

Elaboración de los Planes de Mantenimiento Implementando la Metodología “FMECA” Para las Unidades de Bombeo Artificial Tundra (SURE STROKE INTELLIGENT LIFT SYSTEMS).

Oscar Fabian Villalobos Ruiz, Carlos David Polo Roperero

Monografía presentada como requisito para optar por el título de Especialista en Gerencia de Mantenimiento

Director

Jairo Sánchez Collante

Especialista en Gerencia de Mantenimiento y Confiabilidad

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Especialización en Gerencia de Mantenimiento

Bucaramanga

2021

### **Dedicatoria**

*Primero que todo agradecerle a Dios sobre todas las cosas, sin Él no hubiese sido posible estar en esta etapa tan importante de mi vida.*

*Agradecer a mis queridos padres Oscar y Alida por su apoyo incondicional y motivación para lograr las cosas que me propongo. Este logro es también de ustedes.*

*A mi compañera de la vida Luisa y a mi hijo Oscar Manuel que siempre me alentaron a nunca resignar a mis sueños, los amo.*

**Oscar Fabian Villalobos Ruiz**

*Dedicado primeramente a Dios por ayudarme y darme capacidades para gestionar los recursos necesarios para esta etapa.*

*A mis padres, Sares Ropero por apoyarme y Carlos Polo por no hacer ruido durante las clases virtuales.*

*Dirigido con mucho cariño a mis hermanos menores, en especial a Carlos Manuel y Laura, son las personas más importantes en mi vida.*

**Carlos David Polo Ropero**

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	9
1. Descripción del Proyecto .....	10
1.1 Planteamiento del Problema .....	10
2. Objetivos .....	12
2.1 Objetivo General.....	12
2.2 Objetivos Específicos.....	12
3. Justificación .....	14
4. Marco Teórico.....	15
5. Marco Conceptual.....	22
5.1 Metodología FMECA.....	22
5.2 Pasos a Desarrollar del FMECA.....	23
5.3 Información Requerida para el Taller FMECA .....	27
6. Marco Legal .....	27
6.1 Uso de la Normativa ISO 14424.....	28
6.2 Uso de la Normativa SAE J1739.....	29
7. Caracterización y Recolección de la Información.....	29
7.1 Equipo de Interés.....	30

7.1.1 Unidad de bombeo TUNDRA.....	31
7.2 Subsistemas y Funciones Principales.....	33
7.2.1 Unidad de bombeo función principal y subsistemas.....	33
7.2.2 Unidad de Potencia.....	35
7.2.3 Centro de Control y Comunicaciones.....	37
7.2.3 Tablero de Potencia Eléctrica.....	38
8. Metodología para el Desarrollo del FMECA.....	39
8.1 Creación de la Plantilla FMECA.....	39
8.1.1 Mecanismos de fallas.....	39
8.1.2 Modo de falla o modo potencial de falla.....	41
8.1.3 Efectos de la falla.....	41
8.1.4 Valoración de los modos de falla.....	42
8.1.4.1 Probabilidad.....	42
8.1.4.2 Consecuencia.....	43
8.1.5 Los métodos de detección de fallas.....	44
8.1.6 Criticidad.....	45
8.1.7 Numero de Prioridad de Riesgo (RPN).....	46
8.1.8 Causas de la falla.....	47
8.1.9 Tareas de mantenimiento.....	48
8.2 Conformación de Equipo para el Desarrollo del Taller FMECA.....	49
8.3 Listado de las Actividades.....	50
9. Conclusiones.....	56
Referencias.....	58

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. <i>Patrones de falla en función del tiempo</i> .....	22
Figura 2. <i>Metodología para realizar un FMECA</i> . .....	26
Figura 3. <i>Plantilla realizada para la caracterización</i> . .....	30
Figura 4. <i>Características internas de la unidad de bombeo TUNDRA</i> . .....	31
Figura 5. <i>Partes importantes que conforman la unidad de bombeo TUNDRA</i> . .....	31
Figura 6. <i>Funciones de los subsistemas de la unidad de bombeo</i> . .....	34
Figura 7. <i>Funciones de los ítems mantenibles de la unidad de bombeo</i> . .....	35
Figura 8. <i>Funciones de los subsistemas de la unidad de potencia</i> . .....	35
Figura 9. <i>Funciones de los ítems mantenibles del subsistema de potencia hidráulica</i> . .....	36
Figura 10. <i>Funciones de los ítems mantenibles del subsistema de potencia hidráulica</i> . .....	37
Figura 11. <i>Funciones de los ítems mantenibles del subsistema de Centro de control y comunicaciones</i> .....	38
Figura 12. <i>Funciones de los ítems mantenibles del subsistema de Tablero potencia eléctrica</i> . ...	38
Figura 13. <i>Diferentes mecanismos de falla según la ISO 14224</i> . .....	40
Figura 14. <i>Categorías de la Probabilidad</i> . .....	42
Figura 15. <i>Categorías de las consecuencias</i> . .....	44
Figura 16. <i>10 métodos de detección de fallas según la Norma ISO 14224</i> . .....	45

Figura 17. *Matriz de valoración RAM*.....46

Figura 18. *Causas de la falla acorde a la norma 14224*.....47

Figura 19. *Tareas de mantenimiento según la norma ISO 14224*.....48

Figura 20. *Mecanismos, modos y detección de fallas asociados a las tareas de mantenimiento para la unidad de bombeo artificial TUNDRA*.....50

Figura 21. *Resultados del taller FMECA para la Unidad de Bombeo*.....51

Figura 22. *Resultados del taller FMECA para la Unidad de Potencia*.....51

Figura 23. *Resultados del taller FMECA para el Control, Comunicaciones y Elementos de seguridad*.....52

Figura 24. *Resultados del taller FMECA para el sistema eléctrico*.....52

Figura 25. *Tareas de mantenimiento para la unidad de bombeo*.....53

Figura 26. *Tareas de mantenimiento para la unidad de potencia*.....54

Figura 27. *Tareas de mantenimiento para el control, comunicaciones y elementos de seguridad junto con el sistema eléctrico*.....55

## Resumen

**Título:** Elaboración de los Planes de Mantenimiento Implementando la Metodología “FMECA” Para las Unidades de Bombeo Artificial Tundra (SURE STROKE INTELLIGENT LIFT SYSTEMS)\*.

**Autor:** Oscar Fabian Villalobos Ruiz, Carlos David Polo Roperó \*\*

**Palabras Claves:** Unidad de Potencia, Unidad de Bombeo, RPN, RAM, Mecanismo de Falla, Modo de Falla, ISO 14224, FMECA.

### Descripción:

Esta monografía se basa en implementar una metodología bastante conocida en el mundo actual, la cual es el “FMECA” cuyo significado es análisis del modo, efecto de falla y criticidad. Esto con el propósito de generar los planes de mantenimiento óptimos y estándar de la unidad de bombeo tundra, elevando la confiabilidad y disponibilidad de estos equipos. La unidad de bombeo tundra se caracteriza por su bajo coste de mantenimiento y una larga durabilidad además de fácil instalación en el pozo por consiguiente se emplea para pozos que aún está en proceso por parte de ingeniería de elegir la unidad de levantamiento adecuada para sacar el mayor provecho a la extracción de crudo.

Para lograr un trabajo completo y exitoso, se inicia con una caracterización de los equipos de interés, comprendiendo que sistemas, subsistemas y componentes lo conforman. Luego se acude a la bibliografía y gente de campo para conocer a fondo el funcionamiento de los sistemas para entrar a más detalle en sus mecanismos de falla y modos de falla.

Los talleres FMECA que se van a desarrollar se basan en las pautas ya mencionadas para buscar establecer los diferentes efectos de falla, criticidad y modos de falla tanto en el equipo global como en sus componentes. Dando como objetivo unos planes de mantenimiento con base en estrategias de mejoramiento de la vida útil y disponibilidad del equipo.

---

\* Monografía

\*\* Facultad de ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Director: Jairo Andrés Sanchez Collante. Especialista en Gerencia de Mantenimiento y Confiabilidad. Universidad Pontificia Bolivariana.

### Summary

**Title:** Elaboration of Maintenance Plans Implementing the "FMECA" Methodology for the Tundra Artificial Pumping Units (SURE STROKE INTELLIGENT LIFT SYSTEMS).\*

**Author:** OSCAR FABIAN VILLALOBOS RUIZ\*\*

**Keywords:** Power Unit, Pumping Unit, RPN, RAM, Failure Mechanism, Failure Mode, ISO 14224, FMECA.

#### **Contents:**

This monograph is based on implementing a well-known methodology in the world today, which is the "FMECA" which means failure mode, failure effect and criticality analysis. The purpose of this is to generate optimal and standard maintenance plans for the Tundra pumping unit, increasing the reliability and availability of this equipment. The Tundra pumping unit is characterized by its low maintenance cost and long durability as well as easy installation in the oil well, therefore it is used for oil wells that are still in the engineering process of choosing the right lifting unit to get the most out of the extraction of crude oil.

In order to achieve a complete and successful work, we start with a characterization of the equipment of interest, understanding which systems, subsystems and components are part of it. Then, bibliography and people in the field are consulted to know in depth the operation of the systems in order to go into more detail on their failure mechanisms and failure modes.

The FMECA workshops to be developed are based on the aforementioned guidelines to seek to establish the different effects of failure, criticality and failure modes in both the overall equipment and its components. The objective is to develop maintenance plans based on strategies to improve the useful life and availability of the equipment.

---

\* Monograph

\*\* Faculty of Engineering Physics and Mechanics. Mechanical Engineering School. Specialization in Maintenance Management. Director: Jairo Andrés Sanchez Collante. Specialization in Maintenance Management and Reliability. Universidad Pontificia Bolivariana.

## Introducción

En el mundo actual se ha venido desarrollando un modelo de globalización a gran escala buscando nuevas fuentes de energía que reemplace al codiciado oro negro, pero no ha sucedido. Es más, la gran industrialización que se experimenta muestra la dependencia que se tiene al petróleo y lo costoso que se vuelve en cierta manera extraerlo, producirlo y refinarlo. Dicho lo anterior, es de suma importancia buscar las herramientas y metodologías más confiables para asegurar el buen funcionamiento de los equipos, donde se evite catástrofes ambientales y en su defecto pérdidas en la producción.

