La variación de los parámetros está fuera de control. Se necesita regulación mediante otros controles. Desempeño defectuoso.	3.
Efecto muy insignificante.	La variación del parámetro está en el rango de control. Es necesaria regulación mediante otros controles. Desempeño defectuoso.	2.
Sin efecto.	La variación del parámetro está en el rango de control. Se necesita regulación mediante otros controles. El sistema se puede comprobar durante el tiempo entre dos turnos. Desempeño defectuoso.	1.

Fuente. Elaboración propia, a partir de Shahrabi y Abbas (2014).

En la tabla 4 se presenta la guía sugerida para la selección de la frecuencia de ocurrencia.

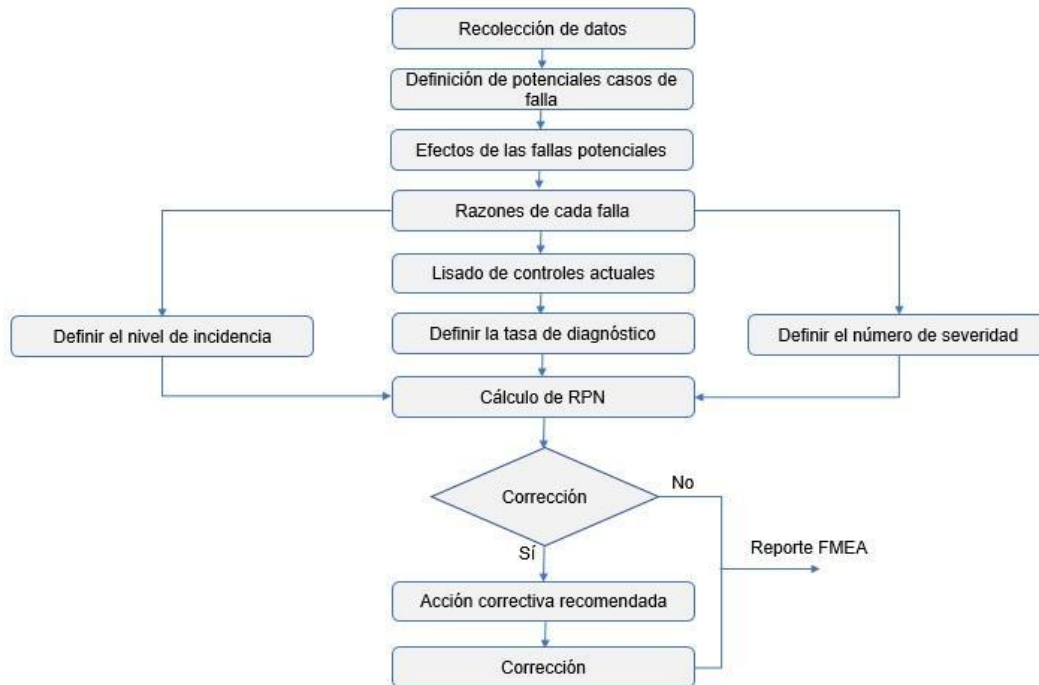
Tabla 4. Guía sugerida para la selección de la frecuencia de ocurrencia

Ocurrencia	Tasa de falla	Grado
Fallo muy alto e inevitable.	Una de cada 10 horas de operación o tiempo medio entre fallas TMEF<1 hora.	10.
	Una de cada 100 horas de operación o TMEF entre 1 y 2 horas.	9.
Fallo de alta repetición.	Una de cada 1000 horas de operación o TMEF entre 11 y 100 horas.	8.
	Una de cada 10000 horas de operación o TMEF entre 101 y 400 horas.	7.
Promedio de fallas aleatorias.	TMEF entre 401 y 1000 horas.	6.
	TMEF entre 1001 y 2000 horas.	5.
	TMEF entre 2001 y 3000 horas.	4.
Fallos bajos, relativamente bajos.	TMEF entre 3001 y 6000 horas.	3.
	TMEF entre 6001 y 10000 horas.	2.
Rara vez, muy baja probabilidad.	TMEF mayor de 10000 horas.	1.

Fuente. Elaboración propia, a partir de Shahrabi y Abbas (2014).

La siguiente figura muestra el diagrama de flujo de la ejecución de FMEA.

Figura 1. Diagrama de flujo para la ejecución de FMEA



Fuente. Elaboración propia, a partir de Shahrabi y Abbas (2014).

