

Desarrollo de una propuesta basada en la metodología PMO para las unidades de bombeo mecánico de extracción de crudo.

Niyiseth Ruiz Llorente

89975

Jackson José Carrero Moreno

89219

Michael Liroy Carrillo Sierra

91369

Asesor

Msc. Ing. Miguel Ángel Urián Tinoco

Especialización en Gerencia de Mantenimiento

Dirección de Posgrados

Universidad ECCI

Bogotá D.C. Junio, 2020

Desarrollo de una propuesta con base en la metodología PMO para las unidades de bombeo mecánico de extracción de crudo.

Trabajo presentado para optar al título de especialistas en Gerencia de Mantenimiento

Niyiseth Ruiz Llorente

89975

Jackson José Carrero Moreno

89219

Michael Liroy Carrillo Sierra

91369

Especialización en Gerencia de Mantenimiento

Dirección de Posgrados

Universidad ECCI Bogotá D.C.

Junio, 2020

Hoja de jurados

Dedicatoria

Llena de felicidad, de amor y esperanza dedico este proyecto a quienes han sido mi motor
en la vida;

A Dios por permitirme vivir esta grandiosa experiencia de aprendizaje,

A mis padres Ana Llorente y Wilson Ruiz por ser mi polo a tierra.

A mi Ángel terrenal por su apoyo incondicional.

Es para mí una satisfacción inmensa dedicarles mis triunfos y hacerlos partícipes de mis
logros.

Niyiseth Ruiz.

A mis padres, mi esposa, que son el motor principal en mi vida,

A Papito Dios por todas las bendiciones recibidas

Michael Carrillo.

A Marco Aurelio el ultimo estoico,

A Colombia por dar mucho más de lo que esperaba.

Jackson J. Carrero. M

Agradecimientos

A todos los docentes por sembrarnos la semilla del conocimiento y que a lo largo de esta especialización generaron un espacio idóneo para nuestro aprendizaje, quiero agradecer de manera puntual a los profesores Miguel Urian Tinoco y María Gabriela Ramos por su constante motivación y realización de este trabajo de grado. Así como a mis colegas y compañeros de clase que nos recordaron el valor de la amistad y la importancia del trabajo en equipo, ¡Gracias! mis 6 elementos.

Glosario

UBM: Unidad de bombeo mecánico.

PMO: Optimización del mantenimiento planeado.

RCM: Mantenimiento centrado en confiabilidad.

CBM: Mantenimiento basado en la condición.

FDS: Fuera de servicio.

Especialidad: Se refiere a un tipo de trabajo específico, se contemplan las especialidades de mecánica, electricidad, instrumentación, control y CBM.

Tipos de Mantenimiento: Son aquellos mantenimientos principales, se contemplaron el correctivo, preventivo y el predictivo.

Auditoría de Mantenimiento: Se refiere a la comprobación de la gestión del proceso de mantenimiento con la ejecución de una de cuestionarios sistemáticos.

Metodología: Es el conjunto de métodos o pasos a seguir en el desarrollo de una serie de actividades, con un fin específico.

Normatividad: Se conoce como el conjunto de leyes, Decretos o lineamientos a seguir, que son regidos por una serie de conductas en pro de las buenas prácticas.

Optimización: Se define como la determinación de variables de un proceso o sistema en búsqueda del mejor resultado posible.

Plan de Mantenimiento: Es una serie de rutinas sugeridas sistemáticamente por 3 variables fundamentales: manual del fabricante, estándares de mantenimiento según el tipo de equipo y el análisis de fallos potenciales.

Pin Crank: Es la Unión mecánica entre la biela y la manivela.

Taxonomía: Es la identificación clasificación y orden que se atribuyen a los equipos con características comunes.

Modo de Falla: Es la forma en la cual se puede evidenciar la falla parcial o total de un ítem a mantener.

Frecuencia: Es el número de veces que se repite, que sucede o se realiza una acción durante un período de tiempo establecido.

Introducción

El mantenimiento, se ha consolidado como un eje fundamental de la industria; con el pasar del tiempo ha dejado de percibirse como un gasto y se ha tornado como una inversión de ayuda a las organizaciones, dado que se ha demostrado la importancia de su implementación con el objetivo primordial de mantener los equipos, máquinas e instalaciones; sin embargo, los cambios constantes, la creciente demanda ha obligado a las organizaciones no solo a contar con un área de mantenimiento sino a establecer estrategias que permitan estar a la vanguardia y garanticen la vida útil de los activos.

El presente trabajo se basa en la propuesta de un PMO (Optimización del Mantenimiento Planeado), para las Unidades de Bombeo Mecánico de extracción de crudo con lo cual se pretende perfeccionar la gestión de mantenimiento actual, definiendo unas actividades y/o tareas que garanticen la disponibilidad y confiabilidad de los equipos al momento de requerir su operación, al menor costo posible, de igual forma se pretende con la implementación de la estrategia, disminuir los mantenimientos correctivos y las pérdidas de producción de crudo por paradas no programadas.

Resumen

Dos tercios de los pozos a nivel mundial son operados por medio de Bombeo Mecánico, lo que hace relevante el hecho de mantener las UBM asociadas a la consecución y producción del crudo, el presente proyecto se desarrolla en un Campo A.

Se analizaron 692 Unidades aproximadamente, las cuales presentan un número de fallos y averías constantes que impulsaron el proyecto de una propuesta de mantenimiento basada en un PMO; para el desarrollo, inicialmente se elaboró y ejecutó una consultoría interna, de tal manera que se pudiese conocer la situación actual del departamento de mantenimiento y las desviaciones del mismo, para con ello establecer una metodología de mantenimiento, y por ultimo y teniendo en cuenta la estrategia escogida, definir unas actividades que garanticen la disponibilidad de los equipos y la progreso continuo de la gestión del mantenimiento.

Palabras Claves

Mantenimiento, PMO, Auditoría, Actividades, UBM.

Abstract

Two thirds of the wells worldwide are operated by means of Mechanical Pumping, which makes it relevant to maintain the BMU associated with the procurement and production of crude oil, this project is being developed in Field A.

Approximately 692 Units were analyzed, which present a number of constant failures and breakdowns that prompted the project of a maintenance proposal based on a PMO; For the development, initially an internal consultancy was prepared and executed, so that the current situation of the maintenance department and its deviations could be known, in order to establish a maintenance methodology, and finally and taking into account the chosen strategy, define activities that guarantee the availability of equipment and the continuous progress of maintenance management.

Keywords

Mechanical pumping equipment, corrective maintenance, oil, failures,

Contenido

1	Título de la Investigación.....	17
2	Problema de investigación	17
2.1	Descripción del problema	17
2.2	Planteamiento del problema.....	18
2.3	Sistematización del problema	18
3	Objetivos de la Investigación	18
3.1	Objetivo general.....	18
3.2	Objetivos específicos	19
4	Justificación y delimitación.....	20
4.1	Justificación	20
4.2	Delimitación.....	21
4.3	Limitaciones.....	22
5	Marco conceptual	22
5.1	Estado del arte.....	22
5.1.1	Estado del arte internacional.....	22
5.1.2	Estado del arte nacional	25
5.2	Marco Teórico.....	29
5.2.1	Metodología RCM.....	29

5.2.2	Tipos de mantenimiento	34
5.2.3	Beneficios del RCM	35
5.2.4	Indicadores de mantenimiento.....	36
5.2.5	PMO, la optimización del mantenimiento planeado.	38
5.3	Marco normativo/legal.....	44
5.4	Marco Histórico	46
6	Marco metodológico	48
6.1	Recolección de la información	48
6.1.1	Tipo de investigación	48
6.1.2	Fuentes de obtención de la información.....	48
6.1.3	Herramientas.....	49
6.1.4	Metodología.....	49
6.1.5	Información recopilada.....	50
6.2	Análisis de la información	63
6.2.1	Hoja de Vida.....	63
6.2.2	Taxonomía	64
6.2.3	Modos de Falla	64
6.2.4	Auditoría de mantenimiento	66
6.3	Propuesta(s) de solución	67

7	Impactos esperados/generados	75
8	Análisis financiero.....	75
9	Conclusiones y recomendaciones.....	78
9.1	Conclusiones	78
9.2	Recomendaciones	79
10	Bibliografía.....	81

Listado de Tablas

Tabla 1. Marco normativo aplicable a UBM.....	44
Tabla 2. Taxonomía de equipos.....	52
Tabla 3. Evaluación de auditoría – Organigrama de mantenimiento	56
Tabla 4. Evaluación de auditoría – Rendimiento del personal de mantenimiento	56
Tabla 5. Evaluación de auditoría – Medios técnicos	58
Tabla 6. Evaluación de auditoría- Mantenimiento preventivo	59
Tabla 7. Evaluación de auditoría – Organización del mantenimiento.....	60
Tabla 8. Evaluación de auditoría - Procedimiento	60
Tabla 9. Evaluación de auditoría – Análisis de Software.....	61
Tabla 10. Evaluación de mantenimiento – Stock de repuesto.....	63
Tabla 11. Plan de mantenimiento inicial	68
Tabla 12. Plan de mantenimiento Propuesto.	74
Tabla 13. Plan Mtto inicial Vs. Plan Mtto Propuesta.	76
Tabla 14. Ahorros en \$COP x Número de Pozos	77
Tabla 15. Ahorros en \$COP sí falla el 10% de las UBM.	78

Listado de Ilustraciones

Ilustración 1. Hoja de Vida de UBM.....	51
Ilustración 2. Taxonomía de equipos.....	64
Ilustración 3. Horas de Mantenimiento para una UBM.	76
Ilustración 4. Plan Mtto Inicial Vs. Plan Mtto Propuesto en \$COP por año.....	77

Listado de Gráficos

Gráfico 1. Modos de falla - Control	53
Gráfico 2. Modos de fallo - Mecánica	54
Gráfico 3. Modos de fallo.....	55
Gráfico 4. Modos de fallo por especialidad.....	65
Gráfico 5. Diagrama de Pareto- modos de falla	66
Gráfico 6.Resultados de auditoría.	67

1 Título de la Investigación

Desarrollo de una propuesta basada en la metodología PMO para las unidades de bombeo mecánico de extracción de crudo.

2 Problema de investigación

2.1 Descripción del problema

Desde el año 1536 cuando se conoció la existencia del petróleo en Colombia, ha sido un tema de conmociones por todo lo que se genera alrededor de él, sin embargo, no se puede obviar que es el eje principal de la economía actualmente, siendo el primer producto de exportación con el 55.4% de las exportaciones totales a nivel nacional, y por tanto el principal contribuyente a las finanzas del país.

Es por lo anterior que los equipos asociados a la producción y consecución del crudo tienen gran importancia, por consiguiente, el mantenimiento asociado a los mismos es vital para su óptimo funcionamiento, y sobre todo garantizar la producción en los yacimientos establecidos.

Uno de los métodos más eficaces y más antiguos es el bombeo mecánico y es precisamente el equipo asociado a esta investigación por la jerarquía del mismo en el proceso de extracción de crudo, en la actualidad se desarrolla una estrategia de mantenimiento para las unidades de bombeo mecánico, en adelante UBM, en la extracción de crudo pesado, este es uno de los métodos más utilizados en el mundo cubriendo entre el 80% y 90% de la

Comentado [MAUT1]: listo

demanda actual. Por el tiempo de utilización del activo se vienen presentando daños permanentes y catastróficos e inducción a fallas por causa de su operación. Motivo por el cual surge la necesidad de realizar una actualización a la estrategia presente de mantenimiento, buscando que la aplicación del plan de mantenimiento sea más costo – efectiva y por tanto derive mejores resultados a nivel de confiabilidad y disponibilidad de las UBM.

2.2 Planteamiento del problema

Comentado [MAUT2]: listo

¿Es la metodología PMO (Optimización de Mantenimiento Planeado) la más adecuada para mejorar la confiabilidad y disponibilidad de las unidades de bombeo mecánico?

2.3 Sistematización del problema

Comentado [MAUT3]: Listo

¿Cómo se realiza actualmente el mantenimiento de las UBM del campo en estudio?

¿Qué metodología de mantenimiento se aplica a las UBM del campo?

¿Es la metodología basada en mantenimiento preventivo y correctivo la adecuada para que las unidades de bombeo mecánicas del campo en estudio cuenten con la disponibilidad requerida para la producción del crudo?

3 Objetivos de la Investigación

3.1 Objetivo general

Desarrollar una propuesta basada en la metodología PMO para las unidades de bombeo mecánico de extracción de crudo.

3.2 Objetivos específicos

- Diagnosticar la situación actual de las unidades de bombeo mecánico mediante una auditoría interna de mantenimiento.
- Establecer las metodologías de mantenimiento aplicables a las unidades de bombeo mecánico y la normatividad relacionada con el fin de soportar la optimización del plan de mantenimiento preventivo y predictivo, para ordenar y estandarizar el plan de mantenimiento actual.
- Definir las actividades para la realización de un plan de mantenimiento aplicando la metodología PMO.

4 Justificación y delimitación

4.1 Justificación

En la actualidad uno de los equipos más importantes a mantener es la bomba de subsuelo de acción recíproca, esta unidad de bombeo mecánico requiere un mantenimiento muy riguroso. Dada la extensión y el número de unidades que requieren mantenimiento en estos campos, se emplean diariamente gran cantidad de recursos, horas hombre, repuestos y materiales para garantizar que se cumpla su función principal de succión y transferencia de crudo hasta la superficie.

El operador de los campos deja esta tarea a un experto en mantenimiento de activos, a través de un contrato macro de mantenimiento el cual incluye los equipos de superficie, para este activo se enfocará todo el estudio en proceso de extracción. El contratista necesita cumplir los requerimientos expuestos por el cliente buscando la mejor manera de realizar una actividad cumpliendo con los estándares de desempeño, en menor tiempo y con la menor cantidad de recursos posibles.