El mantenimiento en el siglo XXI se centra en la disponibilidad y la confiabilidad de los equipos, basándose en sistemas de información donde se almacena gran cantidad de información técnica. Esta organización aventaja a las grandes compañías ya que se puede indagar desde los eventos históricos (fallas, reparaciones) como lo que viene en futuro para el equipo (pronósticos, ciclo de vida). La rivalidad entre los departamentos de mantenimiento y producción se ha dejado a un lado para centrarse en una sola tarea, generar una disponibilidad alta en el equipo junto con una confiabilidad elevada.

El fin de esta monografía es la obtención de un plan de mantenimiento para la unidad de bombeo artificial TUNDRA, desarrollando e implementando la metodología FMECA, conociendo de antemano los sistemas y componentes del equipo además de su ideal funcionamiento, esto conlleva a realizar un asertivo análisis de los mecanismos, modos y efectos de falla presentes. A priori, se busca garantizar una confiabilidad alta según las actividades resultantes.

## 1. Descripción del Proyecto

### 1.1 Planteamiento del Problema

Actualmente con los precios tan volátiles del barril de crudo, la industria oil & gas tiene como principal bandera disminuir los costos en la exploración, producción y posterior refinación del petróleo. El proceso de extracción puede constar o no de un sistema de levantamiento artificial; esto se decide de acuerdo a la presión al interior del pozo, si es capaz de fluir naturalmente el petróleo a la superficie. Los sistemas de levantamiento artificial pueden ser por bombeo hidráulico, por inyección de gas, bombas de varilla y bombas electrosumergibles. La unidad de levantamiento artificial TUNDRA pertenece a las unidades de bombeo hidráulico y consta de dos sistemas básicos:

- La unidad de Bombeo
- La unidad de Potencia

La selección de la unidad de bombeo artificial en un pozo de petróleo es sumamente importante para obtener un positivo costo-beneficio, es decir, a un pozo donde su aporte en barriles es bajo, no se le puede instalar una unidad de levantamiento compleja que requiera un mantenimiento preventivo costoso y un tiempo de parada largo ya que la diferida en estos casos genera repercusiones económicas importantes. Las unidades de levantamiento artificial TUNDRA se caracterizan por tener una fácil instalación del pozo al no contar con una gran estructura, consta de un cilindro hidráulico con triple cámara dual y de contrapeso actúa uno o dos cilindros con

nitrógeno líquido según las fuerzas requeridas en el pozo. Para una mayor eficiencia cuenta con un control lógico de alta tecnología, registrando en tiempo real y monitoreando las condiciones del pozo y de la bomba para que esta última no sufra daños por algún escenario desafortunado, salvaguardando la producción eficiente del pozo.

La unidad de potencia es el centro de control, tiene la habilidad de convertir la energía eléctrica en potencia en hidráulica. El control de la carrera de la unidad de bombeo también es censado para obtener el máximo de eficiencia de acuerdo a la condición del pozo, realizando unas variaciones en las velocidades de la carrera superior y la carrera inferior.

Este tipo de unidad de bombeo requiere una mayor atención ya que en Colombia abunda las unidades de bombeo de varilla rotativa, de bombeo mecánico y bombas electrosumergibles, por lo que el conocimiento de este equipo originario de Canadá sea nulo y pocas empresas conocen de su mantenimiento y de cómo hacerlo de manera correcta y en el menor tiempo posible sin afectar la continua producción.

Este proyecto tiene como fin concebir unas tareas de mantenimiento de las unidades de bombeo TUNDRA, necesarias para un óptimo funcionamiento a lo largo de su ciclo de vida. En primer lugar, se determina el modelo del equipo y su serial en un proceso llamado caracterización del equipo con el fin que el fabricante envíe la información más certera de la instalación, operación y mantenimiento. Para efectuar dicho propósito de crear las tareas de mantenimiento, se escogerá la metodología FMECA para conocer y examinar a detalle el conjunto de efectos de falla, modos de falla, causas de falla y procurar al máximo que no ocurran en la unidad de bombeo.

## 2. Objetivos

### 2.1 Objetivo General

Elaborar los planes de mantenimiento haciendo uso de la metodología “FMECA” acorde a la Norma ISO 14224 (Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment) para las unidades de bombeo artificial TUNDRA (SURE STROKE INTELLIGENT LIFT SYSTEMS).

### 2.2 Objetivos Específicos

Solicitar, compilar y analizar la información sobre las unidades de bombeo artificial TUNDRA, en tres pasos:

Solicitar y compilar información técnica del equipo y ponerse en contacto con el fabricante (manuales de instalación, operación, mantenimiento y de partes).

Realizar proceso de caracterización del equipo, la cual tiene como referencia tomar datos de placa y elaborar una plantilla.

Analizar la información suministrada por el fabricante, de las actividades de mantenimiento que les realizan a las unidades de bombeo artificial.

Realizar a las unidades de bombeo artificial TUNDRA la metodología FMECA, que comprende los modos de falla, efecto y la criticidad, según la norma que rige la gestión de activos petroleros ISO 14224. El desarrollo de la metodología se hará en los siguientes pasos:

De acuerdo a los manuales de partes y de mantenimiento se crean los subsistemas donde irán dirigidos los análisis.

Realizar la plantilla de la metodología FMECA.

Hacer diligenciamiento de la plantilla FMECA.

Concebir tareas de mantenimiento y posteriores recomendaciones que arrojo la metodología FMECA.

Crear las hojas de rutas y asociarlas a los planes de mantenimiento obtenidos del análisis de modos de falla, efecto y criticidad (FMECA) de los diferentes subsistemas.

### 3. Justificación

En Colombia el sector oil & gas (petróleo y gas) repercute de manera absoluta en la economía, como una fuente de exportaciones prioritaria y solvente. Además de los ingresos que entran de manera positiva al país, otorga puestos de trabajo de mano de obra no calificada y calificada en los lugares de influencia (campos petroleros, refinerías) generando una relación beneficiosa con la comunidad, medio ambiente y por consiguiente en su entorno con las regalías.

Ahora bien, las empresas dedicadas a este tipo de negocio de carácter internacional o nacional están interesadas por bajar costos más que todo en mantenimientos. Para ello se buscan alternativas o ideas innovadoras que permitan un alto margen de ganancia en el costo-beneficio de los activos. Sabiendo esto, las unidades de bombeo artificial TUNDRA presentan una serie de ventajas en cuestiones de instalación, operación y mantenimiento.

Por tal razón, es de suma prioridad garantizar la mantenibilidad del sistema de extracción de crudo ya que una parada correctiva o por algún tipo de falla conlleva a una repercusión millonaria a causa de las diferidas (pozo sin producción) y aun peor si se presenta una contaminación al medio ambiente.

Todo lo mencionado sirve de incentivo para desarrollar una indagación de cómo mantener este tipo unidad de bombeo artificial de manera eficiente y bajo costo. La finalidad de realizar la metodología FMECA es llegar al punto de concebir las tareas de mantenimiento y posteriormente los planes de mantenimiento de estos equipos estableciendo los modos de falla con sus respectivas causas y efectos, para así, buscar sortear y si es posible amortiguar los efectos encontrados

#### 4. Marco Teórico

- El Mantenimiento

El mantenimiento no es más que un conjunto de acciones y técnicas encaminadas a garantizar que las máquinas, equipos e instalaciones que hacen parte integral del proceso de producción, estén en las mejores condiciones para trabajar. De esta forma, se logra alcanzar el máximo rendimiento, no solo de los equipos, sino también del proceso de producción, a la vez que se logra, obviamente, mantener la integridad de las personas que hagan parte de cada proceso.

- Cronología del Mantenimiento

Las primeras empresas, contaban con personal que era asignado para cada una de las etapas del proceso de producción y a su vez, se encargaban de reparar las herramientas, máquinas e instalaciones cuando presentaran alguna falla. Teniendo en cuenta lo anterior, y que los trabajadores desarrollaban otras actividades, resultaba muy complicado (por costos y tiempo), terminar un producto y poder ofrecerlo en el mercado. Es por ello y con el fin de aumentar las ganancias disminuyendo las inversiones, que las empresas comenzaron a optar por distribuir a sus trabajadores para realizar tareas específicas, dichas tareas fueron de dos tipos: Tareas/Actividades de operación y tareas/Actividades de arreglo/reparación. Alrededor del año 1930, el empresario Henry Ford, ideó un nuevo esquema para ser implementado en su empresa. Este esquema lo llamó “Producción en cadena”. Este nuevo sistema, consistía en la asignación de responsabilidades de una manera organizada y es así como aparece el concepto del mantenimiento, el cual dependía

íntegramente del departamento de operación, siendo éste el encargado de determinar en qué momentos se debían ejecutar las actividades de reparación.

Con la llegada de la Segunda Guerra Mundial, se comenzó a evidenciar un aumento en la demanda del mercado, por lo que muchas empresas tuvieron que aumentar su producción; y la única forma viable en ese momento, era aumentando significativamente las jornadas laborales. Este incremento en la demanda que experimentaron las empresas, no solo llevó a aumentar las jornadas laborales de los trabajadores sino también, por supuesto, el tiempo de uso de las máquinas e instalaciones en general. Como consecuencia, comenzaron a presentar fallas en su funcionamiento. Sacar los equipos de sus fallas, implicaba detener el proceso de producción y, en consecuencia, tener grandes pérdidas de dinero para la empresa. Es así, como los empresarios comenzaron a darle mayor importancia al mantenimiento y a su implementación rigurosa, lo que llevó a reestructurar sus modelos organizacionales (Olarde C., Botero A., & Cañon A., 2010).

- Clases de Mantenimientos

Según con la norma europea EN 13306: 2017 (Maintenance - Maintenance terminology) existen tantos tipos de mantenimientos, como autores defendiendo sus lógicas propias y distintos alcances. A continuación, se pone en evidencia la información estandarizada de la norma europea EN 13306.

**Mantenimiento Preventivo y Mantenimiento Correctivo**, cuando lo que se desea es mantener el funcionamiento del equipo o instalación y no se cambia para nada las características de los mismos o sus diseños.