Para definir el nivel de severidad, ocurrencia y capacidad de detección, se debe utilizar una guía de calificación adecuada y aprobada por todos los interesados. A su vez, en la tabla 5 se presenta la guía para la selección del grado de capacidad de detección.

Tabla 5. Guía sugerida para la selección del grado de capacidad de detección

Detección	Escala: probabilidad de detección controlando el sistema	Grado
Completamente desconocido.	Los controles del sistema no pueden identificar las razones y el modo de falla, o no hay control del sistema.	10.
Muy rara vez.	Rara vez los controles encuentran razones o casos de falla.	9.
Rara vez.	Rara vez los controles del sistema encuentran razones o casos de falla. Los controles del sistema muestran posibles señales de falla.	8.
Muy baja.	Probabilidad muy baja de que los controles encuentren la razón o los casos de falla. Los controles evitan posibles fallas o paradas.	7.
Baja.	Existe una baja probabilidad de que los controles del sistema encuentren la razón o los casos de falla. Los controles del sistema evitan posibles fallas o paradas del sistema.	6.

Detección	Escala: probabilidad de detección controlando el sistema	Grado
Promedio.	Probabilidad media de que los controles del sistema encuentren la razón o los casos de falla. Los controles del sistema evitan posibles fallas. La razón del fracaso está aislada.	5.
Relativamente alta.	Probabilidad media de que los controles del sistema encuentren razón o casos de falla. Los controles evitan posibles fallas. Razón de falla aislada; es necesario un sistema de control.	4.
Alta.	Alta probabilidad de que los controles del sistema encuentren la razón o los casos de falla. Los controles del sistema evitan posibles fallas. La razón de falla es aislada; es necesario un sistema de control.	3.
Muy alta.	Probabilidad muy alta de que los controles encuentren razón o casos de falla. Es posible que el control del sistema no sea necesario.	2.
Absolutamente.	Los controles del sistema encuentran la razón o los casos de falla. Es posible que el control del sistema no sea necesario.	1.

Fuente. Elaboración propia, a partir de Shahrabi y Abbas (2014).

La técnica de FMEA tiene gran importancia para la evaluación de posibles fallas en un sistema, dado que propicia un análisis objetivo del sistema para justificar cambios, analizar modos de falla comunes y demostrar la atención a los requisitos de seguridad (Da Silva *et al.*, 2017). La técnica FMEA puede proporcionar a la empresa un medio sistemático de catalogación de información sobre las fallas; mejor conocimiento sobre los problemas en los procesos; acciones de mejora basadas en datos debidamente monitoreados; reducción de costos mediante la prevención de fallas; el beneficio de incorporar dentro de la organización la actitud de prevención de fallas, la actitud de cooperación y trabajo en equipo.

El FMEA se utiliza para identificar y eliminar fallas conocidas o potenciales para mejorar la confiabilidad y seguridad de sistemas complejos, y está destinado a proporcionar información para tomar decisiones de gestión de riesgos. Como se explicó arriba, el modo de falla se evalúa bajo los parámetros de gravedad o seriedad (S), probabilidad de ocurrencia (O) y dificultad de detección (D) del modo de falla. A continuación, las prioridades de riesgo de los modos de falla se determinan a través del número de prioridad de riesgo (RPN), que es el producto de S, O y D de una falla.

El FMEA ha demostrado su capacidad para evitar que se presenten fallas y errores en el sistema. Sin embargo, el método RPN convencional ha sido criticado en la literatura porque la conversión de puntajes es diferente para los tres factores de riesgo (S, O y D), el RPN no

puede usarse para medir la efectividad de las acciones correctivas, los tres factores de riesgo los factores (S, O y D) son difíciles de evaluar con precisión, etc. (Figuerola, 2021).

FMEA ha demostrado ser una de las técnicas preventivas de fallas en diversos campos, como la fabricación, la medicina, la ingeniería civil y la automoción. Además de RPN, una de las falencias del FMEA se relaciona con los modos de falla que faltan. Al comenzar la aplicación de este procedimiento, se requiere que los profesionales identifiquen los modos de falla y pueden faltar algunos que dificultan o limitan la eficiencia del análisis.