En la búsqueda de mejorar la estrategia de mantenimiento para las unidades de bombeo mecánico se quiere reducir el esfuerzo físico para la realización de las tareas, por ejemplo, el ajuste de torque de Pin Crank. Lo anterior pensando en el bienestar del personal técnico que día a día ejecuta esta actividad, se realizarán acciones de capacitación a los colaboradores con el fin de afianzar el compromiso social que tiene la organización y mejorando la economía de un buen número de familias que se ven beneficiadas por una

participación mayoritaria en la contratación de mano de obra 100% local, en este caso específico en la zona de influencia.

La optimización del plan de mantenimiento actual para las UBM traerá varios beneficios para todos los que participan en el manejo de grandes herramientas, será realizado de manera práctica con la ayuda hidráulica y mecánica, aportando al proceso y evitando lesiones, o enfermedades relacionadas con el trabajo (SST), adicionalmente la reducción de tiempos será significativa para la empresa y se podrán emplear estos recursos en tareas más específicas.

4.2 Delimitación

La investigación será desarrollada como ejercicio académico en el escenario de mantenimiento al sector Oil & Gas, el tema a estudiar es la optimización de plan de mantenimiento para las UBM de un campo de yacimientos petrolífero. La ubicación geográfica del campo es en Colombia en la región conocida como el Magdalena medio. El periodo en el cual será desarrollada la investigación es entre los meses de febrero y agosto del año 2020.

4.3 Limitaciones

Documental: El acceso a la información es limitado, solo se cuenta con los datos suministrados por los manuales de los equipos.

Presupuestal: Para el progreso de la investigación, solamente se cuenta con los recursos propios de los proponentes.

Normativa: La empresa en la que se adelanta la presente investigación no admite hacer alusión al nombre, pozos, y especificaciones que se refieran a ella dentro del documento.

5 Marco conceptual

5.1 Estado del arte

5.1.1 Estado del arte internacional.

5.1.1.1 Propuesta de mantenimiento basada en confiabilidad de las unidades de bombeo horizontal multietapas del sistema Power Oil de las estaciones Atacapi del B57-LI de Petroamazonas EP

En el año 2017, Ángel Vinicio Castillo Santillán, desarrolló una investigación titulada: “*Propuesta de mantenimiento basada en confiabilidad de las unidades de bombeo horizontal multietapas del sistema Power Oil de las estaciones Atacapi del B57-LI de Petroamazonas EP*” para obtener su título de Magister en Gestión del Mantenimiento

Industrial en la escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador; la investigación se fundó en la propuesta de un plan de mantenimiento basado en Confiabilidad por la cantidad de fallos y averías que se presentaban en las unidades impidiendo el óptimo funcionamiento y afectando la producción del crudo, el autor realizó un AMEF para identificar los fallos y actuar según las causas por medio de unas actividades específicas de mantenimiento (Castillo Santillán, 2017); La investigación citada ofrece al trabajo en ejecución una visión más amplia con las estadísticas de fallas de las Unidades de Bombeo Mecánico, así como su confiabilidad y disponibilidad, permite referenciar la rata de fallos que pueden ser aceptables y comparables con la presente investigación.

5.1.1.2 Optimización del sistema de levantamiento por bombeo mecánico, en la zona sur sección 73, en el campo Gustavo Galindo

En el año 2019, Víctor Hugo Velázquez Ponce, presentó un proyecto titulado “*Optimización del sistema de levantamiento por bombeo mecánico, en la zona sur sección 73, en el campo Gustavo Galindo*” con el objetivo de titularse como ingeniero mecánico de la Universidad estatal península de Santa Elena, Ecuador; en su trabajo el autor estudia los componentes y partes del sistema por medio de una recopilación de información para establecer la optimización específicamente para la sección mencionada, entendiendo la importancia del sistema para la producción de crudo, siendo esta el 40% de la producción total del campo. (Velázquez Ponce, 2019); La investigación consultada aporta en temas específicos sobre el bombeo mecánico, los equipos y partes que lo conforman así mismo brinda data sobre aspectos técnicos y económicos que permiten ampliar la visión del tema en estudio.

5.1.1.3 Diseño e implementación de un plan integral de mantenimiento preventivo, seguridad y salud ocupacional en la unidad de bombeo MTU perteneciente a la compañía Fig Oil CIA. LTDA. Coca-Orellana-Ecuador.

En el año 2014, los estudiantes Néstor Patricio Guevara Miñaca y Pablo Andrés Vallejo Dávalos, realizaron una investigación para la obtención de su título como ingenieros mecánicos de la Escuela superior politécnica de Chimborazo, Ecuador, la cual titularon “*Diseño e implementación de un plan integral de mantenimiento preventivo, seguridad y salud ocupacional en la unidad de bombeo MTU perteneciente a la compañía Fig Oil CIA. LTDA. Coca-Orellana-Ecuador*” los autores vieron la necesidad de implementar una estrategia de mantenimiento por la data de fallas presentadas en la compañía, realizaron entonces un diagnóstico de la situación actual por medio de encuestas y entrevistas para luego realizar una codificación de los equipos y así poder identificarlos y obtener fichas técnicas que permitieran un control, de tal manera que planificaron actividades de mantenimiento, donde establecieron no solo el tiempo de ejecución si no también, los responsables, la frecuencia, herramientas de tal manera que estructuraron el plan de mantenimiento basado en preventivo. (Guevara Miñaca & Vallejo Dávalos, 2014); La investigación en mención ayuda al desarrollo el primer objetivo trazado en el proyecto en curso brindando herramientas para la realización del diagnóstico, así como también nos enseña la importancia de tener en cuenta al personal operativo en las actividades y estrategias de mantenimiento que se planteen.

5.1.1.4 Desarrollo de un sistema experto para diseño y optimización operativa del bombeo mecánico.

En el año 2013, Fabian Alejandro Camargo Juárez y Rafael Cervantes Biruete, presentaron una investigación titulada “*Desarrollo de un sistema experto para diseño y optimización operativa del bombeo mecánico*” para recibir el título de ingenieros de Petróleo en la Universidad Nacional Autónoma de México, los estudiantes basaron la investigación en el desarrollo de un software con el fin de obtener información relevante del desempeño operativo de las unidades de bombeo mecánico y con ello ofrecer soluciones a las fallas operacionales de los sistemas. (Camacho Juárez & Cervantes Biruete, 2013); La presente investigación se resalta debido a que muestra muy de cerca la función e importancia que tienen los sistemas de bombeo mecánico, y como el conocimiento de este permite la implementación de una óptima estrategia de mantenimiento.

5.1.2 Estado del arte nacional

5.1.2.1 Análisis de falla en los sistemas de bombeo mecánico del campo Cantagallo

En el año 2008, Francisco Antonio Álvarez y Lacayo realizaron una investigación para optar su título de Ingeniero de Petróleos en la universidad Industrial de Santander (UIS), el cual titularon “*Análisis de falla en los sistemas de bombeo mecánico del campo cantagallo*” En ella los investigadores en mención tomaron 12 pozos, establecidas en su estudio como los más críticos con el fin de utilizar la herramienta de causa- raíz, y de esta forma identificar los fallos potenciales, de los cuales listan los siguientes: Fallas por la bomba, varilla y por tubería. (Vega Castro & Álvarez Lacayo , 2008). La investigación citada sirve

como referente y como herramienta de comparación en las fallas potenciales halladas, las cuales pueden figurar en esta investigación.

5.1.2.2 Optimización del sistema de bombeo mecánico para máxima eficiencia de levantamiento, en tres pozos que presenten interferencia por gas en el campo Palagua.

Camilo Ernesto Bohórquez Ibargo en el año en curso, realizó una investigación acerca de la “*Optimización del sistema de bombeo mecánico para máxima eficiencia de levantamiento, en tres pozos que presenten interferencia por gas en el campo Palagua*” con el que logró su título de Ingeniero de Petróleo en la fundación universidad de América, en la investigación Camilo expresa que “*la máxima eficiencia de levantamiento en campos que presentan problemas por interferencia por gas no excede del 15% al 35%*” dicha interferencia se presenta por el diseño de sistemas de bombeo mecánico y como consecuencia trae fallas en la bomba, ya sea fuga o desgaste. (Ibargo, 2020). Este trabajo aporta a nuestra investigación una serie de fallas que pueden ser congruentes con nuestro análisis, así como también un punto de vista de optimización del sistema.

5.1.2.3 Evaluación, análisis y propuesta de optimización de la estrategia del plan de mantenimiento de los equipos de bombeo del campo Casanare.

En el año 2014 Carlos Arturo Mujica Benavides y Edwan Julián Paredes Méndez, desarrollaron un proyecto de grado titulado “*Evaluación, análisis y propuesta de optimización de la estrategia del plan de mantenimiento de los equipos de bombeo del campo Casanare*” para obtener su título como especialista en Gerencia de Mantenimiento en la UIS (Universidad Industrial de Santander), el objetivo de la investigación mencionada era “*medir, analizar, controlar, corregir y proponer mejoras que permitan garantizar la*

confiabilidad de los activos” con el objetivo de disminuir los tiempos en el cronograma de mantenimiento establecido anualmente en un 44%, lo que a su vez permite una reducción de costos y mejorando los indicadores de gestión. (Mujica Benavides & Paredes Mendez, 2014); La investigación aporta al proyecto en desarrollo actividades de mantenimiento que son motivo de estudio de acuerdo al cálculo de fallos, por tanto, son relevantes para la planificación y control de la propuesta de optimización.

5.1.2.4 *Seminario de investigación: estudio de las variables involucradas en los sistemas de bombeo mecánico para el diseño, control y optimización de pozos en campo Colorado.*

En el 2011 los estudiantes Diego Alberto Torrado, Fernando Diaz Gómez, Jefferson Villamizar, Jorge Humberto Buitrago y Luis Andrés Aguilar Gómez, realizaron una investigación, la cual titularon “*Seminario de investigación: estudio de las variables involucradas en los sistemas de bombeo mecánico para el diseño, control y optimización de pozos en campo Colorado*” dicha investigación tuvo como objetivo la búsqueda de información relacionada con las unidades de bombeo mecánico del campo mencionado, los autores exponen que al tener una operación poco eficiente en el sistema de bombeo trae consigo fallas relacionadas con la bomba, tubería y varillas lo que a su vez genera un incremento considerable en el mantenimiento y por lo cual se hace necesario implementar acciones preventivas eficientes donde se establezcan las causas raíces que originan las averías y fallas mencionadas. Este trabajo contribuye en la parte teórica de nuestra investigación.

5.1.2.5 Análisis de fallas en el pasador de la manivela en las unidades de Bombeo

Mecánico de campo Boscán

En el 2015, la revista investigaciones científicas realizó una consulta sobre las fallas presentadas en el pasador de la manivela de una unidad de bombeo mecánica, elaboraron un análisis causa-raíz para determinar las causas que conllevan a la falla mencionada en el presente artículo, hallaron que la empresa no contaba con procedimientos, documentos y/o manuales lo que hacía que al momento del cambio del componente se indujera a otras fallas. (Romero & Gonzalez, 2015); El artículo contribuye a la importancia de establecer protocolos, actividades específicas, documentación, y toda la gestión necesaria a la hora de establecer mantenimientos, independientemente de la estrategia planteada.

5.1.2.6 Metodología de operación y mantenimiento (O&M) de pozos, para optimizar la explotación de campos maduros.

En el año 2016, Héctor Jiménez Martínez y Daniel Romo Rico, realizaron una investigación con el fin de mejorar la estrategia de mantenimiento establecida para los pozos, buscaron unir varias disciplinas como la ingeniería, la administración y las finanzas en pro de encontrar respuestas, al cabo de la investigación lograron resultados positivos obteniendo mejoras en la planeación, mantenimiento y producción del crudo. (Jiménez Martínez & Romo Rico, 2016); EL artículo hace énfasis en la obtención de la información de calidad, el seguimiento de las actividades y la importancia del personal idóneo en la ejecución de tareas, por lo anterior se hace importante para nuestra investigación a la hora de tomar decisiones y de delegar funciones.

5.2 Marco Teórico

Teniendo como punto inicial para el desarrollo de la propuesta con la metodología PMO (Optimización de Mantenimiento Planeado) como soporte se realiza la respectiva investigación con el fin de dar a conocer las diferentes metodologías que son homólogas y que se utilizan en la actualidad en la industria para la optimización de un plan de mantenimiento ya establecido y funcionando, bajo la premisa que todo es susceptible de mejora.

Las empresas en la actualidad le apuestan a mejorar la manera de mantener sus activos con el fin de tener la mejor confiabilidad y disponibilidad posible, pero: ¿Como se logra esto? Es bien conocido que de la calidad y tipo de mantenimiento empleado en los activos podrá cosechar la mayor cantidad de disponibilidad, en otras palabras, mayor producción. Una de las metodologías más utilizadas es el RCM de sus siglas en inglés Mantenimiento centrado en confiabilidad. a continuación, se muestran que es y de que compone esta técnica.

5.2.1 Metodología RCM

Los inicios del RCM datan de la industria aeronáutica y la metodología fue desarrollada para la fase de diseño en planta en un intervalo de tiempo 1960 a 1980 con el objetivo de establecer políticas que mejoren las funciones de los equipos y poder dar solución a las fallas. Esta metodología se establece desde cero y hace un análisis muy completo del activo para establecer su funcionalidad seguido de las causas de falla que generan la pérdida de función (parcial o total).

El RCM establece 7 preguntas básicas para el proceso, las cuales se muestran a continuación:

1. ¿Cuál es la función?
2. ¿Cuál es la falla funcional?
3. ¿Cuál es el modo de falla?
4. ¿Cuál es el efecto de falla?
5. ¿Cuál es la consecuencia de la falla?
6. ¿Qué se puede hacer para evitar o minimizar la consecuencia de la falla?
7. ¿Qué se hace si no se encuentra ninguna tarea para evitar o minimizar la consecuencia de la falla? (SAE, 2020).