**Mantenimiento Programado y Mantenimiento No programado**, cuando se ejecuta el mantenimiento siguiendo un cronograma, en el cual se han asignado fechas, tiempos y recursos para la ejecución de dichas actividades de mantenimiento.

**La ocurrencia del fallo**, cambia la visión del mantenimiento preventivo con respecto al correctivo. Estos mantenimientos, no buscan cambiar las características ni diseños de los equipos, solo buscan sacarlos de los fallos para poder continuar con el servicio en cuestión.

**El Mantenimiento Activo** es el que se ejecuta una vez se ha analizado el resultado del seguimiento y monitoreo que se realiza juiciosamente a los equipos o instalaciones. Puede ser Mantenimiento Activo Preventivo o Mantenimiento Activo Correctivo, y esto dependerá de la condición en la que se encuentre el equipo o instalación.

**Mantenimiento Mejorativo**, cuando se desea cambiar algunas características del equipo o su diseño, pero sin afectar o modificar las funciones iniciales.

**Mantenimiento Proactivo:** Con este tipo de mantenimiento, se busca detectar la causa de las fallas, paradas de emergencia, daños, averías, etc. Al tiempo, se implementan soluciones antes que ocurran esas fallas. Esas soluciones pueden incluir cambios en las máquinas e incluso rediseños.

**Mantenimiento basado en Confiabilidad:** Es la integración del mantenimiento preventivo, proactivo y predictivo, llevándolo siempre a darle prioridad a la necesidad de conocer el funcionamiento adecuado del equipo. Lo anterior, hace que sea un mantenimiento completo, dando máxima fiabilidad al éxito del proceso de producción (Sexto, 2018).

- Otras Clases de Mantenimientos

**El Mantenimiento productivo total, de ahora en adelante TPM,** aparece en Japón con el principal objetivo de incrementar la producción y la satisfacción que sienten los trabajadores por las labores realizadas.

El Mantenimiento Productivo Total es uno de los mecanismos para lograr que un sistema integrado por equipos, máquinas e instalaciones, opere adecuadamente. El fin último, alcanzar el máximo rendimiento de los procesos de producción y por supuesto, teniendo que invertir menos para lograrlo.

Para ejecutar el TPM, se necesita la colaboración de todo el personal de la compañía; se conforman grupos y un departamento que estará especialmente dedicado a la implementación de éste y poder así, tener absoluto control.

TPM propone unificar el concepto de mantener y producir, de esta forma se logra calidad en el proceso de producción:

- Apunta a alcanzar la máxima eficiencia del proceso de producción.
- Crea un sistema con el slogan de: cero accidentes, cero defectos y cero averías.

- Se aplica en todos los sectores, incluyendo producción, desarrollo, y departamentos administrativos.
- Se basa en la participación y colaboración activa de todos los niveles jerárquicos de la empresa.
- Busca eliminar o disminuir las pérdidas que se puedan generar cuando se deben hacer mejoras o correcciones al sistema (López, 2009).

**Plan de mantenimiento basado en RCM (*Reliability Centred Maintenance, Mantenimiento Centrado en Fiabilidad*)**, es una de las técnicas utilizadas para implementar correctamente un plan de mantenimiento. Esta técnica, basada en la fiabilidad del equipo, busca disminuir las paradas de emergencia que se puedan presentar en la producción por averías de los mismos. Es una técnica que nació en el área de la aviación y conforme se notó su aplicabilidad y grandes resultados, pasó al área militar y posteriormente, al área industrial. John Moubray definió el RCM como el proceso que permite determinar qué se debe hacer y en qué momento se debe hacer, con el fin que el equipo o máquina continúe haciendo lo que el personal desea que haga. En la actualidad, el RCM se utiliza no solo en el área del mantenimiento, también se emplea para analizar el riesgo o detectar mejoras en los mismos. (Campos-López, Tolentino-Eslava, Toledo-Velázquez, & Tolentino-Eslava, 2018)

**RCA Análisis causa raíz**, implica la revisión de las causas de las fallas que se puedan presentar en los componentes de los equipos. En esos casos, por lo general los estudios se basan en evidencias físicas de las posibles fallas y el apoyo en conceptos de ingeniería. Buscar la causa

de las fallas permite entender y por supuesto, proponer acciones para corregir dichas fallas. Por lo general, esta metodología se basa en el seguimiento al siguiente esquema:

- Conocer con claridad los hechos que han dado origen al evento.
- Conocer a cabalidad las funciones del sistema, así como los elementos que lo integran.
- Establecer las condiciones en las que el sistema operaría de manera “anormal”.
- Hacer hipótesis y listas con las posibles causas de las fallas.
- Descartar las fallas que no tengan sustento científico ni de ingeniería o no apliquen

según el caso.

- Determinar con las restantes hipótesis, la causa raíz del fallo o avería.

Esta metodología se puede apoyar o complementar con otras, por ejemplo, la espina de pescado, siempre y cuando el fin último sea el mismo. (Cendales-Ladino, 2019 )

**FMECA** (Failure Mode and Effect Analysis), es una técnica utilizada para evitar averías, fallas y entender los riesgos de un proceso. Todo lo anterior, mediante la el conocimiento de las causas y los efectos, es así como se pueden establecer los procedimientos para evitar dichas fallas (Aguilar-Otero, Torres-Arcique, & Magaña-Jiménez, 2010).

- Patrones de Falla en Función del Tiempo

A medida que pasa el tiempo y el equipo tiene más años de funcionamiento, es más probable que comience a presentar averías. Sin embargo, estudios realizados con anterioridad,

revelan que la probabilidad de falla y su relación con las horas de trabajo es más complicada.

Existen 6 patrones de falla distintos:

**Patrón A**, donde la falla tiene alta probabilidad de ocurrir al poco tiempo de su puesta en servicio (mortalidad infantil), y al superar una vida útil identificable.

**Patrón B**, o “curva de desgaste”.

**Patrón C**, donde se ve un continuo incremento en la probabilidad condicional de la falla.

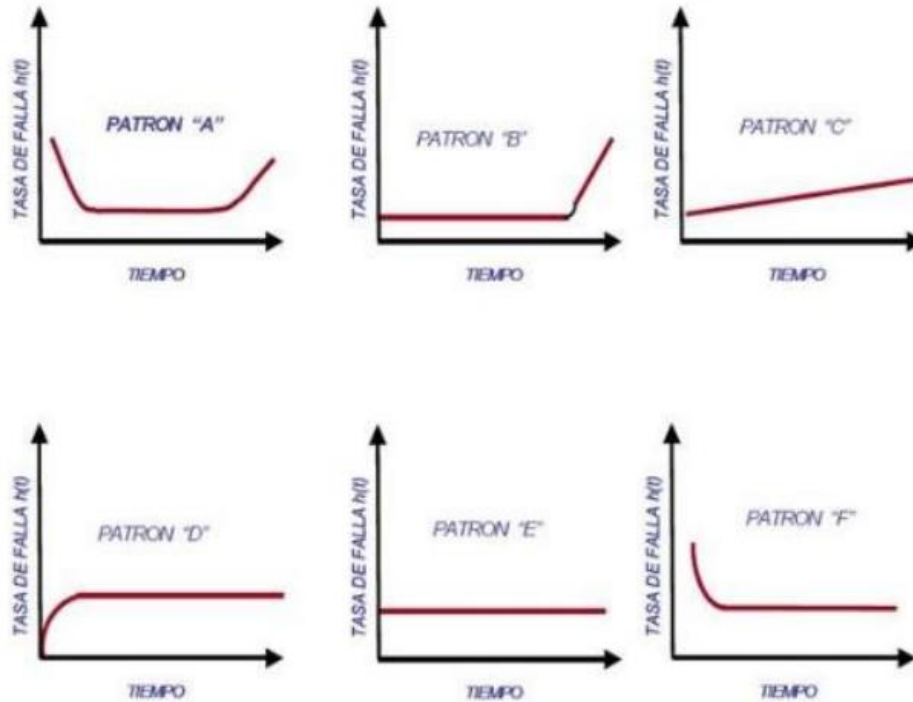
**Patrón D**, donde superada una etapa inicial de aumento de la probabilidad de falla el elemento entra en una zona de probabilidad condicional de falla constante.

**Patrón E**, o patrón de falla aleatorio.

**Patrón F**, con una alta probabilidad de falla cuando el equipo es nuevo seguido de una probabilidad condicional de falla constante y aleatoria (Melendres Quispe, 2019).

**Figura 1.**

*Patrones de falla en función del tiempo*



*Nota:* Mantenimiento Centrado En Confiabilidad (Rcm), 2019.

## 5. Marco Conceptual

### 5.1 Metodología FMECA

Al mencionar la palabra metodología se hace referencia a una serie de pasos lógicos para llegar a un grupo de respuestas y se solucione el problema o los problemas. Por consiguiente, cuando se realiza un FMECA (Failure mode, effect and criticality analysis) se aspira a generar

unas tareas de mantenimiento para evitar las fallas más importantes, que afecten económicamente y la misma integridad del equipo y de las personas.

En el siglo XX, existieron muchos cambios a razón del avance de la industria manufacturera, automovilística y de la aviación, siendo esta última más crítica dado que su función implicaba directamente la vida de las personas, por lo tanto, se fijaron una serie de metodologías entre ellas FMEA, para realizar un análisis a la confiabilidad de los equipos y sus sistemas cada vez más complejos. Con el auge y el descubrimiento de nuevos campos petroleros, los activos se fueron reglamentando y estandarizando bajo una norma que reuniera todas sus metodologías y gestión de los mismos activos, la ISO 14224 “Petroleum, petrochemical and natural gas industries”.

A medida que pasaba el tiempo se incluye un nuevo concepto en la industria, la criticidad. Los equipos están conformados por subsistemas o componentes de mayor importancia unos que otros, es decir, existe una clasificación de acuerdo a su función para el correcto funcionamiento del equipo. El nuevo término introducido daría el rumbo que actualmente se conoce a la metodología FMECA.