En segundo lugar, se requiere una lluvia de ideas para determinar los problemas, las causas y las soluciones en FMEA y la evaluación de riesgos para los modos de falla. La lluvia de ideas involucra la participación de un grupo de personas con experiencia y conocimiento; sin embargo, pueden enfrentar la limitación de la lluvia de ideas que se conoce como inercia psicológica; esta inercia se relaciona con la resistencia al cambio, ya que impide que la mente humana alcance su máximo potencial, limita la innovación y la creatividad. Esto sucede porque los límites y las restricciones tienden a aparecer en la persona cuando tiene en mente un conjunto de reglas y regulaciones (Hernández, 2019).

Las anteriores observaciones o críticas del FMEA deben tenerse en cuenta cuando se aplique de forma concreta a un caso de estudio como el presente, por lo que se deben registrar advertencias sobre las limitaciones de los resultados, con el propósito de darle mayor confiabilidad a los resultados.

5. Otros aportes sobre la planeación

Además de los anteriores resultados, en esta sección se relacionan las posiciones y recomendaciones de otros de los autores seleccionados.

Özcan *et al.* (2021) proponen la construcción de un indicador denominado programación entera (en inglés, *integer programming* - IP). Se trata de un complejo concepto que se

construye mediante ecuaciones matemáticas; cuando se evalúan los resultados del modelo matemático generado por el método IP, se observa que, si el nivel de criticidad del equipo es mayor a 85, se deben aplicar todas las estrategias de mantenimiento, excepto el correctivo. Esto significa que, si el equipo es crítico para el sistema, se debe realizar la revisión, el mantenimiento periódico y predictivo sin esperar la falla del equipo. Esto se debe a que cuando estos equipos fallan; la unidad se apaga y pone en peligro la seguridad del suministro de energía.

Por su parte, Ali y Abdelhadi (2022) emplean otro modelo, también matemático, al que denominan mantenimiento basado en la condición (en inglés, *condition-based maintenance* - CBM), el cual se puede utilizar para administrar de manera efectiva las operaciones y el mantenimiento mediante el monitoreo de información detallada sobre el estado de la máquina. De acuerdo con las conclusiones de esa investigación, para poder utilizar ese indicador todavía hay mucho más que se puede hacer. Esto incluye rezagos en la arquitectura abierta, aplicaciones móviles limitadas, barrera en los sectores de industria a industria, censos limitados en una plataforma CBM única, etc.

El trabajo de Shou *et al.* (2018) se refiere al modelado de información de construcción (en inglés, *building information modelling* - BIM), que es un método para crear, compartir, intercambiar y administrar la información a lo largo del ciclo de vida del proyecto entre todas las partes interesadas. A su vez, un modelo BIM de cuatro dimensiones (4D) resulta de la vinculación del modelo 3D a la cuarta dimensión del tiempo. En el modelo 4D, los aspectos temporales y espaciales del proyecto están inextricablemente vinculados, como lo están durante el proceso de construcción real. En la etapa de elaboración del proyecto, 4D BIM es útil para comunicar y validar los planes y procesos de construcción, mientras que, durante la fase de construcción, son útiles para identificar errores en la lógica del cronograma, posibles conflictos espaciotemporales y problemas de accesibilidad.

El objetivo principal de este nivel de simulación BIM 4D es involucrar de manera efectiva a los equipos principales, es decir, operaciones, mantenimiento e integridad, para revisar el alcance del proyecto. Si el alcance no se alinea con el plan inicial, se deben realizar trabajos

adicionales, como la revisión de los planes, antes de pasar a la siguiente etapa. De acuerdo con los resultados de ese trabajo, en los próximos años se revisarán y probarán tecnologías avanzadas como banda ultra ancha, fotogrametría, escaneo láser e internet de las cosas en un entorno de rotación de planta para el seguimiento de la actividad de mantenimiento.

Otra visión es la de El Werfalli (2019), quien considera que los equipos de las plantas de gas están permanentemente sujetos a inspección y mantenimiento durante el cierre total de las instalaciones de la planta para ejecutar el evento *turnaround maintenance* (TAM), es decir, la parada de planta. El aporte de esa investigación está en el desarrollo del modelo TAM, que consta de cuatro etapas. Primera etapa: eliminación de equipos no críticos (NE) del alcance del trabajo (SoW) de TAM a estrategias de mantenimiento proactivo. Segunda etapa: seleccionar equipos estáticos críticos (CSE) que constituyen el riesgo más alto con base en la inspección basada en el riesgo (RBI). Tercera etapa: seleccionar equipos rotativos críticos (CRE) que constituyan el riesgo más alto de la falla basada en el riesgo (RBF). Cuarta etapa: definiendo la duración y el intervalo óptimos de TAM en función de las distribuciones de fallas (FD).