Por lo anterior, es importante establecer cada una de estas preguntas con el fin de realizar un mantenimiento centrado en confiabilidad, para esto se debe tener presente los siguientes conceptos:

5.2.1.1 Contexto operacional

Se entiende como todo lo relacionado a la ubicación, temperatura, presión, altura, humedad relativa y todas las variables operacionales que inciden directamente en el equipo, por ello no es lo mismo una bomba centrífuga que trabaja en un a plan industrial en la ciudad de Bogotá en un ambiente normal a comparación de la misma bomba centrífuga que opera en

la ciudad de Cartagena a nivel de mar en condiciones extremas donde los niveles de oxidación son superiores y de tienden a reducir la vida útil la bomba con mayor facilidad. Además de tener presente el régimen de operación es importante, saber su tiempo de operación, la cantidad y calidad de repuestos utilizados para su atención, y los impactos asociados a nivel de seguridad en personas y afectaciones al medio ambiente.

5.2.1.2 Falla

Suceso que deshabilita un equipo para poder cumplir la función para la cual fue diseñado, por lo que se refiere a fallas existen varios tipos: parciales, inminentes, totales, catastróficas o aparentes.

5.2.1.3 Funciones

En la función de un equipo se establecen sus rangos de funcionamiento, por ejemplo: la bomba centrífuga debe entregar un caudal no menor a los 5,1 m³ /h y no superior a 6,1 m³ /h, de esta manera se establece cuantitativamente rangos de máximos y mínimos de operación y si se tienen condiciones adicionales se deben listar para conocer la totalidad de su función.

5.2.1.4 Fallas funcionales

Es la capacidad de un equipo de no cumplir la función, para la cual fue diseñado. siguiendo con el ejemplo de la bomba centrífuga, se entiende como la no capacidad para bombear agua inferior a los 5,1 m³ /h que es lo mínimo esperado en su operación, he aquí la relación directa entre las fallas funcionales y la función que se requiere en la cual opere nuestro equipo en cuestión.

5.2.1.5 Modos de falla

Es la forma que se puede identificar la falla, puede ser una posible causa que está originando la falla, para el ejemplo de la bomba centrífuga como modo de falla, se tiene una fuga de aceite, si no se corrige esta fuga completando el nivel de aceite es inminente una falla catastrófica, cabe resaltar que estos se relacionan directamente con las fallas funcionales que se establecieron anteriormente.

5.2.1.6 Causa raíz

Se establece como la causa raíz principal de origen de la falla, pueden proceder de tres fuentes fundamentales: Físicas, Humanas o Latentes. Las causas físicas por su parte corresponden a los hechos reales o tangibles, por su parte las causas humanas corresponden a lo que se omitió o se dejó de hacer o se carecía del conocimiento necesario para la realización de la actividad en cuestión. Por último, están las causas latentes que hacen referencia a las ausencias de documentación o procedimientos. Es importante la documentación de este tipo de fallas en el histórico del equipo con el fin de no repetir eventos previos y poder asegurar la confiabilidad del activo.

5.2.1.7 Efectos de falla

Para los modos de falla evidenciados se deben saber los efectos asociados a la falla, en este se describe lo que pasaría cuando se materialice este modo de falla. Retomando el ejemplo de la bomba centrífuga si esta no entrega el caudal mínimo requerido tiene impactos directos al proceso de producción y si la curva de eficiencia desciende de manera progresiva, si se persiste en esta situación (típica en mantenimiento) no solo se corre el

riesgo de materializar una falla total en el equipo, su indisponibilidad aumentará, así como el tiempo de reparación de la bomba, reduciendo la capacidad de producción. En otras palabras, se aumentarán las pérdidas por no atención oportuna de la bomba.

5.2.1.8 Consecuencias de falla

En las consecuencias de falla se pueden considerar diversos aspectos los cuales son fundamentales al momento de tomar decisiones a nivel de impacto, las consecuencias más relevantes son: daño a las personas, daños ambientales, pérdidas económicas, pérdidas a la producción y afectación a la imagen corporativa. Todas las afectaciones anteriormente mencionadas juegan un papel fundamental al momento de establecer su clasificación y se enfocan directamente a las necesidades requeridas, en primer lugar, está la seguridad de las personas, seguido de los daños que se puedan causar al medio ambiente que van de la mano con las pérdidas económicas, así mismo, generan pérdidas en la producción y afectan de manera negativa su imagen. Cada una de estas clasificaciones va a depender de su categoría y la consecuencia si la falla se llegara a materializar, he ahí lo importante de controlarla ya sea con su mitigación o definitiva erradicación.

5.2.1.9 Predecir o prevenir fallas

Los equipos tienen gran variedad de protecciones, es decir, se pueden prevenir cierto tipo de fallas. Dentro de las protecciones más representativas encontramos: protecciones por sobre velocidad, corriente, presión, temperatura, fusibles. Estas ayudan a mitigar la probabilidad de falla y es importante asegurar su correcto funcionamiento, es aquí donde toman valor las rutinas de mantenimiento preventivo, pruebas funcionales y control de los parámetros operacionales del equipo, los cuales son los principales indicadores del correcto

funcionamiento. Se recuerda que “*Lo que no se define no se puede medir. Lo que no se mide, no se puede mejorar. Lo que no se mejora, se degrada siempre.*” (Thomson, 2020)

5.2.2 Tipos de mantenimiento

5.2.2.1 Tareas proactivas mantenimientos aplicables

En la actualidad se conocen principalmente tres tipos de mantenimiento. A continuación, se describen.

5.2.2.2 - Mantenimiento correctivo

Es el mantenimiento que corrige las averías evidenciadas en los equipos, se realiza después de un daño y por su naturaleza no permite ser planeado, conceptualmente es el primero que se conocía hasta la primera guerra mundial.

5.2.2.3 - Mantenimiento preventivo

Este mantenimiento es el que se basa en las recomendaciones del fabricante, quien según su experiencia recomienda tareas a ejecutar en un tiempo determinado, con una frecuencia y con un alcance específico asegurando la fiabilidad del equipo, consiste en una inspección periódica para identificar las desviaciones existentes que conducen a la falla y por ende al paro del equipo. Este mantenimiento se fundamenta en reparar, adaptar o cambiar el ítem que lo requiera para cumplir la función esperada del equipo.

5.2.2.4 - *Mantenimiento predictivo*

Mantenimiento basado en la condición del equipo, según su condición actual se buscan síntomas de falla con el propósito de prevenir que estas ocurran. En una gran parte de las situaciones las listas de chequeo inicial aportan gran valor al estudio en cuestión, evidenciando desalineaciones, desgastes, fugas, roturas, desajustes o sonidos fuera de lo normal. Estas rondas son complementadas por varias técnicas que soportan y validan la falla potencial que se está estableciendo. Dentro de las técnicas más utilizadas tenemos: termografía, vibraciones, ultrasonido, calidad de energía, análisis de aceite e inspecciones boroscópicas.

Este mantenimiento es muy importante a nivel industrial y cobra mucho valor al momento de tomar decisiones de intervención de los equipos, con la correcta interpretación y conjugación de estas técnicas es posible aumentar la vida útil de los activos, así que también saber cuándo ya el activo está en etapa de desgaste y es más costo-efectiva el remplazo de este, es una herramienta muy poderosa, pero requiere una madurez importante a nivel organizacional para que sea ejecutada con asertividad.

5.2.3 Beneficios del RCM

Los beneficios que ofrece esta técnica son muchos y *“La implementación del RCM debe llevar a equipos más seguros y confiables, reducciones de costos (directos e indirectos), mejora en la calidad del producto, y mayor cumplimiento de las normas de seguridad y medio ambiente. El RCM también está asociado a beneficios humanos, como mejora en la*

relación entre distintas áreas de la empresa, fundamentalmente un mejor entendimiento entre mantenimiento y operaciones” (Fibertel, 2007). Como tal esta metodología es sistemática para analizar los requerimientos operacionales de un equipo, un sistema o planta, se puede realizar un análisis tan complejo y detallado como se requiera. Como pilares fundamentales se establecen las funciones, fallas y consecuencias de estas, su razón de ser se fundamenta en que el mantenimiento se enfoca en lo que realiza el activo y sus consecuencias asociadas a las fallas, que obedece a una jerarquía para la identificación, cuantificación y priorización de las modificaciones a implementar para mejorar las condiciones de los activos.

5.2.4 Indicadores de mantenimiento

Son parámetros que permiten ver el avance del cumplimiento de los objetivos planteados en la gestión de mantenimiento y ayudan a evaluar los resultados, sirven como control y se utilizan para la toma de decisiones. Suelen ser muy específicos, se puede establecer límite superior, inferior o ambos con el propósito de lograr las metas, se expresa en unidades o porcentajes. A continuación, se muestran los indicadores de mantenimiento más utilizados en la actualidad.

5.2.4.1 Confiabilidad

- Probabilidad que un ítem cumpla una función de operación específica en un tiempo determinado sin fallar. La confiabilidad está directamente relacionada con la tasa de fallas y con el tiempo operacional.

5.2.4.2 Disponibilidad

La disponibilidad es la probabilidad que un ítem esté en condiciones de cumplir su función en un instante de tiempo, cualquiera que este sea. La disponibilidad se relaciona con los tiempos promedios de reparación de fallas y los tiempos operativos.

5.2.4.3 Mantenibilidad

Probabilidad que un ítem sea reparado y pueda cumplir su función normal en un tiempo determinado, después de presentar una falla. La disponibilidad se relaciona directamente con tiempos promedios de reparación de fallas.

5.2.4.4 Tiempo Promedio entre Fallas (TMEF ó MTBF)

El Tiempo Medio Entre Fallas indica el intervalo de tiempo mas probable entre el arranque y la materialización de una nueva falla, en otras palabras, el tiempo promedio entre falla y falla, a mayor MTBF mayor será la confiabilidad del ítem o equipo a mantener.

5.2.4.5 Tiempo Promedio para Fallar (TPPF ó MTF)

El tiempo medio hasta la falla es un intervalo de tiempo en el cual el equipo funciona sin fallas en un periodo de tiempo específico, esta asociado directamente a la confiabilidad del ítem o equipo a mantener. El Tiempo Promedio para Fallar también se conoce como “Tiempo Promedio Operativo” o “Tiempo Promedio hasta la Falla”.

5.2.4.6 *Tiempo Promedio para Reparar (TPPR ó MTTR)*

El tiempo medio para reparar un ítem o equipo, se utiliza para saber la efectividad al momento de devolver el activo a las condiciones necesarias de operación, es cuando el equipo quedó fuera de servicio por una falla, en un periodo de tiempo específico. Está asociado directamente a la mantenibilidad del ítem o equipo a mantener.

5.2.5 PMO, la optimización del mantenimiento planeado.

El PMO se establece como una buena alternativa como plan de mejora un plan de mantenimiento, en comparación con el RCM que es una técnica muy utilizada en la actualidad, así mismo, la optimización de un plan de mantenimiento en un proceso que como base utiliza los principios iniciales del RCM, Se hace necesario resaltar que hace parte de un plan de mantenimiento inicial, su histórico de falla, manual de operación y mantenimiento y todo documento que aporte a la eliminación de fallas como razón fundamental para realizar esta técnica.

Es una herramienta diseñada para facilitar el trabajo racional y rentable basado en la fiabilidad para un plan de mantenimiento activo, con la firme idea de dejar de lado el ciclo de mantenimiento reactivo, de este modo se está reaccionando continuamente al mantenimiento correctivo o apaga incendios, solo incrementa nuestro trabajo diario, desmotiva y se pierde la objetividad del equipo de mantenimiento.

La metodología PMO consiste en analizar las tareas de mantenimiento anterior, realizar los análisis de confiabilidad correspondientes, listar los modos de falla evidenciados durante las tareas propias del mantenimiento, elegir el método más eficaz para realizar las tareas de

mantenimiento, se debe agregar la experticia del personal técnico y es necesario resaltar que ellos son los que mejor conocen el equipo, se usa el diagrama de decisiones del RCM, se establece la importancia de las funciones del activo, los objetivos se enfocan en un trabajo racional y rentable para la organización, finalmente se establecen los recursos necesarios para el desarrollo de las tareas del plan de mantenimiento. (Palencia, 2007)

Si bien las dos metodologías son muy parecidas RCM y PMO funcionan como métodos de análisis para determinar las tareas más asertivas del mantenimiento, consiste en establecer las frecuencias más convenientes para los equipos de la organización, su razón de ser es realizar el remplazo de tareas periódicas intrusivas del mantenimiento preventivo por el CBM, esto se realiza tanto como sea posible y no afecte la seguridad de las personas o la integridad del proceso. Al ser un proceso estandarizado tiene la capacidad de ser auditado para el cierre y controlar las desviaciones, y su resultado final para las dos metodologías es un plan de mantenimiento para su posterior implementación.

La gran mayoría de las organizaciones buscan dar el mejor rendimiento en temas de mantenimiento con un enfoque específico en la optimización, es el caso de este trabajo de maestría en el cual establecen una propuesta para la programación de mantenimientos correctivos, preventivos y proactivos en un sistemas de transmisión de energía utilizando un modelamiento que restringen la intervención libre de los equipos a ser mantenidos, utilizando el juicio experto y optimizando los recursos internos, se pretende reducir el riesgo de afectación a: personas y equipos, cumpliendo con la regulación colombiana para la calidad de transporte de energía. Utilizan un modelo plasmado en dos algoritmos (Mago, Harmony) estos resuelven la problemática de transmisión de energía, se tiene un panorama

claro y bien definido que consta de 3 subestaciones, 15 órdenes de trabajo y un segundo escenario de 17 subestaciones con 214 órdenes de trabajo con un horizonte de mantenimiento superior a un año. *“El modelo para la programación del mantenimiento propuesto, abre un panorama de desarrollo en el cual es posible proponer técnicas de inteligencia computacional que permitan mayor eficiencia y mejor desempeño en la búsqueda óptima de soluciones en sistemas de transmisión reales y de gran tamaño.”* (Restrepo, 2014).