## **5.2 Pasos a Desarrollar del FMECA**

A continuación, se explican los pasos a seguir para realizar la metodología FMECA de manera efectiva y acatando las normas que se nombraron acorde a la industria del petróleo.

➤ Personal para realizar el taller: debe contar con un equipo idóneo, con conocimientos claros y estudios acerca del tema, donde se abarquen todas las especialidades involucradas en la instalación, operación y mantenimiento.

➤ Definir el alcance del taller: es importante conocer la dimensión de las fronteras que conforman el límite del estudio; el análisis certero de los componentes involucrados en los diferentes sistemas y subsistemas, para ello se abordaran manuales de fabricante, planos y esquemas de todos los componentes y por último los parámetros operacionales a los cuales estos equipos están sometidos (condiciones meteorológicas, temperaturas, horas de trabajo, entre otros).

➤ Identificar las funciones: los sistemas, los subsistemas y los componentes del equipo deben ser examinados a fondo para establecer las fronteras y realizar de manera eficiente las definiciones de cada función para sacarle el mayor provecho al taller.

➤ Realizar el taller FMECA: después de haber efectuado los anteriores pasos, se procede con determinar y detallar a fondo todos los componentes que involucran todos los subsistemas y sistemas, teniendo en cuenta los siguientes términos y competencias:

- Los métodos de detección de la falla: que tareas se están realizando en el presente para conocer los modos potenciales de falla.

- Los modos potenciales de falla: razón por la que el conjunto de sistemas falla en satisfacer las funciones, pueden haber más de un modo potencial de falla.

- Los mecanismos de falla: cada modo potencial de falla tiene su propio mecanismo para que ocurra la misma.

- Realizar la evaluación a las consecuencias y probabilidad: la ventaja es que este criterio ya está definido por la empresa en su matriz RAM, importante para conocer el nivel de impacto que puede ocasionar en la empresa. Se evalúan los criterios como personas, ambiental, personas, cliente y reputación. Todos estos factores se expresan en forma probabilística y son relevantes para identificar que tantas veces se evidencia el fallo en la industria.

- Los efectos de falla: de todos los escenarios posibles se toma como prioridad el efecto más grave si llegase a ocurrir el modo de falla.

- La criticidad: se adquiere al conocer la consecuencia de la probabilidad.

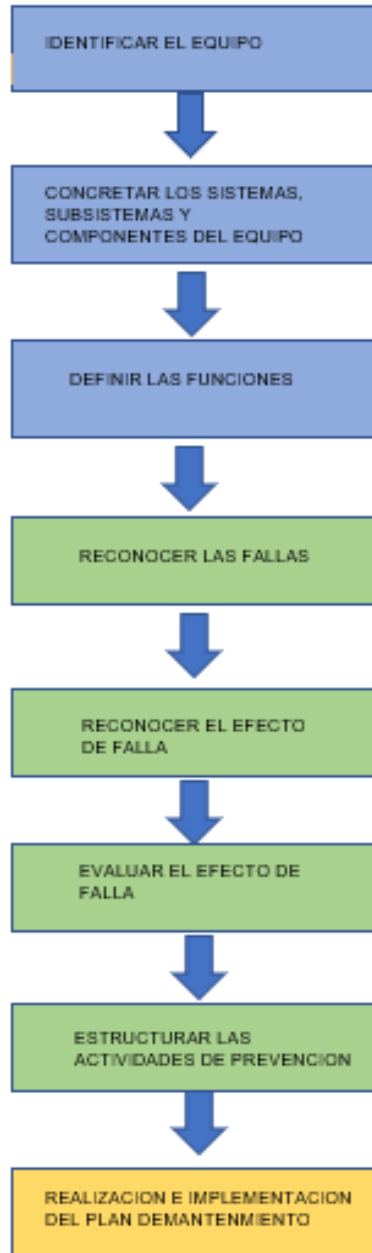
- El cálculo del RPN: es el número de prioridad de riesgo, este número muestra la prioridad que se le debe asignar a cada modo de falla para poder eliminarlo. La operación para obtenerlo es la consecuencia por la probabilidad por la detección del modo potencial de falla.

- Definir las actividades: establecer las diferentes actividades tanto predictivas, correctivas y preventivas con su estrategia (tiempo de ejecución) ya concretada para lograr impedir el modo de falla.

- Realizar informe de resultados: se expide un informe final donde esta detalladamente todo el desarrollo del taller; desde las acciones a realizar como las recomendaciones que se pudieron obtener.

**Figura 2.**

*Metodología para realizar un FMECA.*



### 5.3 Información Requerida para el Taller FMECA

Para completar exitosamente el taller FMECA es de suma importancia poseer información técnica tanto del equipo como de los sistemas que lo conforman. A continuación, se evidencia la información para realizar la metodología:

- Interpretación y análisis de la Norma ISO14224 para generar las plantillas de caracterización de los equipos.
- Exigencias y procedimiento por parte de la empresa para implementar el FMECA.
- Recopilación de la información técnica como manuales del fabricante, data de campo y experiencia de los técnicos encargados en el mantenimiento.
- Hoja de vida del equipo, si es posible desde su puesta en marcha esto con el fin de conocer si hubo cambios en su diseño original o en alguna reparación.
- De parte de producción es importante conocer los datos operacionales en el cual se detalle los límites en su configuración y programación además de su interfaz interna importante en el equipo de interés.

## 6. Marco Legal

Cumpliendo con el buen uso de la normativa actual que permita un correcto y eficiente ejercicio de la metodología FMECA, se efectuaron las normativas descritas a continuación:

## 6.1 Uso de la Normativa ISO 14424

Cuando se habla de gestión de activos en el sector oil & gas siempre se hace referencia a la ISO 14224. En contexto esta normativa internacional ofrece las pautas de cómo abordar un proceso metodológico que involucre la confiabilidad en los mantenimientos de equipos del sector de hidrocarburos, bajo los estándares más altos de calidad en upstream, middlestream y downstream, es decir, en perforación, producción, refinación y transporte.

Lo que busca esta norma es asegurar la información con respecto a:

✓ Planos de diseño de construcción y funcionamiento de los equipos, sistemas y componentes.

✓ Los costos del ciclo de vida del activo.

✓ Detallar datos en los diferentes formatos.

✓ Realizar la debida planeación, optimización y posterior ejecución del mantenimiento.

✓ Especificar datos en formato.

✓ Concretar la clasificación de fallas con su respectiva calificación y conjunto de actividades para que no sucedan:

➤ Causa de falla.

➤ Modo de falla.

➤ Mecanismo de fallas.

➤ Actividades de mantenimiento.

➤ Método de detención.

## **6.2 Uso de la Normativa SAE J1739**

La metodología se desarrolla en gran medida gracias al aporte de esta norma, sirviendo como un paso a paso para la planeación y preparación de un FMECA Y FMEA; se describen como un conjunto de tareas que se evidencian a continuación:

- Identificar y valorar el potencial de efecto y falla en un proceso o equipo.
- Asegurar de manera efectiva las pautas con las cuales se reducen o borran los potenciales de fallas anteriormente identificados.
- Documentar todas las acciones complementarias de acuerdo a lo especificado por la empresa o el cliente.

## **7. Caracterización y Recolección de la Información**

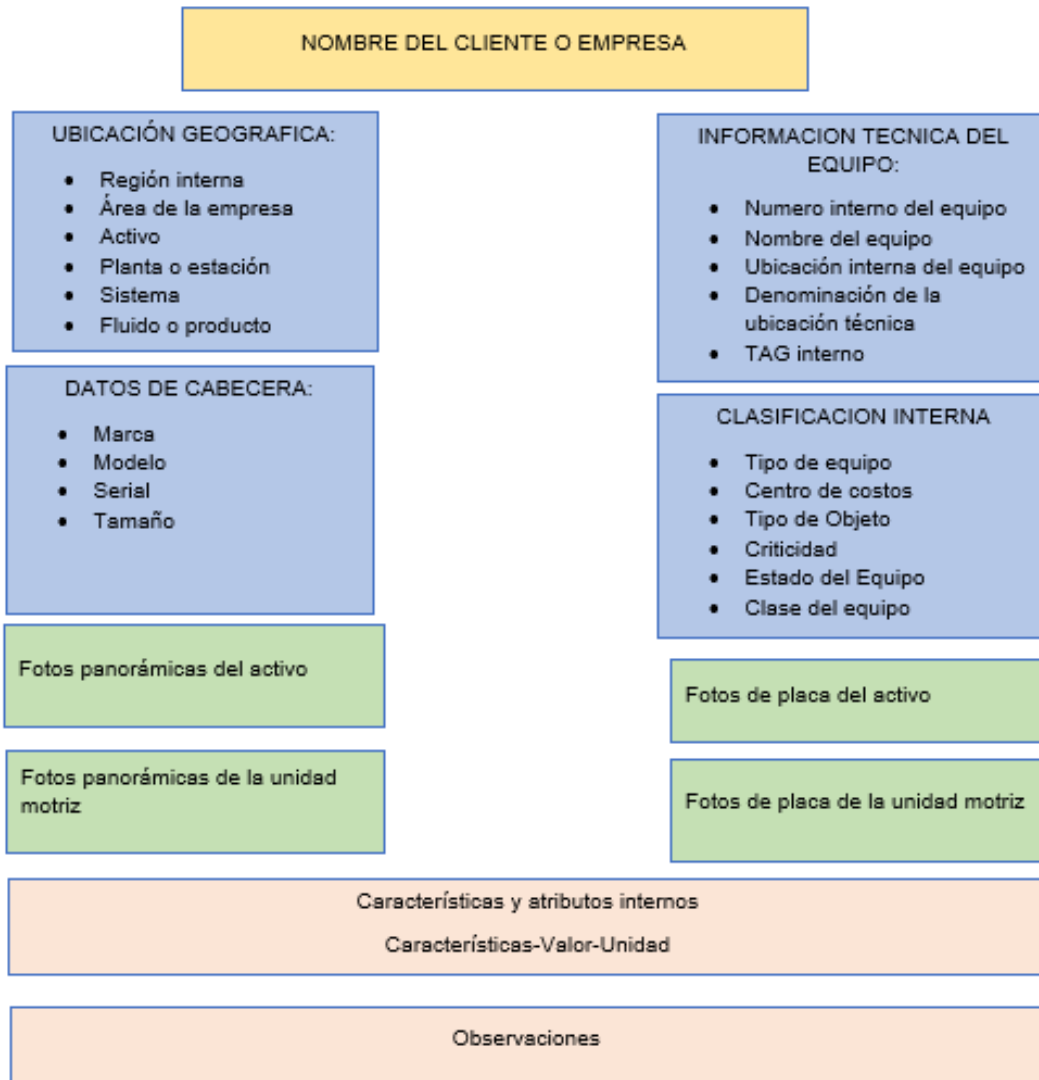
Se realiza el respectivo levantamiento de la información en campo, específicamente en el pozo donde se encuentra ubicada la unidad de bombeo. Se efectúa la toma de datos de placa que contiene: fabricante, modelo y serial; información importante para el desarrollo de la metodología FMECA.