A pesar de sus ventajas, El Werfalli (2019) reconoce que este modelo se desarrolla e implementa a través de la estrategia TAM de plantas de gas, por lo que puede necesitar algunos ajustes para utilizar otros indicadores de los KPI; así mismo, no se puede implementar en plantas cuyos equipos sean redundantes, además de que su implementación se enfoca en los registros de fallas de los CSE y CRE que operan continuamente bajo condiciones severas de operación. Por lo tanto, el modelo TAM puede necesitar un ajuste en la etapa IV para aplicar otras distribuciones debido a la diferencia en los parámetros de forma y escala resultantes de presiones excesivas y temperaturas fluctuantes.

Entre tanto, Iheukwumere y Yunusa (2020) plantean que industrias como la del petróleo dependen, en gran medida, de un tipo distinto de actividades de mantenimiento a gran escala realizadas en una instancia conocida como revisiones mayores, interrupciones, paradas y cambios (en inglés, *major overhauls, outages, shutdowns, and turnarounds* - MoOST) para el buen funcionamiento de los activos físicos, dado que esas actividades son las de

mantenimiento más grandes en términos de criticidad, costo y tiempo. Los autores prevén que el enfoque que ellos presentan ofrece contribuciones útiles en industrias de ese tamaño y los sectores comerciales más grandes. Se planean trabajos futuros para abarcar otros sectores clave, así como considerar alternativas apropiadas que consideren la faceta completa de MoOST en términos de tareas y conocimientos asociados, con el propósito de desarrollar un modelo de gestión del conocimiento y transferencia de experiencia específico para MoOST, que constituye un paso necesario hacia un marco sistemático, pero sostenible para la retención del conocimiento tácito.

Ahora bien, es bien sabido que esta industria del petróleo también involucra riesgos tanto para la seguridad como para la salud de quienes se encargan de su operación y mantenimiento; el análisis de esos riesgos fue el motivo que llevó a Srivastava *et al.* (2018) a desarrollar su investigación sobre la mitigación del riesgo utilizando un enfoque difuso FMEA basado en reglas, en el que advierten que el petróleo es un uso importante de la fuente de energía como parte esencial de la sociedad moderna, y será una fuente principal de energía y potencia durante las próximas décadas. Por lo tanto, se debe priorizar la toma de medidas para controlar la gestión de la contaminación por el uso de petróleo y petroquímicos. Además, la capacidad del medioambiente para absorber los materiales de desecho vertidos y los recursos naturales también son limitados.

El estudio observó que existen herramientas potenciales que deberían considerarse seguras para mitigar los riesgos de seguridad y salud de las refinerías de petróleo, estos incluyen medidas para reducir los derrames, falsos pisos para evitar el goteo de gasolina en el nivel freático y buques cisterna de doble casco. La revisión encontró una tecnología relativamente nueva que puede mitigar la contaminación del aire llamada biofiltración. La biofiltración es donde los gases de escape que tienen sustancias orgánicas volátiles biodegradables o toxinas inorgánicas del aire se ventilan a través de un material biológicamente activo. También descubrió que la tecnología se utiliza con éxito en varios países y, de hecho, es crucial en Bangladesh, donde las contaminaciones de las industrias de refinería de petróleo son los temas candentes en la agenda activista ambiental. El hallazgo del estudio ayudará a

comprender los impactos de la refinería de petróleo en el medio ambiente y, por lo tanto, es necesario tomar medidas para reducir la degradación ambiental.

Por último, Kaveh y Esmaeeli (2021), proponen un modelo de dinámica de sistemas para evaluar las capacidades de las empresas en la subcontratación de mantenimiento y analizar la rentabilidad de dicha subcontratación, reconocen que existen múltiples razones para hacerlo y que los proveedores de servicios de *outsourcing* a menudo prometen menores costos y mayor confiabilidad en las compras. Un contrato debe basarse en la confiabilidad garantizada y costos más bajos, existen ejemplos exitosos de subcontratación de mantenimiento que pueden ser adecuados para muchas organizaciones.