La revista Predictiva 21 muestra un artículo de como disminuir el valor no agregado del mantenimiento, se analizan dos panoramas: el primero, hacer mantenimiento mientras el equipo está produciendo, mantenimiento predictivo basado en la condición, Segundo, estar inmerso en el día a día y realizar mantenimientos correctivos. Dos de las herramientas esenciales para mejorar estas condiciones es la optimización para mantenimientos planeados (PMO) y la aplicación de herramientas de análisis de fallo o causa raíz. La idea es no aplicar estas herramientas a todo, se debe tener presente la relación entre el costo y la confiabilidad, esta relación es proporcional y al aumentar la confiabilidad aumentan los costos asociados, el deber es poder encontrar el punto óptimo entre el costo y la confiabilidad, el autor sugiere: no implementar RCM, PMO, RCA, Six Sigma a todo solo porque sí (solo porque está de moda), las herramientas se deben aplicar donde mayor beneficio se obtenga. *“Haciendo hincapié que la implementación de estas herramientas debe ser realizada por los mismos técnicos de mantenimiento, puesto que estos son la base de la estructura de mantenimiento”* (King, 2017).

Una de las metodologías más conocidas en el mundo del mantenimiento es el PMO2000™ y contempla al mantenimiento como una función impulsora del negocio, es considerado como un impulsor directo en la productividad y en el mejoramiento de los activos físicos enmarcados en el mejoramiento continuo. En varias ocasiones nos enfrentamos el dilema de la cantidad de recursos disponibles para desarrollar una actividad y estos no son lo suficientes, se deben garantizar sus condiciones de funcionamiento y confiabilidad. La gran mayoría de estos recursos son absorbidos por las fallas del día a día, que no deja otra alternativa y se ejecuta el mantenimiento correctivo dejando de lado la estrategia del mantenimiento preventivo, con un aumento progresivo de las fallas y cumpliendo el ciclo del mantenimiento reactivo. Esta metodología ofrece resultados en seis meses basando su estrategia en cuatro pilares fundamentales: sistemas de administración de mantenimiento, administración de la información de paradas, estrategia de mantenimiento RCM/PMO y por último el manejo de incidentes de confiabilidad. El proceso se establece a partir de la confiabilidad promoviendo el cambio cultural, se debe organizar, revisar y depurar la estrategia de mantenimiento, esto a su vez debe incrementar la capacidad de producción y disminuir los costos relacionados directamente con la gestión de mantenimiento. “ *Para lograr las metas es importante contar con personal capacitado en técnicas de análisis e igualmente contar con la motivación del personal por parte de la gerencia , para crear en el trabajador un sentido de pertenencia, compromiso y de creatividad para mejorar su trabajo y optimizar los costos operacionales* ” (OMCS Latin America, 2020).

Los autores muestran el método utilizado en una optimización del mantenimiento preventivo planificado (MPP) con un análisis de falla cuantificando la tasa de fallas, los tiempos medios entre fallas y tiempos medios para reparar, todo lo anterior con el fin de

establecer la confiabilidad, el riesgo para las turbinas y los generadores de vapor en central hidroeléctrica cubana. Se hace énfasis en la importancia del CBM y del RCM como una técnica de perfeccionamiento, como desarrollo de mantenimiento se muestra la caracterización de las centrales termoeléctricas cubanas, los únicos costos asociados a esta optimización del mantenimiento preventivo es la organización de los datos de falla y la colaboración del personal técnico con la experticia que se tiene de las mismas. *“Una simple organización de los datos de fallas y de los tipos de mantenimiento puede conducir a la obtención de resultados inesperados en la predicción de las primeras y en el control del segundo”* (Pedro L. Hernández, 2008)

Es fundamental conocer los elementos para una apropiación adecuada del conocimiento y como aplicarlos en la industria como táctica para las actividades de mantenimiento, esta información comienza en los años 90 donde la administración, la innovación, el comercio y la gestión estratégica ha tomado mucha fuerza, pero aún existen varios interrogantes, de cuál es la manera más adecuada de transferir dichas tácticas para una gestión efectiva, una de las claves en el mantenimiento y en los montajes industriales es la comunicación asertiva, la gran mayoría de las personas que interactúan para llevar a cabo estos oficios lo hacen en base a su experiencia, la cual resulta compleja de calcular y articular efectivamente, lo importante es saber cerrar la brecha de información y con el conocimiento evitar costos adicionales en la gestión, a pesar que esto son asumidos por el empleador se ven reflejados en tiempos fuera de servicio en un equipo crítico o en el incumplimiento en un servicio, si estas brechas no son identificadas y mejoradas oportunamente se incurre en la contratación de nuevo personal y se retrasan los procesos a causa de la nueva curva de

aprendizaje. *“Este estudio se ha enfocado en las formas en que las organizaciones de mantenimiento de las empresas generan, transfieren y utilizan su conocimiento, y los impactos que pueden producir en toda la organización. Estos procesos se caracterizan en un proceso kantiano (personas, medios físicos y entorno)”* (Francisco Javier Cárcel Carrasco, 2013).

Una de las principales fuentes de ingresos de Colombia son los ingenios azucareros, lugar en el cual se desarrolló la metodología de gestión en mantenimiento, como razón fundamental, es facilitar la toma de decisiones a nivel de planeación de tareas en el área de mantenimiento en la búsqueda de la correspondencia con las cuadrillas de trabajo asignadas, todo con el fin de disminuir el backlog producto del atraso para la ejecución de órdenes de mantenimiento. El desarrollo de esta metodología se llevó a cabo con los históricos de mantenimiento de INCAUCA S.A., esta información fue extraída de SAP PM y SIGIND como objeto de estudio se estableció en los equipos de extracción de jugo de caña ubicados en el área de la molienda. Como herramienta conceptual se utiliza la teoría de líneas de espera, con esta herramienta intentan modelar las situaciones propias como órdenes de mantenimiento, nivel de servicio, número de servidores, tiempo de atención entre los más relevantes, se utilizan modelos probabilísticos para determinar el comportamiento de estas variables, y dada la naturaleza de las órdenes de trabajo se pueden ver influenciadas por los ingenieros de mantenimiento, se capturan patrones y factores propios del proceso. *“El estudio de las líneas de espera son de ayuda en el mantenimiento siempre y cuando se cumpla el proceso de la validación de datos, no es posible asumir el comportamiento de los datos hasta no realizar pruebas que determinen si los valores*

siguen alguna distribución en especial. Los análisis y decisiones tienen alta calidad si los datos cuentan con la seguridad del seguimiento distribuciones” (Dominguez, 2012).

Para el siguiente estudio se realiza un programa de optimización de producción para un sistema de bombeo mecánico (Balancín convencional) y otras técnicas de pozo, se estudian tres modelos de bombeo mecánico con balancín realizando un modelamiento en tiempo real con la herramienta LOWIS™ BEAM. El problema es del orden técnico económico con el fin de optimizar la producción realizado para la empresa Weatherford. International .LA, se muestran los principios básicos de funcionamiento del bombeo mecánico y la descripción del programa LOWIS™ basado en los datos históricos completos del pozo objeto de estudio, complementado con historiales de producción, reacondicionamiento, diagramas de complementación e instalación, análisis técnico-económico así como normas de seguridad industrial y planes de contingencia ambiental, con la aplicación de este software fue posible tener conexión en tiempo real y así poder sintetizar el sistemas de bombeo con la facilidad de visualizar vía remota en la toma de decisiones en tiempo real. *“La presente investigación Teórico-Práctica contribuye a buscar mejoras en la optimización de la producción en Sistemas de Bombeo Mecánico y Nuevas Tecnologías, mediante nuevas propuestas tecnológicas e innovadoras a través de un monitoreo en tiempo real con el programa LOWISTM BEAM.”* (Estrada Benalcázar, 2014).

5.3 Marco normativo/legal

Tabla 1. Marco normativo aplicable a UBM

Norma/Ley/Decreto	Numeral	Observación
-------------------	---------	-------------

Acuerdo 04 de 2012, "Por el cual se establecen criterios de administración y asignación de áreas para exploración y explotación de los hidrocarburos propiedad de la nación; se expide el reglamento de contratación correspondiente y se fijan reglas para la gestión y el seguimiento de los respectivos contratos"	Art. 2	Por el cual se dispone la planeación de los proyectos y celebración de los contratos en las áreas o reservabas asignadas, para la explotación de crudo.
	Art. 4	Por el cual se dispone de las actividades inherente o complementarias a la exploración y explotación de los hidrocarburos
	Art. 9	Procedimiento para la asignación de áreas para la exploración y explotación de hidrocarburos.
Resolución 40048 de 2015, "Por el cual se establecen medidas en materias de exploración y explotación de hidrocarburos en yacimientos convencionales continentales y costa afuera"	Art. 60	Por el cual se determina que el contratista que es responsable de un campo o pozo está en la obligación de emitir informes de producción y mantenimiento al ministerio de energía y minas
ISO 14224:2016, Industrias del petróleo, petroquímicas y del gas natural. Recogida e intercambio de datos de mantenimiento y fiabilidad de los equipos.	Capítulo 6 y 7.	En los capítulos 6 y 7 se estructura la información de los datos del equipo, fallas, mantenimiento, taxonomía de equipos, modos de falla, entre otros.
ISO 55001, Gestión de activos.	Capítulo 6.	En el capítulo 6, se determina la organización para lograr la finalidad de la gestión de activos.
	Capítulo 10.	En el capítulo 10, se establece las pautas para alcanzar la mejora continua en la gestión de activos.
SAE JA1011, "Criterios de evaluación para procesos de mantenimiento centrado en confiabilidad" (RCM)	Capítulo 5.	Define las preguntas y tareas del RCM, así como la implementación del mismo.

Fuente: Autores

5.4 Marco Histórico

En el valle del Magdalena medio en el año de 1963 Texas Petroleum Company realiza el primer descubrimiento de un yacimiento el cual llaman pozo Cocorná, en los años siguientes diversas empresas hallaron yacimientos a lo largo del Magdalena.

La tecnología de extracción de crudo que se utiliza en este tipo de campos, es por inyección cíclica de vapor de agua en pozos, también conocida como inyección intermitente de vapor, lo cual permite que el crudo pesado sea extraído por la UBM, la cual es el equipo en estudio.

La UBM es el equipo principal para ejecutar la acción de la extracción, utilizada desde finales de la primera guerra mundial y se estima que cerca del 80% de los pozos del mundo son operados con UBM. A lo largo de la historia de extracción de crudo la UBM ha evolucionado en pro de aumentar la producción y con materiales modernos y diseños optimizados se ha logrado satisfactoriamente, aunque para el ojo no experto da la sensación que el equipo se mantiene igual desde sus inicios, ya que el diseño macro de su estructura no ha cambiado mucho.

El tema de estudio de este trabajo es la optimización del plan de mantenimiento de las UBM, en la misma medida que ha venido evolucionando la UBM así la gestión de mantenimiento ha mejorado a lo largo de los años, desde los inicios del mantenimiento con la aplicación a las líneas de producción de las armas para la primera guerra mundial hasta la

implementación de RCM, en la industria aeronáutica y más recientemente el mantenimiento total productivo aprovechando las herramienta japonesa de 5S de calidad.

6 Marco metodológico

6.1 Recolección de la información

La información se obtuvo por medio de la empresa del sector Oil & Gas del caso de estudio, la cual nos suministró las especificaciones y características de las UBM, así como el plan de mantenimiento que ejecutan. Las UBM están ubicadas en el Magdalena medio, la empresa del sector Oil & Gas del caso de estudio es la encargada de brindar el mantenimiento a las UBM.

La información en su mayoría se adquirió en los datos de los históricos de operaciones, mantenimientos y fallas que han presentado las UBM en los últimos meses, sin embargo, con el objetivo de poseer la información con la mejor calidad posible, se analizarán los datos de los modos de fallas que hayan registrado recientemente.

6.1.1 Tipo de investigación

La presente investigación se desarrolla bajo un paradigma mixto, esto quiere decir que; se usará informaciones de los manuales según el fabricante, pero también los autores dejarán su percepción y experiencia en los análisis y resultados.

6.1.2 Fuentes de obtención de la información

6.1.2.1 Fuentes primarias

Las fuentes de información primaria de la presente investigación se basan en el manual del fabricante, específicamente de Lufkin.

6.1.2.2 *Fuentes secundarias*

Las fuentes de información secundarias asumidas para la presente investigación son; bases de datos indexadas, artículos científicos, tesis nacionales e internacionales, monografías y páginas especializadas como: Science Direct, elibro, Elsevier entre otras.

6.1.3 Herramientas

Como herramientas para el perfeccionamiento de este trabajo de grado se usaron técnicas, las cuales aportan valor a la metodología y son herramientas muy efectivas para la toma de decisiones, estas son:

- Auditoría de mantenimiento.
- Organización, clasificación, codificación y cuantificación de los Modos de falla.
- Diagrama de Pareto (80% - 20%).
- PMO.
- Análisis 5 ¿Por qué?

6.1.4 Metodología

Para realizar todos los objetivos propuestos se estructuraron cuatro etapas fundamentales: diagnóstico, investigación, análisis de resultados y propuesta a realizar, del desarrollo de los objetivos específicos se obtendrá como resultado la solución del objetivo general.

Para el objetivo específico No. 1 se realizará un diagnóstico de la situación actual del plan de mantenimiento de las unidades de bombeo mecánico, como herramienta se utilizará una auditoría de mantenimiento.

En cuanto al objetivo específico No. 2 se establecerá la metodología de mantenimiento y la normatividad aplicable para la optimización del plan de mantenimiento preventivo y predictivo realizando la estandarización del plan de mantenimiento para las UBM.

Con respecto al objetivo No. 3 se definirán las actividades para la realización de un plan de mantenimiento aplicando la metodología PMO.

6.1.5 Información recopilada

Para el caso de estudio la información recopilada son las hojas de vida, la taxonomía de las UBM, la información sobre los históricos de fallas de las UBM y la auditoría que se realizó sobre la ejecución actual del mantenimiento.

6.1.5.1 Hoja de vida de la UBM

La hoja de vida que se debe realizar y mantener actualizada de los equipos nos brinda la información de forma condensada y precisa al momento de requerirla, por tal razón es muy importante que se realice de forma adecuada con la información veraz. Las imágenes de la hoja de vida fueron tomadas del “Curso de Bombeo Mecánico” (Lufking Argentina S.A., 2008).