### 7.1 Equipo de Interés

La caracterización se realiza por medio de una plantilla previamente analizada para allí plasmar la información detallada del equipo. El equipo lo conforman dos grandes sistemas los cuales son la unidad de bombeo y la unidad de potencia.

**Figura 3.**

*Plantilla realizada para la caracterización.*



7.1.1 Unidad de bombeo TUNDRA.

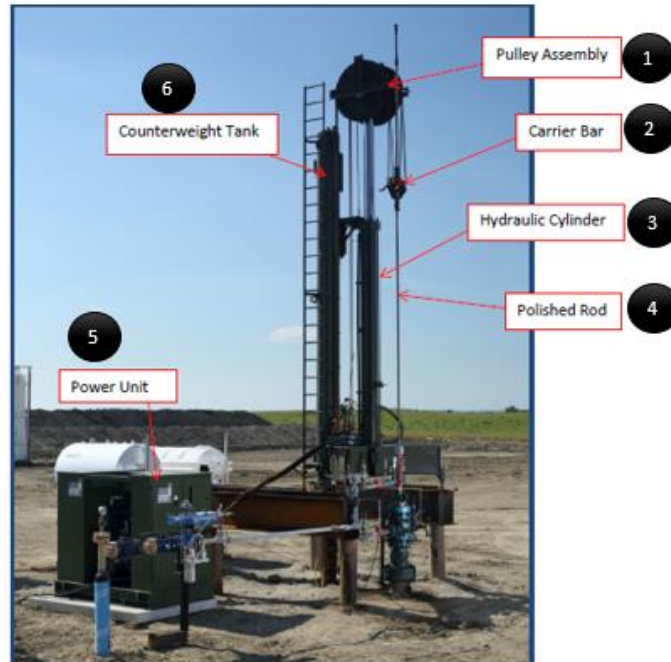
Figura 4.

Características internas de la unidad de bombeo TUNDRA.

ATRIBUTOS INTERNOS DE LA UNIDAD DE BOMBEO TUNDRA		
Características	Valor	Unidad
Marca	Sure Stroke Intelligent Lift™ Systems	
Modelo	400-125-288 GA	
Serie	N. A	
Longitud de la carrera	288	Pulgadas
Carga Máxima	40000	lbs

Figura 5.

Partes importantes que conforman la unidad de bombeo TUNDRA.



- |                         |                         |
|-------------------------|-------------------------|
| 1) Ensamble de poleas.  | 4) Barra lisa.          |
| 2) Barra de enganche.   | 5) Unidad de potencia.  |
| 3) Cilindro hidráulico. | 6) Tanque de contrapeso |

Habiendo mencionado los sistemas y componentes más importantes del equipo, se continúa con una descripción concisa del funcionamiento en términos generales del mismo.

La unidad de bombeo la conforman un cilindro hidráulico de triple cámara y doble efecto, con ayuda de un sistema de contrapesos almacenados en un tanque y con nitrógeno de fluido de trabajo. Este contrapeso aplica grandes fuerzas tanto de subida y de bajada requeridas en el pozo. Posee también un controlador lógico para monitorear el pozo o el rendimiento de la bomba en tiempo real.

La unidad de potencia es el control central y tiene la capacidad de convertir la energía eléctrica en energía hidráulica. Además de prever del control de la carrera necesaria para que la bomba trabaje en óptimas condiciones.

La unidad de bombeo se sitúa por encima de la cabeza del pozo y se acopla a la barra pulida mediante una barra de enganche. La unidad de bombeo está disponible en varios tamaños, dependiendo de la carga máxima que se pueda encontrar. La unidad se compone de un cilindro hidráulico de triple cámara, una base estructural de alta resistencia, uno o dos recipientes de alta capacidad que contienen gas presurizado con nitrógeno y un mecanismo de elevación de polea/cable que duplica el recorrido de la barra de pulida en relación con el recorrido del cilindro hidráulico.

El suministro de gas nitrógeno está conectado a la cámara de contrapeso de los cilindros y sirve de contrapeso, básicamente para compensar el peso del vástago y una parte de la carga de fluido. La fuerza de elevación del contrapeso puede ajustarse en el pozo simplemente ajustando la presión del gas en los cilindros de almacenamiento. La dirección y la velocidad de la bomba se controlan enviando fluido hidráulico bajo presión a las cámaras de subida o de bajada del cilindro.

La unidad de potencia proporciona la fuerza motriz y el control de la unidad de bombeo. Está formada por dos componentes principales: el sistema de bombas hidráulicas y el centro de control y comunicaciones. El sistema de bombas hidráulicas incluye motores eléctricos que accionan bombas de desplazamiento fijo. El sistema incluye un depósito hidráulico sellado y varias válvulas y sensores que controlan la velocidad, las tasas de aceleración/desaceleración y la dirección de desplazamiento del cilindro de triple cámara patentado. La unidad de potencia está conectada a la unidad de bombeo mediante dos mangueras primarias de alta presión y tres mangueras secundarias de control/retroalimentación.

## **7.2 Subsistemas y Funciones Principales**

Conociendo a fondo el funcionamiento de la unidad de bombeo TUNDRA se procede a de acuerdo con la ISO 14224, a aglomerar los subsistemas junto con su función principal junto con los denominados ítems mantenibles. Esto es de gran ayuda para desarrollar satisfactoriamente la metodología FMECA.

### ***7.2.1 Unidad de bombeo función principal y subsistemas.***

La unidad de bombeo tiene como función principal el movimiento (carrera) ascendente y descendente controlada de la barra lisa para la extracción de crudo en el pozo.

La unidad de bombeo posee 4 subsistemas importantes para definir su función. En la siguiente tabla se explica al detalle el funcionamiento de los componentes:

**Figura 6.**

*Funciones de los subsistemas de la unidad de bombeo.*

SISTEMA	SUBSISTEMA	FUNCIÓN
UNIDAD DE BOMBEO	BASE ESTRUCTURAL	Soportar estructuralmente la unidad y sus componentes. Mantener el punto de anclaje de los diferentes elementos y componentes en su ubicación definida por fabricante.
	CILINDRO HIDRÁULICO DE TRIPLE CAMARA	Subir y bajar el sistema de polea que sostiene la barra lisa y su carga (max: 40.000 lbs), con un recorrido máximo de 144 pulgadas, a una velocidad mínima de 0,8 spm y máxima de 5,1 spm.
	CILINDROS PARA CONTRAPESO (NITROGENO)	Compensar el peso de la barra lisa y la carga del fluido. Contener nitrógeno a una presión definida en el PLC (max 1000 psi) por diseño. En placa presión max definida por fabricante 1024 psi.
	MECANISMO DE ELEVACIÓN DE POLEA	Sujetar la barra lisa y soportar la carga (max: 40.000 lbs). Aumentar la relación de movimiento del cilindro hidráulico vs barra lisa 1:2.

Volviendo a mencionar a la norma ISO 14224, los siguientes componentes son ítems mantenibles:

**Figura 7.**

*Funciones de los ítems mantenibles de la unidad de bombeo.*

SISTEMA	SUBSISTEMA	ITEM MANTENIBLE	FUNCIÓN
UNIDAD DE BOMBEO	BASE ESTRUCTURAL	Estructura	Soportar todo el peso de la unidad de bombeo y componentes
	CILINDRO HIDRÁULICO DE TRIPLE CAMARA	Pistón y vástago	Transmitir la energía hidráulica para hacer mover la polea y la barra lisa
		Sellos hidráulicos	Contener y proteger el aceite dentro de la cámara del pistón
	CILINDROS PARA CONTRAPESO (NITROGENO)	Vasija	Contener y proteger el nitrógeno dentro de la cámara.
		Válvulas	Permitir el flujo de nitrógeno en la dirección conveniente y que no se devuelva.
	MECANISMO DE ELEVACIÓN DE POLEA	Polea	Transmitir la fuerza necesaria para mover la barra lisa.
		Guardapolea	Proteger del ambiente y suciedad la polea
		Guaya	Posee gran capacidad de aguantar la carga, mas que todo en la carrera ascendente.
		Cartuchos de lubricación rodillos de la polea	Lubrica la polea para disminuir la fricción en sus partes.

**7.2.2 Unidad de Potencia** La unidad de potencia posee la función principal de transformar la energía eléctrica en energía hidráulica con ayuda de un sistema de control y un tablero eléctrico. A continuación, se van a describir las funciones de los subsistemas de la unidad de potencia.

**Figura 8.**

*Funciones de los subsistemas de la unidad de potencia.*

SISTEMA	SUBSISTEMA	FUNCIÓN
UNIDAD DE POTENCIA	SISTEMA POTENCIA HIDRÁULICA	Entregar aceite hidráulico a 8.45 gpm a una presión máxima de 2200 psi. Contener aceite Hidráulico
	CENTRO DE CONTROL Y COMUNICACIONES	Controlar la carrera de la bomba hidráulica para proporcionar una eficiencia de bombeo optima y Permitir comunicación para monitoreo y control a distancia
	TABLERO POTENCIA ELÉCTRICA	Proteger el equipo y la red eléctrica de sobrecargas y conectar la unidad de bombeo al suministro eléctrico.

De acuerdo con la norma ISO 14224 se establecen los siguientes ítems mantenibles con respecto a cada subsistema.