Sin embargo, solo han considerado la subcontratación del mantenimiento, sin prestar atención a motivos de confiabilidad. Los contratos de externalización, que se basan en la externalización total del mantenimiento, a menudo se centran en reducir los costos de mantenimiento en lugar de mejorarlo. Además, el razonamiento depende de los ahorros que se puedan alcanzar en la gestión de los costos. Por lo tanto, los proveedores de servicios suelen necesitar sistemas de gestión del trabajo más adecuados para reducir los costos totales de mano de obra y administración; en la actualidad, este objetivo se considera un desafío importante debido a la escasez de mano de obra calificada, especialmente en industrias como la del petróleo.

Considerando la necesidad de investigar estas variables para alcanzar la eficacia, eficiencia y rentabilidad de los equipos deseados en la subcontratación de mantenimiento, Kaveh y Esmaeeli (2021), consideraron los efectos de las variables entre sí en el enfoque de sistema dinámico, además de los factores que afectan la eficiencia, eficacia y rentabilidad de los equipos. Después de hacer simulaciones con diferentes escenarios, concluyeron que los administradores deben seleccionar un escenario, de acuerdo con el costo de los equipos, además del impacto de estos en el costo de las averías y reparaciones; dado que se trata de variables que cambian en cada país y son diferentes, así que esos modelos se deben construir localmente.

6. Discusión y conclusión

El proceso de investigación desarrollado permitió hacer un recorrido a través de publicaciones originadas en diferentes países, todas ellas relacionadas con múltiples aspectos involucrados en el mantenimiento mayor de las plantas de refinación de crudo. Un elemento coincidente en varias de esas publicaciones es el interés por reducir la frecuencia de mantenimientos de ese alcance, debido a que implican tanto costos directos en mano de obra especializada y materiales, como en costos por el lucro cesante que generan paradas prolongadas y por los efectos que ocasionan en la autonomía energética de un país y en la economía en general. Sin embargo, ese interés de evitar las paradas de planta debe balancearse frente al riesgo que se incurre por el deterioro acelerado de los equipos, que puede hacer que, a la larga, el efecto generado sea contrario al que se busca.

Otro elemento frecuente en los diferentes trabajos se relaciona con la utilización de diferentes herramientas o modelos matemáticos desarrollados y probados en diferentes países, los cuales tienen como objetivo común la búsqueda de criterios orientadores para la optimización de la programación de esas paradas de planta. Términos como MoOST, TAM, FMEA, IP, CBM y otros más han sido objeto de investigaciones teóricas y empíricas, cada vez más complejas. Esta frecuente utilización de algoritmos matemáticos indica que los directivos de las áreas de mantenimiento están llamados a ser cada vez más competentes en el empleo de herramientas matemáticas y de programas asociado a ellas, como requisito para ser más competentes en su profesión. Si bien los conocimientos estrictamente técnicos siguen siendo indispensables, esas habilidades matemáticas, que también son la base de la ingeniería en general, deben ser promovidas por las facultades de pregrado y postgrado que forman a estos profesionales.

Por último, una tercera conclusión indica que las tecnologías de la información y las comunicaciones también han ido ganando terreno en las actividades de programación de planes de mantenimiento de plantas petroleras. Las tecnologías de banda ancha, los equipos de telemedida y programas para el procesamiento de esas variables son otro terreno que debe ser mejor comprendido, lo que abre las puertas a los tecnólogos e ingenieros

electrónicos que se necesitan para implementar aquellos componentes que permiten el monitoreo de los equipos de las plantas petroleras.

Además de esas conclusiones, se puede agregar que los temas ambientales y de seguridad industrial también han avanzado de manera paralela a los estrictamente técnicos propiamente dichos. En síntesis, una gestión de categoría mundial en la administración de los proyectos de mantenimiento mayor de las plantas petroleras, así como en otros sectores industriales, demandan profesionales cada vez mejor capacitados y con una mentalidad más abierta a la adquisición acelerada de conocimientos, si se tiene en cuenta que la globalización y las tecnologías han facilitado la adquisición de información. Sin embargo, para que esa información se convierta en conocimiento útil, se requiere de criterio profesional, que es un nivel de análisis que los robots aún no han logrado emular de forma suficientemente confiable.