Ilustración 1. Hoja de Vida de UBM

UNIDAD DE BOMBEO MECANICO		REGISTRO FOTOGRÁFICO PLACA	REGISTRO FOTOGRÁFICO EQUIPO
Nombre del equipo	Unidad de bombeo mecánico UMB		
Código de equipo	UBMHMECC1		
Fabricante	LUFKIN		
Modelo	C456D-365-120		
Numero de Serie	M137676G		
Orden No.	103834		
DATOS TECNICOS Y DE PLACA			
API LICENCE No.	" + 570 LBS "		
MFG. Date	4/02/2001		
MAXIMUM COUNTERBALANCE W.	23,980 C'WTS		
MAXIMUM COUNTERBALANCE W.	28,725 OAS		
MAXIMUM COUNTERBALANCE W.	33,465 OAS		
PEAR TORQUE RATING IN THOUSANDS OF INCH-POUNDS	456.000		
MANTENIMIENTO			
Diario		Rutinario	
Limpie, apriete, lubrique, ajuste, realice trabajo de anticorrosión * Limpieza: Limpie el área mantenga el orden y el aseo. * Fijación: Apriete los tornillos de conexión entre las partes. * Lubricación: Agregue grasa regularmente a cada punto. * Ajuste: Sistema de nivel, centrado, equilibrio y control de toda la unidad. * Anticorrosión: Evite la corrosión	24 horas después de que la Unidad de Bombeo Mecánico esté operando, se deben apretar todos los tornillos de fijación de la unidad, este procedimiento se debe repetir mensualmente, luego cada 6 mes y finalmente de forma anual.	Verifique los tornillos para asegurarse de que no sueltos, revise la caja reductora, el cojinete central, el cojinete de cola, el pin crank. *Verificar que no haya ruido anormal, que la caja reductora mantenga el nivel de aceite y que la unidad esté sin fugas de grasa y/o aceite. *Mantenga el cuerpo limpio y sin aceite.	
HISTORIAL (Describir los eventos sucedidos al equipo como calibración, mantenimientos, daños, cambios de locación, etc.)			
Fecha	Descripción	Observaciones	

Fuente: LUFKIN, Autores con base en instrucciones del fabricante.

Se presenta la hoja de vida que se realizó para las UBM del caso del estudio, la cual tiene toda la información que se requiere de las UBM, así como un espacio para registrar los mantenimientos realizados.

6.1.5.2 Taxonomía de las UBM

En el análisis RCM la taxonomía de los equipos nos permite conocer a profundidad la composición de los mismos y así identificar los elementos más susceptibles a las fallas y aquellos que son de desgaste. A continuación, se indica la tabla de la taxonomía la UBM.

Tabla 2. Taxonomía de equipos

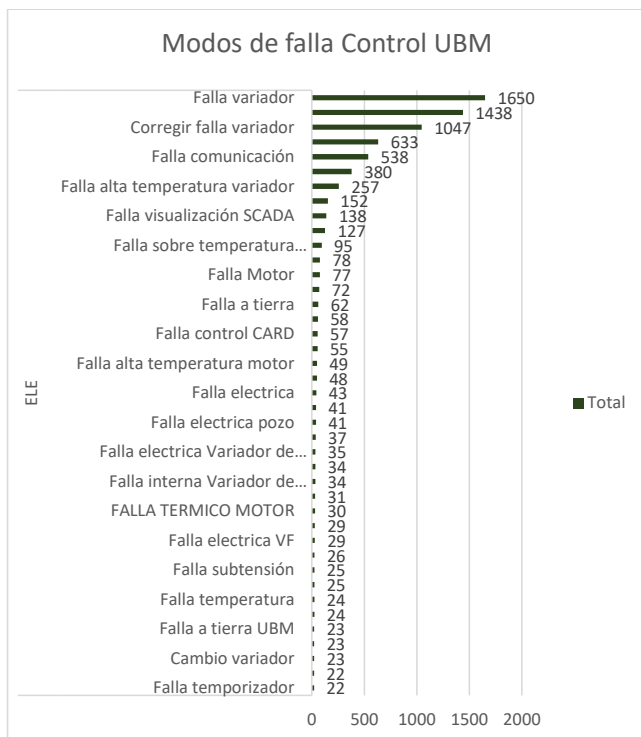
EQUIPO	SUBSISTEMAS	COMPONENTE	PARTES MANTENIBLES
UNIDA DE BOMBEO MECANICO	MECÁNICO	Caja de engranajes	RODAMIENTOS
			ENGRANAJES
			SELLOS
			EJES
			CARCAZA
	ELÉCTRICO	Motor	RODAMIENTOS
			BOBINAS
			EJE
			BLOQUE DE BORNES
			VENTILADOR
			CARCAZA
			ROTOR
			ESTATOR
	INTRUMENTACION	Variador de frecuencia	CIRCUITO DE CONTROL
			CIRCUITO INTERMEDIO
			INVERSOR
			CIRCUITO DE CONTROL
	CONTROL	SCADA	RED
			PLC
			PROGRAMACION

Fuente: Autores

6.1.5.2 Históricos de fallas de las UBM

Obtener los históricos de las fallas de las UBM, es la información vital de este caso de estudio, puesto que por medio de esta información se conoce a ciencia cierta el comportamiento de las UBM, sus indicadores de fallas y se determinó que el plan de mantenimiento que se ejecuta está listo para que se realice las oportunidades de mejora necesarias. A continuación, se ejemplifica el historial de fallas.

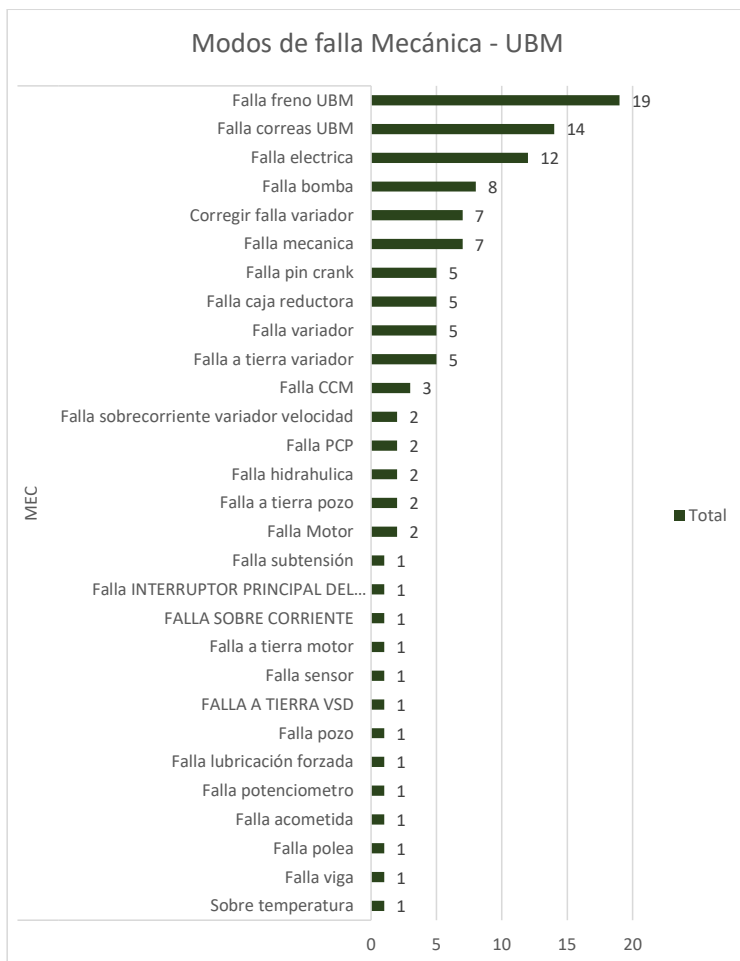
Gráfico 1. Modos de falla - Control



Fuente: Autores

En la tabla anterior se muestra los históricos acumulados de las fallas en el sistema de eléctrico de las UBM, como se observa la falla en el variador de velocidad es el tipo de falla más frecuente.

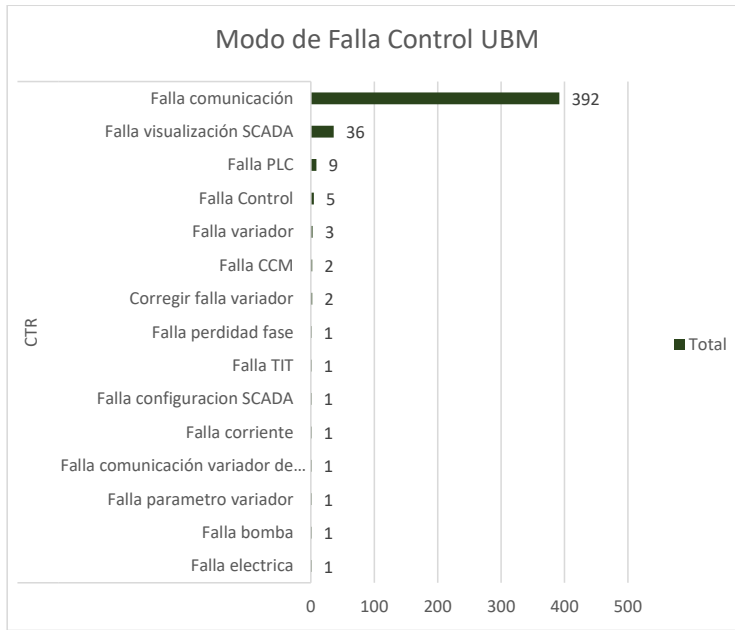
Gráfico 2. Modos de fallo - Mecánica



Fuente: Autores

En la tabla 6.1.5.4 se tienen los históricos acumulados de las fallas mecánicas de las UBM, cabe destacar que las fallas mecánicas son aquellas que el tiempo para reparar es el mayor en comparación con las fallas eléctricas o de control.

Gráfico 3. Modos de fallo



Fuente: Autores

El asunto de las fallas en el sistema de control de los equipos es aquel que por la complejidad de algunos sistemas tiende a ser mucho mayor el tiempo para el diagnóstico, sin embargo, el tiempo de reparación es menor en comparación con el sistema mecánico.

6.1.5.4 Auditoría

La auditoría se realizó sobre la estructura y ejecución del mantenimiento de las UBM, en temas como organigrama, personal de mantenimiento, medios técnicos, mantenimiento

preventivo, mantenimiento correctivo, procedimientos, información y stock los cuales fueron evaluados en una escala del 0 al 3, siendo 3 muy favorable.

Tabla 3. Evaluación de auditoría – Organigrama de mantenimiento

1. Organigrama de mantenimiento	
¿Se cuenta con un organigrama de mantenimiento?	3

Fuente: (Renovetec, 2009), ajustado por los autores

Para el tema organizacional se formuló una sola pregunta, la cual indica si se posee o no un organigrama de mantenimiento.

Tabla 4. Evaluación de auditoría – Rendimiento del personal de mantenimiento

2.Rendimiento del personal de mantenimiento.	
¿El organigrama de mantenimiento garantiza la presencia de personal de mantenimiento preparado cuando se necesite, de la forma más rápida posible?	3
¿Hay personal que pueda considerarse ‘imprescindible’ cuya ausencia afecta a la actividad normal del área de mantenimiento?	1
¿El organigrama garantiza que habrá personal disponible para realizar mantenimiento el mantenimiento programado, incluso en el caso de un aumento del mantenimiento correctivo?	2
¿El número de horas extraordinarias que se genera en el área de mantenimiento es habitualmente superior al máximo legal autorizado?	0
¿La cualificación previa que se exige al personal del área de mantenimiento es la adecuada?	3
¿Se realiza una formación inicial efectiva cuando se incorpora un nuevo trabajador al área de mantenimiento?	3
¿Hay un plan de formación para el personal de mantenimiento?	3
¿Este plan de formación hace que los conocimientos en el mantenimiento de la c mejoren?	3
¿El plan de formación hace que los conocimientos en otras áreas de la central (operaciones, seguridad, medioambiente, administración, etc) mejoren?	3
¿El personal de mantenimiento mecánico puede realizar tareas eléctricas o de instrumentación sencillas?	2
¿El personal de mantenimiento mecánico puede realizar tareas eléctricas o de instrumentación especializadas?	1
¿El personal de mantenimiento eléctrico puede realizar tareas mecánicas sencillas?	2
¿El personal de mantenimiento eléctrico puede realizar tareas mecánicas especializadas?	1
¿El personal de mantenimiento está capacitado para trabajar en otras áreas (operaciones, seguridad, control químico, etc)?	1
¿Se respeta el horario de entrada y salida?	3
¿Se respeta la duración de los descansos?	3
¿La media de tiempos muertos no productivos es la adecuada?	3
¿Los tiempos de intervención se ajustan a la duración teórica estimable en que podrían realizarse los trabajos?	2
¿El personal de mantenimiento se siente reconocido en su trabajo?	3
¿El personal de mantenimiento siente que la empresa se preocupa de sus necesidades para poder realizar un buen trabajo?	3
¿El personal de mantenimiento considera que tiene proyección profesional dentro de la empresa?	3
¿El personal de mantenimiento se siente satisfecho con su horario?	3
¿El personal de mantenimiento se considera bien retribuido?	3
¿El personal de mantenimiento está comprometido con los objetivos de la empresa?	3
¿El personal de mantenimiento tiene un buen concepto de sus mandos?	
¿El personal de mantenimiento considera que el ambiente del área de operaciones es agradable?	3
¿El nivel de ausentismo entre el personal de mantenimiento es bajo?	2
¿El nivel de rotación entre el personal de mantenimiento es bajo?	3

Fuente: (Renovetec, 2009), ajustado por los autores

Como se observa en la Tabla 3 con la cual se busca obtener la información sobre el rendimiento de personal de mantenimiento, esto con el objetivo de poder tener una visión de cuales podrían ser las oportunidades de mejora con respecto al personal.