**Figura 9.**

*Funciones de los ítems mantenibles del subsistema de potencia hidráulica.*

Sistema	Subsistema	Componente	Función
Sistema de Potencia Hidráulica	Motor Ppal (125 HP)	Carcasa	Contener y proteger los elementos internos del motor.
		Estator	Trasmitir la energía eléctrica al motor.
		Rotor	Convertir la energía eléctrica en energía mecánica.
		Rodamientos	Sostener, apoyar y reducir el rozamiento en el motor.
		Acometidas (borneras)	Proteger al motor de imprevistos.
	Motor Secundario (5HP) o de precarga	Carcasa	Contener y proteger los elementos internos del motor.
		Estator	Trasmitir la energía eléctrica al motor.
		Rotor	Convertir la energía eléctrica en energía mecánica.
		Rodamientos	Sostener, apoyar y reducir el rozamiento en el motor.
		Acometidas (borneras)	Proteger al motor de imprevistos.
	Bomba Principal (fija de pistones)	Carcasa	Contener y asegurar los elementos internos de la bomba.
		Sellos	Evitar fugas de producto, mantener la presión, permitir unir los mecanismos y prohibir la entrada de elementos externos a la bomba
		Eje	la energía cinética.
		Pistones	Transmitir la energía hidráulica hasta el cilindro de trabajo.
		Válvulas	Permitir el flujo de producto en la dirección deseada sin posible retorno.
	Bomba secundaria o de precarga	Carcasa	Contener y asegurar los elementos internos de la bomba.
		Sellos	Evitar fugas de producto, mantener la presión, permitir unir los mecanismos y prohibir la entrada de elementos externos a la bomba
		Eje	la energía cinética.
		Pistones	Transmitir la energía hidráulica hasta el cilindro de trabajo.
		Válvulas	Permitir el flujo de producto en la dirección deseada sin posible retorno.
Acople Principal	Manzanas	Permitir la transmisión de energía inerciales de provenientes de los ejes.	
	Araña (Elastómero)	Absorber todas las fuerzas axiales y radiales, se desgasta con el uso.	
Acople secundario o de precarga	Manzanas	Permitir la transmisión de energía inerciales de provenientes de los ejes.	
	Araña	Absorber todas las fuerzas axiales y radiales, se desgasta con el uso.	

**Figura 10.**

*Funciones de los ítems mantenibles del subsistema de potencia hidráulica.*

Sistema	Subsistema	Componente	Función	
Sistema de Potencia Hidráulica	Acople Principal	Manzanas	Permitir la transmisión de energía inerciales de provenientes de los ejes.	
		Araña (Elastómero)	Absorber todas las fuerzas axiales y radiales, se desgasta con el uso.	
	Acople secundario o de precarga	Manzanas	Permitir la transmisión de energía inerciales de provenientes de los ejes.	
		Araña	Absorber todas las fuerzas axiales y radiales, se desgasta con el uso.	
	Deposito de Aceite Hidráulico	Tanque	Almacenar y contener el producto (fluido) del sistema	
	Filtro de aceite	Filtro de aceite hidráulico	Filtro de aceite	Controlar la contaminación de elementos solidos de baja dimension generados en el mismo proceso o por fuentes externas.
			Filtro de humedad	Controlar la contaminación de agua que pueda presentarse por algun elemento externo o interno del proceso.
		Motor	Transformar la energía eléctrica en energía mecánica para mover el cooler.	
	Sistema de refrigeración	Mangueras	Transportar y contener el fluido desde el tanque hasta la bomba.	
		Cooler	Enfriar la temperatura de trabajo del aceite para que no pierda sus propiedades de diseño.	
	Mangueras de alta presión	Manguera Subida Sistema	Contener y transportar el fluido desde la bomba al cilindro hidráulico.	
		Manguera Bajada sistema	Contener y transportar el fluido desde la cilindro hidráulico hasta la bomba.	
Líneas de control y retroalimentación	Manguera retorno de hidráulico	Contener y transportar el fluido desde el cilindro hidráulico hasta tanque.		
	Manguera presión de nitrógeno	Contener y transportar el fluido desde la bomba hasta el deposito de nitrógeno		
	Manguera actuador	Contener y transportar el fluido desde el tanque hasta el cilindro hidráulico.		

**7.2.3 Centro de Control y Comunicaciones.**

La función principal de este centro de control es como su nombre lo indica, controlar todo el recibo y envío de señales originales del activo, ya que esta unidad de bombeo se monitorea en tiempo real y posee un PLC para detectar cualquier funcionamiento irregular ya sea en el subsuelo como en la facilidad de superficie. A continuación de acuerdo a la norma ISO 14224, se desglosan los diferentes ítems mantenibles pertenecientes a estos subsistemas.

**Figura 11.**

*Funciones de los ítems mantenibles del subsistema de Centro de control y comunicaciones.*

Sistema	Subsistema	Elemento	Función
Control, Comunicaciones y Elementos de Seguridad	Suministro de Energía	Baterías	Acumular energía para el arranque de los dispositivos.
	Centro de control y comunicaciones	PLC	Suministrar señales en forma de voltaje para la operación de forma controlada de la unidad de bombeo.
		Baterías	Acumular energía para el arranque de los dispositivos.
		Delay timer	Establecer un periodo de tiempo para la toma valores en el pozo
		Tarjeta rexroth	Servir de enlace entre el PLC y la unidad de bombeo. Monitorea todo el funcionamiento y enciende alarmas por algun mal funcionamiento.
		Barrera intrínsecamente segura	Limitar la energía que entra al circuito para proteger de alguna fuente ignición.
		Sensores de posición	Monitorear en tiempo real la carrera o stroke de la unidad de bombeo
		Cableado	Transmitir la energía eléctrica a los puntos deseados.
	Instrumentación	Manómetros	Leer la presión que existe en el cilindro hidraulico, cabeza del pozo y deposito de nitrogeno.

**7.2.3 Tablero de Potencia Eléctrica**

Por último, el tablero de potencia eléctrica es el encargado de proteger al equipo de sobrecargas eléctricas y de alguna fuente externa que pueda perjudicar el óptimo desempeño del activo. Paso a seguir es según la norma ISO 14224, evidenciar los ítems mantenibles de este subsistema.

**Figura 12.**

*Funciones de los ítems mantenibles del subsistema de Tablero potencia eléctrica.*

Subsistema	Elemento	Funcion
Tablero de potencia	Fusibles	Interrumpir el suministro de corriente eléctrica en caso de alguna sobrecarga.
	Variador	Regular la velocidad de giro o el sentido de giro de los motores eléctricos.

## 8. Metodología para el Desarrollo del FMECA

### 8.1 Creación de la Plantilla FMECA

Como bien es conocido, se ha nombrado en el transcurso del tema la norma ISO 14224 como eje fundamental en la ejecución de la metodología FMECA, analizando e interpretando el funcionamiento del equipo en su conjunto el siguiente paso es crear la plantilla con sus respectivas abreviaciones, valores y códigos examinados.

En aras de realizar un taller FMECA más eficiente y completo, se socializan las tablas con base en los códigos de acuerdo con la ISO 14224 a todos los integrantes del taller. Es importante interactuar en el mismo lenguaje con respecto a estos códigos que suelen ser un poco complejos. La idea de estos códigos es mencionarlos y que se tenga una comunicación para la ejecución del taller.

#### *8.1.1 Mecanismos de fallas.*

Es como su nombre lo indica el mecanismo o varios mecanismos que pueden ocasionar el daño o deterioro y crean los modos de falla. Esto viene asociado por variaciones externas o internas viéndose reflejada en el transcurrir del tiempo, transformando de manera negativa las condiciones iniciales del activo y las propiedades de diseño de los materiales. A continuación, se muestran los 6 agrupadores de acuerdo con la norma ISO 14224:

**Figura 13.**

*Diferentes mecanismos de falla según la ISO 14224.*

Numero	Notación	codigo	Notación	Descripción
1	Fallas mecánicas	1	General	Una falla relacionada con algún defecto mecánico pero donde no se conocen más detalles
		1.1	Fugas	Fuga externa e interna, ya sea líquida o gaseosa: si el modo de falla a nivel de unidad de equipo está Fuga, un mecanismo de falla orientado más causalmente codificado como debe usarse siempre que sea posible.
		1.2	Vibración	Vibración anormal: si el modo de falla en el equipo el nivel es la vibración, que es una orientación más causal mecanismo de falla, la causa de la falla (causa raíz) debería ser grabado siempre que sea posible.
		1.3	Despeje/falla de alineación	Falla causada por una holgura o alineación defectuosa
		1.4	Deformación	Distorsión, flexión, pandeo, abolladuras, ceder, encogerse, ampollas, arrastramiento, etc.
		1.5	Soltura	Desconexión, artículos sueltos
		1.6	Pegar	Adherirse, incautarse, atascarse debido a razones que no sean fallas de deformación o despeje / alineamiento
2	Falla material	2	General	Una falla relacionada con un defecto material pero sin más detalles conocido
		2.1	Cavitación	Pertinente para equipos tales como bombas y válvulas
		2.2	Corrosión	Todos los tipos de corrosión, tanto húmeda (electroquímica) como seca
		2.3	Erosión	desgaste erosivo
		2.4	Desgaste	Desgaste abrasivo y adhesivo, p. puntuación, irritación, raspado, corrosión
		2.5	Rotura	Fractura, brecha, crack
		2.6	Fatiga	Si la causa de la rotura se puede remontar a la fatiga, este código debe ser utilizado.
		2.7	Sobrecalentamiento	Daño material debido a sobrecalentamiento / quema
		2.8	Estallidos	Explosión del artículo, soplado, explotado, implosionado, etc.
3	Falla de instrumentos	3	General	Falla relacionada con la instrumentación, pero no se conocen detalles
		3.1	Falla de control	No, o defectuoso, regulación
		3.2	Sin señal/indicación / alarma	Sin señal / indicación / alarma cuando se espera
		3.3	Señal defectuosa / indicador / alarma	La señal / indicación / alarma es incorrecta en relación con la real proceso. Puede ser espurio, intermitente, oscilante, arbitrario
		3.4	Fuera de ajuste	Error de calibración, deriva de parámetros
		3.5	Falla del software	Fallo, o no, control / monitoreo / operación debido a falla de software
		3.6	Causa común/modo de falla	Varios elementos del instrumento fallaron simultáneamente, p. detectores redundantes de fuego y gas; también fallas relacionadas con una causa común.