7. Referencias

- Abdallah, L. & El-Shennawy, T. (2019). Improving energy efficiency in electric systems in oil refineries: economical and environmental evaluation. *EPRI*, 1-5.
- Ali, A. & Abdelhadi, A. (2022). Condition-based monitoring and maintenance: state of the art review. *Applied Sciences*, 12(2), 688. <https://doi.org/10.3390/app12020688>
- Amik, S. (2019). Mantenimiento de gestion, revision de la literatura y las direcciones. *Revista de la Calidad en Ingeniería de Mantenimiento*, 12(3), 205-238.
- Andrade, D. (2019). *Análisis de la seguridad energética en la cadena de suministro del petróleo y los combustibles líquidos en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.
- Battirola, J., Piechnicki, F., Rocha, E. & Portela, E. (2017). Process-aware FMEA framework for failure analysis in maintenance. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 28(6), 822-848. <https://doi.org/10.1108/JMTM-11-2016-0150>
- Bressi, S., D'Angelo, G., Santos, J. & Giunta, M. (2018). Environmental performance analysis of bitumen stabilized ballast for railway track-bed using life-cycle assessment. *Construction and building materials*, 188, 1050-1064. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.175>

- Calvo, C. (2020). Técnica de gamma scanning para el diagnóstico en operación, de equipos de refinación de petróleo y gas natural. *Perfiles de Ingeniería*, 16(16), 65-75. https://doi.org/10.31381/perfiles_ingenieria.v20i15.3546
- Cervantes, M., Pali, R. & Zavala, J. (2019). Aplicabilidad de la criticidad en el mantenimiento de equipos. *Project Design and Management*, 1, 33-48. [10.35992/mlspdm.v1i1.168](https://doi.org/10.35992/mlspdm.v1i1.168)
- Corredor, G. (2018). Colombia y la transición energética. *Ciencia Política*, 13(25), 107-125. <https://doi.org/10.15446/cp.v12n25.70257>
- Cullum, J., Binns, J., Lonsdale, M., Abbassi, R. & Garaniya, V. (2018). Risk-based maintenance scheduling with application to naval vessels and ships. *Ocean Engineering*, 148, 476-485. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.11.044>
- Da Silva, G., García, J. & Chiari, E. (2017). Limitações da ferramenta FMEA: estudo de suas aplicações em uma empresa do segmento automotivo. *Revista Brasileira Multidisciplinar*, 20(2), 69-79. <https://doi.org/10.25061/2527-2675/ReBraM/2017.v20i2.540>
- Decker, R. B. (1998). Impacto en los modelos de optimización en la toma de decisiones de mantenimiento. *Ingeniería de Fiabilidad y Seguridad del Sistema*, 60(2), 111-119.
- El Werfalli, A. (2019). *Optimising turnaround maintenance (TAM) scheduling of gas plants in Libya*. University of Bradford.
- Figuerola, J. (2021). *Aumento de confiabilidad y eficiencia en el departamento de diseño de producción de una empresa productora de arneses*. Universidad de Sonora, México.
- Filz, M., Bernhard, J., Herrmann, C. & Thiede, S. (2019). Data-driven failure mode and effect analysis (FMEA) to enhance maintenance planning. *Computers in Industry* 129, 103451. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103451>
- García, F. (2020). *Método para la revisión sistemática de literatura*. Universidad de Salamanca.
- Gruszka, G. & Misztal, A. (2017). The new IATF 16949: 2016 standard in the automotive supply chain. *Research in Logistics & Production*, 7(4), 311-318. <https://doi.org/10.21008/j.2083-4950.2017.7.4.3>
- Gudynas, E. (2018). Los nudos del petróleo en Colombia: ambiente y ciencia, política y democracia. *Palabras al Margen*, 122, 22-31.
- Hernández, C. (2019). *Propuesta de proceso de cambio sociotécnico en una empresa de acumuladores de energía para la producción de acumuladores de ion-litio*. Universidad del Valle.
- Iheukwumere, L. & Yunusa, A. (2020). Assessment of barriers to knowledge and experience transfer in major maintenance activities. *Energies*, 13(7), 1-24. <https://doi.org/10.3390/en13071721>
- Iheukwumere, L. & Yunusa, A. (2021). Knowledge criticality assessment and codification framework for major maintenance activities: A case study of cement rotary kiln plant. *Sustainability*, 13(9), 1-21. <https://doi.org/10.3390/su13094619>