Tabla 5. Evaluación de auditoría – Medios técnicos

3. Medios técnicos empleados en el mantenimiento	
¿Mantenimiento dispone de los medios de comunicación interna que se necesitan(Teléfono satelital, radio, correo, entre otros)?	3
¿Mantenimiento dispone de los medios de comunicación con el exterior que se necesitan?	3
¿Se dispone de los medios de transporte que se necesitan?	2
¿Se dispone de los medios de elevación que se necesitan (carretillas,manlift, entre otros)	3
¿Las herramientas mecánicas se corresponden con lo que se necesita?	2
¿Las herramientas eléctricas se corresponden con lo que se necesita?	2
¿Las herramientas para el mantenimiento de la instrumentación se corresponden con lo que se necesita?	3
¿Las herramientas para el mantenimiento predictivo se corresponden con lo que se necesita?	2
¿Las herramientas de taller se corresponden con lo que se necesita?	3
¿Los equipos de medida están calibrados?	2
¿Existe un inventario de herramientas?	3
¿Se comprueba periódicamente el inventario de herramientas?	3
¿El taller está situado en el lugar apropiado?	3
¿Está limpio y ordenado su interior?	3

Fuente: (Renovetec, 2009), ajustado por los autores

En la tabla 5. se realiza la auditoría para identificar las herramientas que se utilizan, así como la manipulación de estas, mantenimiento de las herramientas, si poseen las

herramientas necesarias para realizar las distintas tareas de mantenimiento y así poder plasmar en nuestro PMO las mejoras en la disposición y manejo de herramientas.

Tabla 6. Evaluación de auditoría- Mantenimiento preventivo

4. Mantenimiento preventivo y plan de mantenimiento.	
¿Existe un plan de mantenimiento que afecte a todos equipos (UBM) significativos del campo?	2
¿Hay una programación de las tareas que incluye el plan de mantenimiento (está claro quien y cuando se realiza cada tarea)?	3
¿La programación de las tareas de mantenimiento se cumple?	2
¿El Plan de mantenimiento se basa en las instrucciones de los fabricantes?	3
¿Se han analizado los fallos críticos de la operación?	2
¿El Plan está orientado a evitar esos fallos críticos y/o a reducir sus consecuencias?	2
¿El plan de mantenimiento se realiza?	2

Fuente: (Renovetec, 2009) , ajustado por los autores

La importancia de la auditoría en la tabla 6 recabe en la evaluación del mantenimiento preventivo y del plan de mantenimiento ya que nuestro objetivo es la optimización del plan de mantenimiento ejecutado en las UBM. La información que se obtiene de la auditoría sobre el mantenimiento preventivo y el plan de mantenimiento es el punto de partida para darle la solución al problema planteado.

Tabla 7. Evaluación de auditoría – Organización del mantenimiento

5. Organización del Mantenimiento correctivo	
¿La proporción entre horas/hombre dedicadas a mantenimiento programado y mantenimiento correctivo no programado es la adecuada?	2
¿El número de averías repetitivas es bajo?	2
¿El tiempo medio de resolución de una avería es bajo?	2
¿Hay un sistema claro de asignación de prioridades?	3
¿Este sistema se utiliza correctamente?	2
¿El número de averías con el máximo nivel de prioridad (o averías urgentes) es bajo?	2
¿El número de averías pendientes de reparación es bajo?	1
¿La razón por la que las averías pendientes no se ejecuta está justificada?	3
¿Se realiza un análisis de los fallos que afectan a los resultados de la operación?	2
¿Las conclusiones de estos análisis se llevan a la práctica?	3

Fuente: (Renovetec, 2009), ajustado por los autores

La importancia de conocer cómo se lleva a cabo el mantenimiento correctivo, sus estrategias y sus acciones es fundamental para lograr los objetivos del PMO. Para establecer las mejoras necesarias en el PMO, se deben hacer a partir de las actividades existentes sobre el mantenimiento correctivo.

Tabla 8. Evaluación de auditoría - Procedimiento

6. Procedimiento de Mantenimiento	
¿Todas las tareas de mantenimiento están documentadas en procedimientos?	1
¿Los procedimientos se realizan conforme al documento y perfectamente entendibles?	3
¿Los procedimientos contienen toda la información que se necesita para realizar cada tarea?	2
¿El personal de mantenimiento recibe formación en los procedimientos, especialmente cuando se producen cambios?	3
¿El proceso de implementación de un nuevo procedimiento es el adecuado?	3
¿Cuándo el personal de mantenimiento realiza una tarea utiliza el procedimiento aprobado?	3
¿Los procedimientos de mantenimiento se actualizan periódicamente?	2

Fuente: (Renovetec, 2009), ajustado por los autores

La gestión documenta es vital para una buena gestión de mantenimiento, de allí la auditoría en este aspecto, la cual nos brinda la información de la planeación de mantenimiento actual y así poder plasmas las oportunidades de mejora.

Tabla 9. Evaluación de auditoría – Análisis de Software

7. Análisis del software de Mantenimiento	
¿Todos los mantenimientos que se realizan se plasman en una orden de trabajo?	3
¿El formato de esta orden de trabajo es adecuado?	3
¿Los operarios de mantenimiento cumplen correctamente estas órdenes?	2
¿Las órdenes de trabajo se guardan en el software de mantenimiento?	3
¿El software de mantenimiento es adecuado?	3
¿El software de mantenimiento aporta información útil para la toma de decisiones?	2
¿El software de mantenimiento aporta información fiable?	2
¿Los jefes de mantenimiento consultan habitualmente la información contenida en el software?	3
¿Los operarios de mantenimiento consultan habitualmente la información contenida en el sistema?	1
¿Se emite un informe periódico que analiza la evolución del departamento de mantenimiento?	3
¿El informe aporta información útil para la toma de decisiones?	3

Fuente: (Renovetec, 2009), ajustado por los autores

Una de las herramientas que se requieren para tener una gestión de mantenimiento efectiva es un software de mantenimiento que permita almacenar, organizar y gestionar la información de manteniendo que en la mayoría de los casos es abundante. El software de mantenimiento permite además manejar los indicadores de mantenimiento las ordenes de trabajo entre otros, para este proyecto la información que se obtiene en auditoría sobre este tema es fundamental, ya que las mejoras que se propondrán sobre el software del mantenimiento implican un costo elevado, por tal razón la información debe ser la más concisa.

Tabla 10. Evaluación de mantenimiento – Stock de repuesto

8. Stock de repuesto	
¿Se ha elaborado una lista de repuesto mínimo que debe permanecer en stock?	3
¿Los criterios empleados para elaborar esa lista son válidos?	2
¿Se comprueba periódicamente que se dispone de ese stock?	3
¿La lista de repuesto mínimo se actualiza y mejora periódicamente?	3
¿Se realizan periódicamente inventarios de repuestos?	3
¿Los movimientos del almacén se registran en el software de mantenimiento?	3
¿El almacén está limpio y ordenado?	3
¿El almacén está situado en el lugar adecuado?	2
¿Es fácil localizar cualquier repuesto?	3
¿Las condiciones de almacenamiento son correctas?	3
¿Se realizan comprobaciones del material cuando se recibe?	2

Fuente: (Renovetec, 2009), ajustada por los autores

La gestión del almacén y manejo de repuestos en temas de mantenimiento ha sido un poco olvidada, sin embargo, es de gran importancia que esté presente por tal razón se consideró en la auditoría. Con la información obtenida se propondrán las mejoras en el manejo del almacén y en el stock de repuestos.

6.2 Análisis de la información

Para el desarrollo del presente ítem, es importante la información recopilada, dado que es la base para el presente análisis.

6.2.1 Hoja de Vida

La Hoja de vida de los equipos en mención, se puede encontrar en el Anexo 1, este documento se realizó con el objetivo de plasmar toda la información e históricos de mantenimientos (correctivos, preventivos, predictivos) Lo cual lo hace relevante para la gestión del mantenimiento porque permite identificar las UBM, teniendo a la mano las características de estos mismas, garantizando una toma de decisiones basada en hechos y no en supuestos.

6.2.2 Taxonomía

La taxonomía propuesta se basó en la normativa de Gestión de Activos, la codificación de equipos se realizó de acuerdo a los subsistemas que se estudian en las UBM (Mecánico, Eléctrico, Control, instrumentación), con el fin de ordenar, clasificar, jerarquizar y codificar todas las Unidades en estudio, de tal forma que permita un control sobre los activos, y sobre todo una mejora en la gestión del área de mantenimiento.

Ilustración 2. Taxonomía de equipos

EQUIPO	CÓDIGO	MODELO	CÓDIGO	SUBSISTEMAS	CÓDIGO	COMPONENTE	CÓDIGO	PARTES MANTENIBLES	CÓDIGO	CÓDIGO MANTENIBLE
UNIDAD DE BOMBEO MECÁNICO	UBM	Luftkin	H	MECÁNICO	MEC	Caja de engranajes	C	RODAMIENTOS	1	UBMMECC1
								ENGRANAJES	2	UBMMECC2
								SELLOS	3	UBMMECC3
								EJES	4	UBMMECC4
								CARCAZA	5	UBMMECC5
				ELÉCTRICO	ELE	Motor	M	RODAMIENTOS	6	UBMHELE6
								EJES	7	UBMHELE7
								EJE	8	UBMHELE8
								BLOQUE DE BORNES	9	UBMHELE9
								VENTILADOR	10	UBMHELE10
								CARCAZA	11	UBMHELE11
								ROTOR	12	UBMHELE12
								ESTATOR	13	UBMHELE13
								CIRCUITO DE CONTROL	14	UBMHELE14
								CIRCUITO INTERMEDIO	15	UBMHELE15
				INSTRUMENTACIÓN	INS	Variador de frecuencia	V	INVERSOR	16	UBMINSU16
								CIRCUITO DE CONTROL	17	UBMINSU17
								RED	18	UBMINSU18
				CONTROL	CTR	SCADA	C	PLC	19	UBMCTR19
									20	UBMCTR20
									21	UBMCTR21

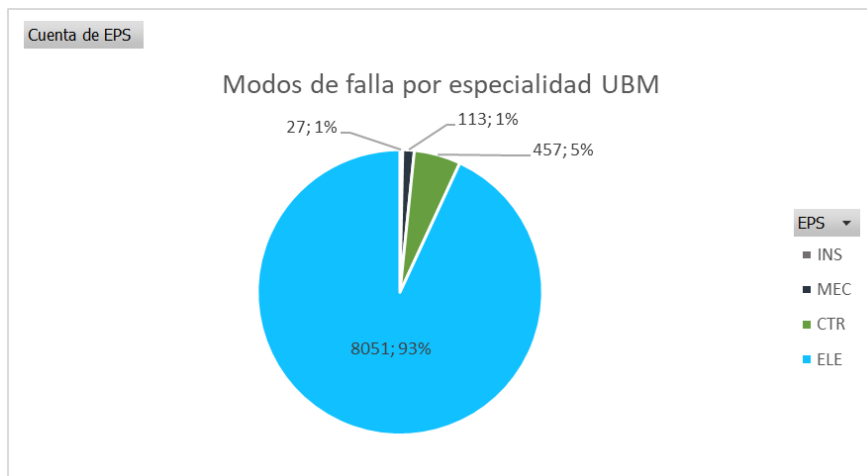
Fuente: Autores

Para más información y una mejor visualización por favor dirigirse al anexo No 2.

6.2.3 Modos de Falla

Se realizó una compilación de los posibles modos de falla, en categorías según la especialidad (Mecánico eléctrico, instrumentación, control).

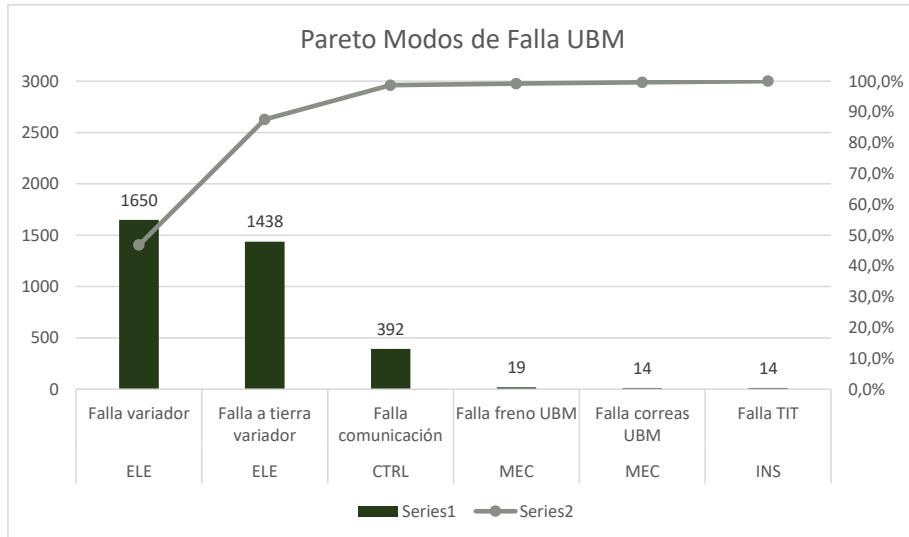
Gráfico 4. Modos de fallo por especialidad



Fuente: Autores

En el gráfico 4, se observan los modos de fallo por especialidad, y se puede concluir que es precisamente los fallos eléctricos los de mayor porcentaje, con un total de 8051 fallos asignados a la misma, lo que indica que es a estos lo de mayor relevancia a la hora de la toma de decisiones y la asignación de tareas.

Gráfico 5. Diagrama de Pareto- modos de falla



Fuente: Autores

EL gráfico 5. Muestra una generalidad de los fallos aplicando Pareto con el fin de puntualizar en el 20% de los fallos, y de esta manera apuntarle a la disminución de los mismos, se puede observar que del 100% de fallos establecidos el 20% corresponde a fallos eléctricos como se había mencionado anteriormente, siendo estos causados por: Falla en el variador y falla a tierra, estos dos son de vital importancia para el proyecto en curso y sobre todo para garantizar el óptimo funcionamiento de las máquinas.

6.2.4 Auditoría de mantenimiento

Al conocer la situación actual del departamento de mantenimiento, se pudo notar que los aspectos a mejorar, son: medio empleados para el mantenimiento, personal asignado a la ejecución de las tareas de mantenimiento, organización y plan de mantenimiento.