4	Falla Eléctrica	4	General	Fallas relacionadas con el suministro y transmisión de energía eléctrica, pero donde no se conocen más detalles
		4.1	Cortocircuito	Cortocircuito
		4.2	Circuito abierto	Desconexión, interrupción, cable / cable roto
		4.3	Sin potencia / voltaje	Falta o insuficiencia de suministro eléctrico
		4.4	Defectuoso potencia / voltaje	Suministro de energía eléctrica defectuoso, p. sobretensión
		4.5	Tierra / falla de aislamiento	Fallo a tierra, baja resistencia eléctrica
5	Influencias Externas	5	General	Falla causada por algunos eventos externos o sustancias fuera del límite, pero no se conocen más detalles
		5.1	Bloqueo / tapado	Flujo restringido / bloqueado debido a suciedad, contaminación, glaseado, aseguramiento de flujo (hidratos), etc.
		5.2	Contaminación	Líquido / gas / superficie contaminada, p. aceite de lubricación contaminado, cabeza del detector de gas contaminada
		5.3	Diverso Influencias externas	Objetos extraños, impactos, influencia ambiental de sistemas vecinos
6	Diversos	6	General	Mecanismo de falla que no cae en uno de las categorías mencionadas anteriormente
		6.1	No se encontró ninguna causa	Fracaso investigado pero causa no revelada o también incierto
		6.2	Causas combinadas	Varias causas: si hay una causa predominante esto debe ser codificado.
		6.3	Otros	Sin código aplicable: use texto libre.
		6.4	Desconocido	no hay información disponible

### 8.1.2 Modo de falla o modo potencial de falla.

Son aquellos que se generan de manera de evento o forma para que un objeto, activo o proceso se vaya a falla y como incurre en la operación normal del mismo afectando a un componente o sistema principal. Los diferentes modos de falla se dividen de acuerdo ISO 14224, por especialidades.

### 8.1.3 Efectos de la falla.

Los efectos de falla hacen referencia al impacto que pueden ocasionar los modos de falla en los subsistemas o componentes que se están analizando. De acuerdo a experiencias en las ejecuciones de estos talleres FMECA es conveniente dejar a cada participante su noción de efectos

de falla en los subsistemas y componentes, suele ser subjetivo. **8.1.4 Valoración de los modos de falla.**

La matriz RAM aporta con sus valores en los modos de falla, de acuerdo al impacto de que pueda tener la falla y la probabilidad de que suceda en la organización. Mas adelante se aborda este tema con mayor claridad y se expone la tabla de matriz RAM.

**8.1.4.1 Probabilidad.** Es importante categorizar las probabilidades de que las fallas sucedan en los equipos de interés, por tal razón se debe conocer el historial del activo de la organización, ya sea de carácter nacional o internacional.

**Figura 14.**

*Categorías de la Probabilidad.*

PROBABILIDAD	
CATEGORIAS	VALOR
Sucede varias veces al año en el departamento. Puede transcurrir en el lapso del año	5
Sucede varias veces al año en la empresa. De probable ocurrencia en un lapso entre 1 a 5 años	4
Ha ocurrido en la empresa en los últimos 10 años	3
Ha ocurrido en la empresa o en la industria	2
No ha ocurrido en la industria	1

**8.1.4.2 Consecuencia.** La consecuencia se ejecuta de acuerdo a las divisiones correspondientes, en total son 5 categorías por las cuales puede ser juzgado una falla. A continuación, se mencionan cada uno de ellos:

✓ **Consecuencia en reputación:** Hace referencia al prestigio que tiene la compañía ya sea en el extranjero o a nivel nacional, pueden influir de manera positiva o negativa por ser fuente de noticia comprometiendo la inversión para futuros proyectos.

✓ **Consecuencia ambiental:** Hace referencia a los impactos ambientales negativos que se puede ocasionar, muy común en el sector oil & gas, ya que se presentan muy seguidos derrames de crudo que afectan de manera irremediable el ambiente y los recursos naturales como el agua.

✓ **Consecuencia económica:** Hace referencia en la mano de obra de mantenimiento, los repuestos y las pérdidas por para realizar las reparaciones.

✓ **Consecuencia a personas:** Hace referencia al ser humano como ser integral con derecho siempre a vivir y a no lesionarse. Se basa en la probabilidad que puede tener en dañar de forma leve, grave o severa un trabajador de la compañía.

✓ **Consecuencia en clientes:** Hace referencia a la calidad del servicio que presta la compañía con respecto a quejas o reclamos por parte de los clientes o inversionistas.

**Figura 15.**

*Categorías de las consecuencias.*

CONSECUENCIAS					
CATEGORIA					VALOR
ECONOMICA (dólar \$)	PERSONAS	AMBIENTAL	REPUTACION	CLIENTES	
X > 10 millones	Una o mas fatalidades de trabajadores o incapacidades permanentes a personal de la comunidad	Mayor	Internacional	Pérdida de participacion	5
1 millón < X <= 10 millones	Incapacidad permanentes (puede ser total o parcial) de trabajadores o incapacidad temporal de personal de la comunidad	Importante	Nacional y con rechazo de un grupo de interés	Pérdida de clientes de importantes mercados o prioritarios	4
100.000 < X <= 1 millon	Incapacidad temporal (mayor o igual a 1 día) de trabajos y hospitalización en centros asistenciales de personal de la comunidad	Localizada	Nacional y sin rechazo de un grupo de interés	Desabastecimiento y/o pérdida de clientes	3
10.000 < X <= 100.000	Lesión menor trabajadores (sin incapacidad) sin hospitalización a personal de la comunidad	Menor	Nacional y baja importancia	Quejas y/o reclamos	2
X <= 10.000	Lesion leve trabajadores (primeros auxilios)	Leve	Local y baja importancia	Incumplimiento de especificaciones del cliente	1
Ninguna	Sin lesión	Ninguna	Ninguna	Ninguna	0

**8.1.5 Los métodos de detección de fallas.**

Es el ejercicio con el cual se evidencia el modo de falla. Con base a la norma ISO 14224 se muestran 10 actividades o ejercicios con las cuales se detectan las fallas. Cabe resaltar que esta tabla de a continuación también ser entregada al grupo que conforma el taller.

**Figura 16.**

*10 métodos de detección de fallas según la Norma ISO 14224.*

Numero	Notación	Descripción	Actividad
6	Mantenimiento periodico	Falla descubierto durante el servicio preventivo, reemplazo o revisión de un artículo al ejecutar el mantenimiento preventivo programa	Horario de actividades
5	Pruebas funcionales	Falla descubierto activando una función prevista y comparando la respuesta contra un estándar predefinido. Esto es un método típico para detectar fallas ocultas	
4	Inspección	Falla descubierta durante la inspección planificada, p. visual inspección, pruebas no destructivas	
3	Monitoreo de condición periodica	Fallas reveladas durante una condición planificada y programada monitoreo de un modo de falla predefinido, ya sea manualmente o automáticamente, p. termografía, medición de vibraciones, aceite análisis, muestreo	
1	Monitoreo de condición continua	Las fallas reveladas durante un monitoreo de estado continuo de un modo de falla predefinido	Monitoreos continuos
2	Interferencia de producción	Falla descubierto por trastorno de producción, reducción, etc.	
8	Observación casual	Observación casual durante controles rutinarios u ocasionales del operador, principalmente por los sentidos (ruido, olor, humo, fuga, apariencia, etc.)	Ocurrencias casuales
10	Mantenimiento correctivo	Falla observada durante el mantenimiento correctivo	
9	Bajo demanda	Falla descubierta durante un intento bajo demanda para activar un unidad del equipo (por ejemplo, la válvula de seguridad no se cierra con la señal ESD, falla iniciar una turbina de gas a demanda, etc.)	
7	Otros	Otro método de observación y / o combinación de varios métodos	Otras

**8.1.6 Criticidad.**

Cuando se menciona la palabra criticidad se hace referencia a la escala de importancia del efecto de falla. La fórmula para obtener el valor es:

**Criticidad= Consecuencia\* Probabilidad**

Según el valor obtenido de la formula se empieza a definir la zona de interés en la matriz RAM. Consta de 4 zonas diferenciadas por colores donde el verde es la criticidad más baja y rojo más alta. A continuación, se explica de forma detallada las zonas de la matriz RAM:

- Criticidad Extrema (Color Rojo y valor oscila 25)
- Criticidad Alta (Color Naranja y valores oscilan entre 15 a 20)
- Criticidad Media (Color Amarillo y valores oscilan entre 5 a 12)
- Criticidad Leve (Color rosa y valores oscila entre 4 a 6).
- Criticidad Nula (Color verde y valores oscila entre 0 a 4).

**8.1.7 Numero de Prioridad de Riesgo (RPN).**

Es el valor obtenido mediante una escala de 1 a 1000, ayuda a jerarquizar y además indica que tan prioritaria es la falla para poderla eliminar. 1000 es el valor más alto y 1 es el valor más bajo.