- Iheukwumere, L. & Yunusa, A. (2022). Knowledge management and experience transfer in major maintenance activities: a practitioner's perspective. *Sustainability*, 14(1), 1-26. <https://doi.org/10.3390/su14010052>
- Islam, M. & Mostafa, M. (2021). Environmental hazards of petroleum refinery in Bangladesh: a review. *Petroleum and Chemical Industry International*, 4(1), 15-21. [10.33140/PCII.04.01.03](https://doi.org/10.33140/PCII.04.01.03)
- Kaveh, H. & Esmaeeli, H. (2021). A system dynamics model for evaluating the firms' capabilities in maintenance outsourcing and analyzing the profitability of outsourcing. *Scientia Iranica*, 1-30. [10.24200/SCI.2021.55108.4080](https://doi.org/10.24200/SCI.2021.55108.4080)
- Kumar, A., Sah, B., Singh, A., Deng, Y., He, X., Kumar, P. & Bansal, R. (2017). A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 596-609. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.191>
- López, F. (2020). *Optimización de las operaciones en el mantenimiento correctivo de motores síncronos en la refinería Ecopetrol de Barrancabermeja para el año 2020*. Unidades Tecnológicas de Santander.
- Medenou, D., Fagbemi, L., Houessouvo, R., Jossou, T., Ahouandjinou, M., Piaggio, D. & Pecchia, L. (2019). Medical devices in sub-Saharan Africa: optimal assistance via a computerized maintenance management system (CMMS). *Benin. Health and Technology*, 9(3), 219-232. <https://doi.org/10.1007/s12553-018-00283-3>
- Mejía, M., Serpa, A., Concepción, A., Ledo, L. y Cabero, J. (2018). Evaluación de los contenidos de ingeniería de mantenimiento en la formación del ingeniero eléctrico en el Instituto Tecnológico de Santo Domingo. *IJERI: International Journal of Educational Research and Innovation*, (10), 108-125. <https://www.upo.es/revistas/index.php/IJERI/article/view/3468>
- Mostafa, M. & Fahmy, S. (2020). Maintenance strategy selection using AHP: a case study in the oil and gas industry. *2020 IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*, 1049-1053. [10.1109/ICIEA49774.2020.9101952](https://doi.org/10.1109/ICIEA49774.2020.9101952)
- Nematpour, M., Sheikhdavoodi, M., Hazbavi, I. & Marzban, A. (2020). Optimization of refinement operations of sugarcane harvester hydraulic oil. *Journal of Agricultural Machinery*, 59-72.
- Nematpour, M., Sheikhdavoodi, M., Hazbavi, I. & Marzban, A. (2021). Economical assessment of replacing and refining methods of hydraulic oil of sugarcane harvesters in sugarcane cultivation industry of Khuzestan. *Journal of Agricultural Machinery*, 111-122. <https://doi.org/10.22067/jam.v11i1.76542>
- Özcan, E., Yumuşak, R. & Eren, T. (2021). A novel approach to optimize the maintenance strategies: a case in the hydroelectric power plant. *Eksploracja i Niezawodność*, 23(2), 324-337. <https://doi.org/10.17531/ein.2021.2.12>
- Pérez, J. (2018). *Propuesta de mantenimiento centrado en confiabilidad en el área de reacción Proquiver, S. A. DE C. V.* Universidad Veracruzana.
- Perry, G. (2019). *El petróleo en la economía colombiana*. Fedesarrollo.

- Shahrabi, F. & Abbas, A. (2014). Application of FMEA and AHP in Lean maintenance. *International Journal of Modern Engineering Sciences* 3, 61-73.
- Shou, W., Wang, J. & Wang, X. (2018). 4D BIM for improving plant turnaround maintenance planning and execution: a case study. *ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction* 35, 1-8.
- Srivastava, P., Khanduja, D. & Agrawal, V. (2018). Mitigation of risk using rule based fuzzy FMEA approach. *8th international conference on cloud computing, data science & engineering (Confluence)*, 26-30. [10.1109/CONFLUENCE.2018.8442498](https://doi.org/10.1109/CONFLUENCE.2018.8442498)
- Villarini, M., Cesarotti, V., Alfonsi, L. & Introna, V. (2017). Optimization of photovoltaic maintenance plan by means of a FMEA approach based on real data. *Energy Conversion and Management*, 152, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.090>
- Wessiani, N. & Yoshio, F. (2018). Failure mode effect analysis and fault tree analysis as a combined methodology in risk management. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 337(1), 120-132. [10.1088/1757-899X/337/1/012033](https://doi.org/10.1088/1757-899X/337/1/012033)
- Zeinalnezhad, M., Chofreh, A., Goni, F. & Klemeš, J. (2020). Critical success factors of the reliability-centred maintenance implementation in the oil and gas industry. *Symmetry*, 12(10), 15-32. <https://doi.org/10.3390/sym12101585>