Gráfico 6. Resultados de auditoría.



Fuente: Autores

La organización de mantenimiento correctivo es el ítem con menor porcentaje de evaluación, con un valor del 73% lo que realmente refleja la situación actual y por tanto las actividades de mantenimiento se enfocan para mejorar estos valores, esto sucede porque hay una serie de averías que no se realizan en un tiempo prudente y quedan como pendiente, generando horas de paradas prolongadas que afectan toda la gestión del mantenimiento.

6.3 Propuesta(s) de solución

A continuación, se muestra el plan de mantenimiento inicial:

Tabla 11. Plan de mantenimiento inicial

Especialidad	Frecuencia Semanas	Descripción tarea	Horas / Hombre
Mecánica	21	Ajustar los tornillos de conexión de la UBM	2,52
Mecánica	21	Alinear conjunto motor-bomba	0,67
Mecánica	21	Alinear caja reductora	3,52
Mecánica	21	Lubricación de grasa a cada punto	2,23
Mecánica	21	Tomar de muestra de aceite a la caja reductora	2,12
Mecánica	21	inspección estado meca, previo a	1,24
Mecánica	21	inspección a la caja reductora	2,21
Mecánica	21	Inspección previa al mantenimiento	0,50
Mecánica	21	Mantenimiento general (limpieza, apriete, lubricación, ajuste, anticorrosión de piezas) a UBM	0,62
Mecánica	21	Inspección previa al mantenimiento Preventivo	0,49
Mecánica	21	Tomar de muestra de aceite a la caja reductora	2,12
Mecánica	21	Apretar todos los tornillos de la UBM	4,90
Mecánica	21	Apretar el Pin Crank	4,90
Mecánica	21	Estado de la polea (Canales)	2,52
Electricidad	9	inspección y mantenimiento a tablero de control	3,13
Electricidad	9	Mantenimiento a red cableada	3,13
Electricidad	21	Inspección a sistema puesta a tierra de la UBM	0,74
Electricidad	21	Mantenimiento general (limpieza, apriete, lubricación, ajuste, anticorrosión de piezas) a Variador de velocidad.	1,49
Electricidad	21	Mantenimiento a Centro Control de Motores	0,50
Electricidad	21	Mantenimiento a Transformador de potencia	0,46
Electricidad	21	Mantenimiento a motor UBM	4,84
Electricidad	21	Mantenimiento preventivo a Centro Control de Motores	0,80
Electricidad	21	Toma de parámetros de operación a UBM (Voltajes, Corrientes, # Strokes)	0,87
Electricidad	21	Validación de parámetros variador de frecuencia	0,87
Electricidad	21	verificar cumplimiento de la NTC Retie	0,55
Electricidad	21	Comprobar estado caja reductora (Inspección visual aceite, engranajes y rodamientos)	1,05
Electricidad	21	Mantenimiento e inspección de Sistema de puesta a tierra (Medir resistencia)	0,52
Electricidad	44	Mantenimiento a Transformador de potencia	0,46
Electricidad	44	Mantenimiento a transformador (Prueba de rigidez dieléctrica del aceite)	0,53
Instrumentación	9	Mantenimiento preventivo al sistema de control	0,48
Instrumentación	9	Mantenimiento de red del sistema de control	1,74
Instrumentación	9	Pruebas funcionales al sistema de control	1,73
Instrumentación	44	Mantenimiento preventivo a Transmisor de Temperatura	0,60
Instrumentación	44	Mantenimiento preventivo a Transmisor de Presión	0,60

CBM	9	Análisis de aceite a la caja reductora	2,12
CBM	13	Análisis de Termografía a UBM	1,24
CBM	13	Análisis de Vibraciones a UBM	1,04

Fuente: Autores

Como se puede apreciar en este plan de mantenimiento tiene un total de 60,02 Horas Hombre, asociadas a 37 tareas de mantenimiento para cuatro especialidades que se defienden como primordiales.

Como propuesta de solución se unifican y centraliza las actividades de mantenimiento, creando un plan más robusto con un alcance específico, cuantificando los recursos y las horas hombre a ser empleadas con una frecuencia específica de intervención con proyección a un año.

Plan de Mantenimiento Preventivo + Predictivo para unidad de bombeo Mecánico Convencional

Equipo	Sistema	Ítem	Ítem	Operación	Descripción tarea	Descripción de la actividad	Recursos	Frecuencia en semanas	Horas Hombre
Unidad de bombeo mecánico	Cojinetes y ensambles	1	Cojinete de centro	MEC-1	Limpieza, engrase y ajuste de cojinete de centro.	<p>A) Se debe desarmar el cojinete central, realizar inspección de su estado actual (evidenciar en la superficie: fatiga, descargas eléctricas, desgaste abrasivo, desgaste adhesivo, corrosión, indentación y desgastes propios del cojinete).</p> <p>B) Si el cojinete se encuentra en buen estado, limpiar todos sus componentes internos y garantizar que no existan taponamientos en la grasera y en su desfogue, por último, ensamblar el cojinete.</p> <p>C) Limpiar y verificar el correcto funcionamiento de las líneas de lubricación, instalar el retenedor de alta presión.</p> <p>D) Aplicar la grasa suficiente hasta evidenciar la salida de esta por el desfogue.</p> <p>E) Realice una limpieza final y deje el área libre de consumibles (trapos, lubricantes) y herramienta.</p>	1 Mecánico A 1 Mecánico B	21	2,32
				MEC-2	Torque y ajuste de poste maestro (Post Sampson)	<p>A) Apretar los tornillos y tuercas de fijación a la unidad, se debe garantizar su correcto ajuste, de ser posible con un torquímetro.</p> <p>B) Realizar una limpieza final y dejar el área libre de consumibles (trapos, lubricantes) y herramienta.</p>	1 Mecánico A 1 Mecánico B	21	1,68
		2	Cojinete Compensador	MEC-3	Limpieza, engrase y ajuste de cojinete de Compensador.	<p>A) Se debe desarmar el cojinete central, realizar inspección de su estado actual (evidenciar en la superficie: fatiga, descargas eléctricas, desgaste abrasivo, desgaste adhesivo, corrosión, indentación y desgastes propios del cojinete).</p> <p>B) Si el cojinete se encuentra en buen estado, limpiar todos sus componentes internos y garantizar que no existan taponamientos en la grasera y en su desfogue, por último, ensamblar el cojinete.</p> <p>C) Limpiar y verificar el correcto funcionamiento de las líneas de lubricación, instalar el retenedor de alta presión.</p> <p>D) Aplicar la grasa suficiente hasta evidenciar la salida de esta por el desfogue.</p> <p>E) Realizar una limpieza final y dejar el área libre de consumibles (trapos, lubricantes) y herramienta.</p>	1 Mecánico A 1 Mecánico B	21	2,32

			MEC-4	Torque y ajuste del Cojinete Compensador	A) Apretar los tornillos y tuercas de fijación a la unidad, se debe garantizar su correcto ajuste, de ser posible con un torquímetro. B) Realizar una limpieza final y dejar el área libre de consumibles (trapos, lubricantes) y herramienta.	1 Mecánico A 1 Mecánico B	21	1,68
	3	Perno de biela o Pin Crank.	MEC-5	Limpieza, engrase y ajuste de del perno de biela	A) Desarmar el perno de biela: retirar el pasador o pin chaveta, girar la tuerca en sentido inverso a las manecillas del reloj y aplicar una fuerza inversa para sacar el perno de la biela. B) Verificar si el conjunto presenta alguno de estos síntomas (limalla, desajuste mecánico, asentamiento parcial de la camisa) de ser si la respuesta, reportar al supervisor. C) Se debe desarmar el rodamiento, realizar inspección de su estado actual (evidenciar en la superficie: fatiga, descargas eléctricas, desgaste abrasivo, desgaste adhesivo, corrosión, indentación y desgaste propios del cojinete). D) Si el rodamiento se encuentra en buen estado, limpiar todos sus componentes internos y garantizar que no existan taponamientos en la grasería y en su desfogue, por último, ensamble el rodamiento. F) Limpiar y verificar el correcto funcionamiento de las líneas de lubricación, instalar el retenedor de alta presión. G) Aplicar la grasa suficiente hasta que se evidencie la salida de la misma por el desfogue. H) Realizar una limpieza final y dejar el área libre de consumibles (trapos, lubricantes) y herramienta.	1 Mecánico A 1 Mecánico B	21	2,32
			MEC-6	Torque y ajuste del muñón	A) Ajustar la tuerca posterior del Pin Crank de ser necesario utilizar la ayuda Mecánica, neumática o eléctrica para garantizar el correcto ajuste de la camisa con la biela y la tuerca. B) Marcar con marcador de pintura la posición en la cual queda ajustado en conjunto y por último instale el pin chaveta.	1 Mecánico A 1 Mecánico B	21	1,6
Caja reductora	4	Sistema de lubricación caja reductora	MEC-7	Chequeo nivel y estado del aceite	A) Verificar el nivel de aceite de la caja reductora, si el nivel está por debajo del mínimo establecido, realizar el completamiento respectivo, asegurar que sea de las mismas especificaciones del aceite que ya está en la caja reductora. B) Si el aceite no tiene una apariencia aceptable o de "lechoso" o con presencia de agua, reporte de inmediato al supervisor.	1 Mecánico A 1 Mecánico B	21	0,96

			MEC-8	Tomar muestra de aceite de la caja reductora.	A) Con una manguera nueva tomar la muestra de la parte interior media en el colector de aceite o si es posible al interior de la caja. B) Liberar la presión en la bomba de vacío. C) Depositar la muestra en un recipiente nuevo de preferencia limpio, y cuando esté en el nivel que se requiere, detener el paso del fluido. D) Enviar la muestra al laboratorio lo más pronto posible, así se podrá tener un diagnóstico oportuno y asertivo.	1 Mecánico A 1 Mecánico B	21	2
			MEC-9	Torque y ajuste de los tornillos y tuercas que sujetan la caja reductora.	A) Apretar los tornillos y tuercas de fijación de la caja reductora, se debe garantizar su correcto ajuste, de ser posible con un torquímetro.	1 Mecánico A 1 Mecánico B	21	1,68
Motor eléctrico	5	Motor eléctrico	MEC-10	Torque y ajuste a los puntos de anclaje del motor	A) Apretar los tornillos y tuercas de fijación del motor, se debe garantizar su correcto ajuste, de ser posible con un torquímetro.	1 Mecánico A 1 Mecánico B	21	1,68
Sistema de Potencia	6	Correas	MEC-11	Inspección y verificación del estado de las correas	A) Retirar el protector de correas. B) Inspeccionar y verificar el estado de las correas (desgaste lateral o en la base, pérdida de forma, grietas, contaminación por aceite o ruido). C) Verificar la alineación y tensión de las correas. D) Si presenta alguno de los síntomas de falla anteriormente mencionado reportar de inmediato a su supervisor, si la falla es crítica cambie la correa por una nueva.	1 Mecánico A 1 Mecánico B	21	1,52
	7	Poleas	MEC-12	Chequear el estado de las poleas	A) Validar si se evidencian alguno de los siguientes síntomas de falla: rotura, agrietamiento, desgaste en las gargantas. B) Verificar si el perfil de la polea está dentro de los límites admisibles. C) Verificar la alineación de la polea con respecto al eje, posteriormente, ajuste y dé tensión a las correas.	1 Mecánico A 1 Mecánico B	21	1,52
	8	Protector de correas	MEC-13	Chequear el estado del protector de correas	A) Verificar el estado del protector de correas y buscar síntomas como: oxidación, rigidez, huecos o porosidades propias del material. Se requiere que su estructura sea fuerte y no permita el paso de agua directa a las correas.	1 Mecánico A 1 Mecánico B	21	0,96
Sistema de frenado	9	Freno	MEC-14	Revisión del estado de freno de UBM	A) Realizar pruebas funcionales al sistema de freno, verificando que cada uno de los componentes estén en perfecta operación. B) Realizar la graduación de frenos, verificar que no existan elementos extraños entre la banda y el volante.	1 Mecánico A 1 Mecánico B	21	4

Todos	10	Pruebas funcionales	MEC-15	Pruebas funcionales y de calidad de la UBM	A) Apretar todos los tornillos y tuercas de fijación a la unidad, se debe garantizar su correcto ajuste, de ser posible con un torquímetro. B) Realizar una limpieza final y dejar el área libre de consumibles (trapos, lubricantes) y herramienta. C) Realizar las pruebas funcionales correspondientes UBM evitando: Fugas, ruidos y cualquier otro parámetro fuera de rango.	1 Mecánico A 1 Mecánico B	21	1,6
Eléctrico	11	Variador	ELEC-1	Toma de Parámetros de variables operativas	A) Bloquear y poner etiqueta de trabajo eléctrico. B) Medir: Voltajes, Corrientes, Potencia, Temperatura, Condensadores y aislamiento de la acometida, Stokes y/o otros. C) Chequear que el variador este en su normal funcionamiento, así como su programación, que no presente ruidos anormales. D) De encontrar alguna desviación realizar los ajustes correspondientes.	1 Electricista A	21	0,72
	12	Gabinete	ELEC-2	Inspección, Limpieza y mantenimiento de gabinete	A) Validar el estado de la pintura, oxidación, desajuste, chapa, empaque y rigidez de este. B) Realizar limpieza general al gabinete, y ajustar los elementos que se requieran: coraza, cables, canaleta y/o otros. C) Verificar que no existan sulfataciones o presencia de humedad en los bornes. D) Garantizar el correcto funcionamiento del sistema puesta a tierra.	1 Electricista A	21	0,48
			ELEC-3	Componentes internos del gabinete	A) Realizar limpieza e inspección al totalizador principal, brakers, supresores de picos, transformador de control, pilotos de señalización, ventilador, selector, potenciómetro, bornes, botón de parada de emergencia. B) Verificar la integridad de los componentes: roturas, agrietamientos, sobrecalentamiento, pérdida de elementos aislantes entre otros. C) Realizar pruebas funcionales de cada uno de los elementos del numeral anterior evidenciando su correcto funcionamiento.	1 Electricista A	21	8
Sistema de Control	13	Red	INS-1	Pruebas funcionales al sistema de control	A) Realizar pruebas a la red a nivel hardware y software. B) Chequear la configuración del HMI, lógica de control, y garantizar que se estén generando las bases de datos y los historiadores.	1 Instrumentista A	21	5
	14	Transmisores	INS-2	Inspección, Limpieza y mantenimiento a sensores	A) Realizar inspección, limpieza y mantenimiento preventivo al transmisor de temperatura. B) Realizar inspección, limpieza y mantenimiento preventivo al transmisor de temperatura.	1 Instrumentista A	21	0,72

Sistema de potencia	15	Conjunto Motor - Caja Reductora	CBM-1	Termografía	A) Realizar mantenimiento predictivo al conjunto, evidenciando deltas de temperatura y cambios representativos en su incremento (desgaste por fricción o desajuste mecánico). B) Toma de Termografía al motor eléctrico. C) Toma de termografía a las poleas y las correas. D) Toma de termografía a Cojinetes de centro y de cola. E) Toma de termografía a Pin Crank. F) Toma de termografía a Freno Mecánico.	1 Técnico CBM A	8	2
Sistema eléctrico	16	Gabinete, Variador, Conjunto motriz UBM	CBM-2	Vibraciones	A) Realizar toma de vibraciones a la caja reductora. B) Realizar toma de vibraciones al motor eléctrico.	1 Técnico CBM A	8	2

Tabla 12. Plan de mantenimiento Propuesto.

7 Impactos esperados/generados

En el numeral presente, se muestran los impactos esperados de acuerdo a las actividades propuestas.

- La optimización del mantenimiento debe garantizar la operatividad de las unidades de bombeo Mecánico, de igual forma, que el aumento en la disponibilidad de las unidades sea superior del 95%.
- La disminución de las horas de mantenimiento conlleva de manera equivalente a la disminución de las horas hombres empleadas para la ejecución de las tareas, por tanto, se espera impactar en el costo de mano de obra favorablemente.
- Se espera que los costos asociados al mantenimiento correctivo, disminuya en un 10% entendiendo que las actividades asignadas en el presente plan de trabajo reducen las paradas y controla los tiempos de respuesta del personal técnico.

8 Análisis financiero

De acuerdo con las oportunidades de mejora encontradas en el plan de mantenimiento, se puede evidenciar una reducción de tiempo en la ejecución a las tareas de mantenimiento para las UBM, teniendo la reducción de 37 a 22 tareas a realizar, y logrando la optimización del tiempo de 120,03 horas a 93,52 horas de tiempo efectivo de ejecución, lo que representa una mejora de los recursos utilizados para la ejecución del plan de mantenimiento.

En el siguiente cuadro se muestra la diferencia de horas de mantenimiento para una UBM, y su costo a nivel de hora hombre, teniendo como referencia el salario promedio de un colaborador técnico.

Tabla 13. Plan Mtto inicial Vs. Plan Mtto Propuesta.

Plan de Mantenimiento	Horas de Mtto para una UBM	Dias de Mtto	\$ COP
Inicial	120,03	17,15	\$ 3.000.843
Propuesta	93,52	13,36	\$ 2.338.000

Fuente: Autores

En la figura se muestra que el tiempo de proyección es contemplado a un año, con una reducción del 22% en horas para mantener la unidad de bombeo, y una reducción de 3,79 días en la ejecución del mantenimiento, es decir, no se emplearán 17,15 días como se venía realizando con el plan de mantenimiento inicial.

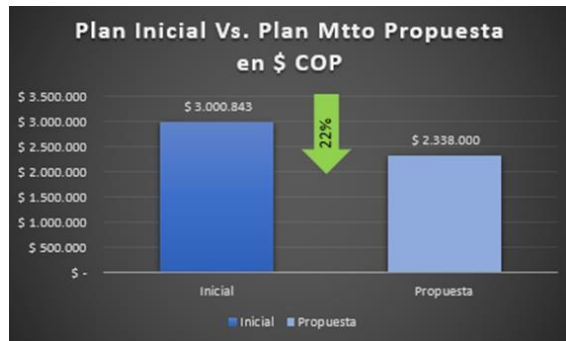
Ilustración 3. Horas de Mantenimiento para una UBM.



Fuente: Autores

En la figura se muestra una reducción de costos de \$ 662.843 por año, este valor corresponde al 22% del costo de la hora hombre que se estaba ejecutando.

Ilustración 4. Plan Mtto Inicial Vs. Plan Mtto Propuesto en \$COP por año.



Fuente: Autores

Si este panorama lo contemplamos para un campo que tiene 692 pozos, y que a su vez tiene 692 UBM a mantener, en un periodo de 1 año, lograría un ahorro aproximado de \$ 458.687.257 COP. Este ahorro se cumpliría si se realiza con disciplina y rigurosidad el plan de mantenimiento propuesto, este se ejecuta 2,66 veces en 1 año.

Tabla 14. Ahorros en \$COP x Número de Pozos

Ítem	\$ COP
Ahorro por UBM	\$ 662.843
Número de Pozos x Campo	692
Ahorro Total	\$ 458.687.257

Fuente: Autores

A la inversión por implementar el plan de mantenimiento propuesto, con costos asociados a los \$458.687.257 COP. Es posible generar ahorros adicionales si se aplica este plan de mantenimiento, como se puede ver en la tabla 15: para un escenario en el cual el equipo objeto de estudio queda fuera de servicio y asumiendo fallas de este tipo para el 10% de las UBM, se estiman ahorros aproximados por \$ 700.832.896 COP.

Tabla 15. Ahorros en \$COP si falla el 10% de las UBM.

Ítem	\$ COP Escenario Promedio
Precio Barril Petróleo promedio Junio 2020	\$ 135.043
Barriles producidos en promedio Hora	0,825
1 Hora de indisponibilidad (Equipo FDS)	\$ 111.410
24 Horas de indisponibilidad (Equipo FDS)	\$ 2.673.843
Ahorro por falla	\$ 10.127.643
Por 7 Fallas en un año	\$ 70.893.501
Para 6 UBM	\$ 425.361.006
Si falla el 10% UBM	\$ 700.832.896

Fuente: Autores

9 Conclusiones y recomendaciones

9.1 Conclusiones

Luego de realizar los análisis a la información que se obtuvo sobre las UBM y el mantenimiento que se le realiza, a través de los datos técnicos y la herramienta de la auditoría, la cual arrojó resultados que nos mostró un panorama completo de la situación de la gestión del mantenimiento que se viene realizando en las UBM, en donde se evidencia el elevado número de fallas que presentan las UBM, como consecuencia de la poca capacitación del personal que ejecutan las actividades de mantenimiento y la planeación no adecuada del mismo.

Para darle solución al problema hallado en la gestión del mantenimiento de las UBM, se realiza la propuesta en base a disminuir el número de fallas y tener una confiabilidad del equipo por encima del 95%, esto tendría consecuencias favorables como es la disminución de las horas hombres en tareas de mantenimiento correctivo y a su vez evitar las pérdidas financieras por las horas de indisponibilidad de las UBM. Realizando las actividades de mejoras del mantenimiento para las UBM plasmadas en este trabajo con toda seguridad se lograría los resultados esperados en la confiabilidad y disponibilidad de los equipos, así obteniendo los alivios presupuestarios que justificarían a realizar las inversiones en mantenimiento requeridas.

9.2 Recomendaciones

- El campo del mantenimiento es sumamente abundante en términos de investigaciones, filosofías, herramientas y procedimientos que se podrían aplicar con el fin de actualizar el trabajo realizado.
- La metodología que se propuso en este proyecto como es el PMO, es una herramienta idónea para realizar las mejoras en el desarrollo de mantenimiento de equipos de distintas industrias y no solo al sector Oil & Gas.
- La disciplina es esencial en el campo del mantenimiento, así que realizar las actividades desarrolladas en el PMO con la disciplina que se requiere, permitirá obtener los resultados esperados.
- La gestión documental es primordial para el buen desempeño del PMO, en virtud de ello se debe realizar con minucioso trabajo los registros de los historiales, informes, estadísticas y una bitácora de mantenimiento a diario.

- La inversión en temas de mantenimiento es fundamental para permitir que los resultados se mantengan en el tiempo, así que no se debe descuidar los temas de las capacitaciones constantes al personal de mantenimiento, actualización de herramientas, mejoras en software de mantenimiento y todo aquello que permita estar en la vanguardia.

10 Bibliografía

- Camacho Juárez, F. A., & Cervantes Biruete, R. (2013). *Desarrollo de un sistema experto para diseño y optimización operativa del bombeo mecánico*. México D.F: Universidad Nacional autónoma de México.
- Castillo Santillán, Á. V. (2017). *Propuesta de mantenimiento basada en confiabilidad de las unidades de bombeo horizontal multietapas del sistema Power Oil de las estaciones Atacapi del B57-LI de Petroamazonas EP*. Riobamba, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Dominguez, J. J. (2012). *Metodología para optimizar estrategias de Mantenimiento en el área de molienda de Incauca S.A.* Cali, Colombia: Universidad autónoma de occidente.
- Estrada Benalcázar, M. d. (2014). *Estudio y aplicación de un programa de optimización de la producción en sistemas de bombeo mecánico con balancín conercial y otras tecnologías en pozos del oriente Ecuatoriano*. Quito, Ecuador: UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR.
- Fibertel, J. (15 de Noviembre de 2007). *gestiopolis*. Obtenido de www.gestiopolis.com: <https://www.gestiopolis.com/rcm-mantenimiento-centrado-en-confiabilidad/>
- Francisco Javier Cárcel Carrasco, C. R. (2013). *Principios básicos de la Gestión del Conocimiento y su aplicación a la empresa industrial en sus actividades tácticas de mantenimiento y explotación operativa: Un estudio cualitativo*. Valencia, España: ISSN: 1697-9818.
- Guevara Miñaca, N. P., & Vallejo Dávalos, P. Á. (2014). *Diseño e implementación de un plan integral de mantenimiento preventivo, seguridad y salud ocupacional en la unidad de bombeo MTU perteneciente a la compañía Fig Oil. CIA.LTDA Coca-Orellana-Ecuador*. Riobamba, Ecuador: Escuela superior politecnica de Chimborazo.
- Ibargo, C. E. (2020). *Optimización del sistema de bombeo mecánico para máxima eficiencia de levantamiento, en tres pozos que presentan interferencia por gas en el campo Palagua*. Bogota: Fundacion Universidad de América.
- Jiménez Martínez, H. R., & Romo Rico, D. (2016). Metodología de operación y mantenimiento (O&M) de pozos, para optimizar la explotación de campos maduros. *Ingeniería Petrolera*, 13.

- King, E. G. (2017). *Disminuir el valor no agregado de Mantenimiento*. Villahermosa, Tabasco, México: PREDICTIVA 21.
- Lufking Argentina S.A. (2008). *Curso de Bombeo Mecanico Oxy*. Rivadavia, Argentina.
- Mujica Benavides, C. A., & Paredes Mendez, E. J. (2014). *Evaluación, análisis y propuesta de optimización de la estrategia de los equipos de bombeo del campo Casabre*. Bucaramanga: Universidad de Santander .
- OMCS Latin America. (2020). *PMO2000™ Planned Maintenance Optimization*. PMO2000™.
- Palencia, O. G. (2007). *Optimización Real del Mantenimiento*. Santiago de Chile: Asociación Chilena de Mantenimiento Industrial ACMI.
- Pedro L. Hernández, J. M. (2008). *Optimización del mantenimiento preventivo utilizando las técnicas de diagnóstico integral. Fundamento teórico- práctico*. Ciudad de La Habana, Cuba: DIAGNÓSTICO.
- Restrepo, H. F. (2014). *Optimización de la programación del mantenimiento de activos de transmisión de energía en ambientes altamente restrictivos y mercado regulado*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Rojas, N. D. (2011). *Apuntes de clase de mantenimiento*. Bogotá: ECCL.
- Romero, W., & Gonzalez, B. (2015). Análisis de fallas en el pasador de la manivela en las unidades de bombeo mecánico de campo Boscán. *Investigaciones Científicas*, 12.
- SAE. (30 de 05 de 2020). Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes. *Norma SAE JA1011*. Commonwealth Drive, EEUU: SAE International.
- Thomson, W. (01 de 06 de 2020). *Aiteco Consultores, SL*. Obtenido de [www.aiteco.com](https://www.aiteco.com/lo-que-no-se-mide/#:~:text=En%20realidad%20la%20frase%20corresponde,se%20mejora%2C%20se%20degrada%20siempre.&text=En%20definitiva%2C%20para%20llevar%20a%20funci%C3%B3n%20directiva%20es%20necesario%20medir):
<https://www.aiteco.com/lo-que-no-se-mide/#:~:text=En%20realidad%20la%20frase%20corresponde,se%20mejora%2C%20se%20degrada%20siempre.&text=En%20definitiva%2C%20para%20llevar%20a%20funci%C3%B3n%20directiva%20es%20necesario%20medir>.
- Vega Castro, J. M., & Álvarez Lacayo , F. A. (2008). *Análisis de los fallas en los sistemas de bombeo mecánico del campo Cantagallo*. Bucaramanga: Universidad de Santander.
- Velázquez Ponce, V. H. (2019). *Optimización del sistema de levantamiento por bombeo mecánico, en la zona sur, sección 73, en el campo Gustavo Galindo*. La Libertar, Ecuador: Universidad Estatal península Santa Elena.

Anexos

A continuación, se relacionan los anexos de acuerdo con el proyecto realizado, en ellos de detallan de mejor manera todos los puntos, gráficos y datos tomados en cuenta en el presente documento.

Anexo 1. Auditoría.

Anexo 2. Listado de UBM.

Anexo 3. Taxonomía.

Anexo 4. Hoja de Vida.

Anexo 5. Modos de falla.

Anexo 6. Plan de Mantenimiento Inicial.

Anexo 7. Plan de Mantenimiento Propuesto.