**Figura 17.**

*Matriz de valoración RAM.*

RAM		PROBABILIDAD				
		1	2	3	4	5
CONSECUENCIA	5	5	10	15	20	25
	4	4	8	12	16	20
	3	3	6	9	12	15
	2	2	4	6	8	10
	1	1	2	3	4	5
	0	0	0	0	0	0

**8.1.8 Causas de la falla.**

Las causas de la falla es el suceso por diseño, por fabricación, por instalación y operación que han desencadenado a la falla del subsistema o componente. Son 6 agrupadores para definir las causas de la falla de acuerdo a la ISO 14224, en la siguiente tabla se evidencia:

**Figura 18.**

*Causas de la falla acorde a la norma 14224.*

Numero	Notación	Código	Notación	Descripción
1	Causas relacionadas con el diseño	1	General	Diseño o configuración de equipos inadecuados (forma, tamaño, tecnología, configuración, operabilidad, mantenibilidad, etc.), pero no se conocen más detalles
		1.1	Capacidad inadecuada	Dimensionamiento / capacidad inadecuados
		1.2	Material inapropiado	Selección de material incorrecta
2	Causas relacionadas con instalación/ fabricación	2	General	Falla relacionada con la fabricación e instalación, pero no más detalles conocidos
		2.1	Error de fabricación	Falla de fabricación o procesamiento
		2.2	Error de instalación	Instalación o falla de ensamblaje (montaje después mantenimiento no incluido)
3	Fallas relacionadas con operación/ mantenimiento	3	General	Falla relacionada con la operación / uso o mantenimiento de la equipo pero no se conocen más detalles
		3.1	Servicio fuera de diseño	Condiciones de servicio no planificadas o no deseadas, p. operación del compresor fuera envoltente, presión encima de la especificación, etc.
		3.2	Erro de operación	Error, mal uso, negligencia, descuidos, etc. Durante operación
		3.3	Error de mantenimiento	Error, errores, negligencia, descuidos, etc. Durante mantenimiento
		3.4	Desgaste esperado y desgarre	Falla causada por el desgaste resultante de operación normal de la unidad de equipo
4	Fallas relacionadas con la gestión	4	General	Falla relacionada con problemas de gestión, pero no más detalles conocidos
		4.1	Error de documentación	Falla relacionada con procedimientos, especificaciones, dibujos, informes, etc.
		4.2	Error de gestión	Falla relacionado con la planificación, organización, calidad aseguramiento, etc.
5	Diversos (miseláneo)	5	Miseláneo - General	Causas que no entran en una de las categorías listados arriba
		5.1	Ninguna causa encontrada	Fracaso investigado pero no se encontró una causa específica
		5.2	Causa común	Causa / modo común
		5.3	Causas combinadas	Varias causas están actuando simultáneamente. Si uno porque la causa es predominante, esta causa debe ser resaltado.
		5.4	Otros	Ninguno de los códigos anteriores aplica. Especifique causa como texto libre.
		5.5	Desconocido	No hay información disponible relacionada con la causa de la falla

**8.1.9 Tareas de mantenimiento.**

Las tareas de mantenimiento se definen como la actividad preventiva que se divide en 3 tipos; preventiva, correctiva y mejorativa. Para ello se adicionan unos recursos como son las horas hombres, cantidad de recurso humano, la estrategia o frecuencia de ejecución, esto con el fin de mitigar el riesgo o eliminar completamente la falla como una opción mejorativa.

Según la ISO 14224 se conforman 12 grupos de acciones de mantenimiento como se muestra en la siguiente tabla

**Figura 19.**

*Tareas de mantenimiento según la norma ISO 14224.*

Numero	Actividad	Descripción	Ejemplos
1	Reemplazar	Reemplazo del artículo por un artículo nuevo o restaurado del mismo tipo y hacer	Reemplazo de un cojinete desgastado
2	Reparar	Acción de mantenimiento manual realizada para restaurar un elemento a su apariencia original o estado	Rempaqué, suelde, enchufe, reconecte, rehaga, etc.
3	Modificar	Reemplace, renueve o cambie el artículo, o una parte del mismo, por un artículo / parte de un tipo, marca, material o diseño diferente	Instale un filtro con un diámetro de malla más pequeño, reemplace una bomba de aceite de lubricación con otro tipo, reconfiguración, etc.
4	Ajustar	Llevar cualquier condición fuera de tolerancia a tolerancia	Alinear, configurar y restablecer, calibrar, equilibrar
5	Reacondicionar	Menor actividad de reparación / servicio para devolver un artículo a una apariencia aceptable, interna y externa	Pulir, limpiar, moler, pintar, cubrir, lubricar, cambiar aceite, etc.
6	Comprobar (Chequear)	Se investiga la causa de la falla, pero no se realiza ninguna acción de mantenimiento o se pospone la acción. Capaz de recuperar la función mediante acciones simples, p. reiniciar o restablecer	Reiniciar, reiniciar, sin acciones de mantenimiento, etc. Especialmente relevante para fallas funcionales, p. detectores de fuego y gas, equipos submarinos
7	Servicio	Tareas de servicio periódico: normalmente no se desmantela el artículo	p.ej. limpieza, reabastecimiento de consumibles, ajustes y calibraciones
8	Probar	Prueba periódica de funcionamiento o rendimiento	Prueba de función del detector de gas, prueba de precisión del medidor de flujo
9	Inspeccionar	Inspección / verificación periódica: un escrutinio cuidadoso de un artículo llevado a cabo con o sin desmontaje, normalmente mediante el uso de los sentidos	Todos los tipos de cheque general. Incluye servicio menor como parte de la tarea de inspección
10	Revisión	Grandes reparaciones	Inspección / revisión general con desmontaje y reemplazo extensos de los artículos según se especifica o se requiere
11	Combinación	Varias de las actividades anteriores están incluidas	Si una actividad domina, esto puede ser registrado alternativamente
12	Otros	Actividad de mantenimiento distinta de la especificada anteriormente	Dominar

## 8.2 Conformación de Equipo para el Desarrollo del Taller FMECA

Es vital tener conformar un equipo de trabajo integro y lleno tanto de actitudes como de aptitudes, en su preferencia debe ser multidisciplinario con amplia experiencia en el área o campo de estudio. Las sesiones se realizan con éxito para trabajar en los temas respectivos y analizar por completo. A continuación, se expone el rol de cada uno en la implementación y desarrollo del taller:

### ❖ Equipo de confiabilidad

Es aquel personal con el conocimiento de mantenimiento en la compañía o área de la empresa; debe conocer los históricos de fallas, informaciones técnicas, tareas de mantenimiento realizadas por el equipo de mantenimiento y las recomendadas por el fabricante.

### ❖ Equipo de mantenimiento

Es aquel personal con el conocimiento de los sistemas, subsistemas y componentes del activo, con amplia experiencia en las actividades de mantenimiento que se le han venido realizando y también aportando con su vasta experiencia laboral.

### ❖ Equipo de operaciones

Es aquel personal con el conocimiento en el funcionamiento del activo y experiencia en el control del mismo, son los encargados directos de revisar extrínsecamente el activo e informar de alguna anomalía. Tienen más contacto con el activo que los demás personales.

### 8.3 Listado de las Actividades

En el presente capítulo se muestran el número de modos de falla, mecanismos y la detección de la falla resultantes junto con la cantidad de tareas asociadas a los mantenimientos.

**Figura 20.**

*Mecanismos, modos y detección de fallas asociados a las tareas de mantenimiento para la unidad de bombeo artificial TUNDRA.*

SISTEMA	SUBSISTEMA	COMPONENTE	MODOS DE FALLA	MECANISMO DE MODO DE FALLA	DETECCION	ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO	
SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL	UNIDAD DE BOMBEO	Base estructural	1	3	1	1	
		Cilindro hidráulico triple cámara	3	6	2	3	
		Cilindros para el contrapeso de nitrógeno	1	1	1	1	
		Mecanismo de elevación de poleas	1	4	1	3	
	UNIDAD DE POTENCIA	Motor Ppal (125 HP)	10	40	8	8	
		Motor Secundario (5HP) o de precarga	10	40	8	8	
		Bomba Principal (fija de pistones)	6	14	5	2	
		Bomba secundaria o de precarga	6	14	5	2	
		Acople Principal	2	2	1	1	
		Acople secundario o de precarga	2	2	1	1	
		Deposito de Aceite Hidráulico	1	2	1	1	
		Filtro de aceite	1	1	1	2	
		Sistema de refrigeración	3	3	1	1	
		Mangueras de alta presión	1	1	1	1	
		Líneas de control y retroalimentación	1	1	1	1	
		CONTROL, COMUNICACIONES Y ELEMENTOS DE SEGURIDAD	Suministro de Energía	1	1	1	1
			Centro de control y comunicaciones	6	20	3	4
	Instrumentación		4	6	3	2	
	SISTEMA ELECTRICO	Tablero de potencia	2	4	2	2	

Por políticas legales de la empresa donde se realizó la metodología FMECA no es posible evidenciar de manera pública los modos de fallas, mecanismos de falla y efectos del sistema de levantamiento artificial. La razón es que la plantilla donde se hicieron todos los análisis es uso exclusivo y propiedad intelectual de la empresa además expresaron que no es posible compartirla bajo ninguna circunstancia.

Figura 21.

Resultados del taller FMECA para la Unidad de Bombeo

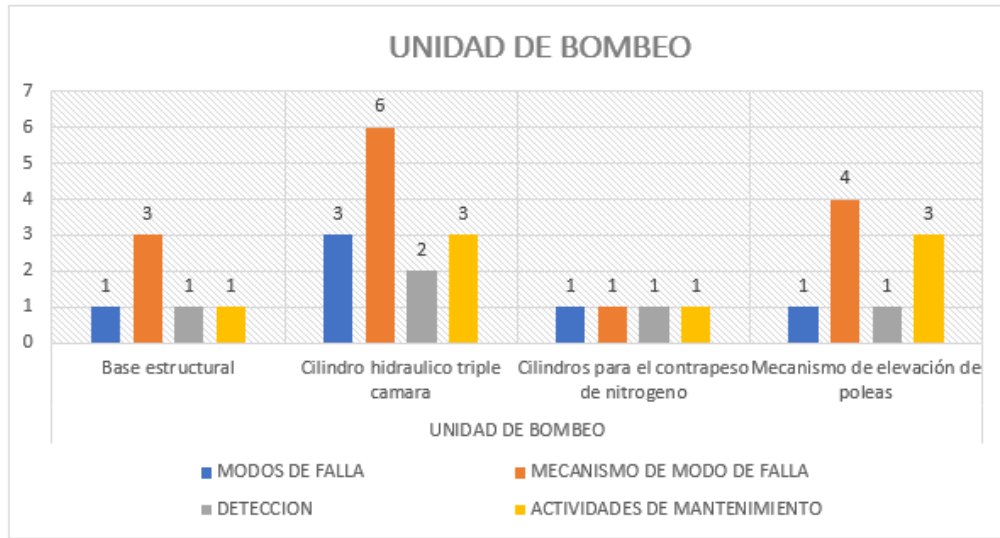
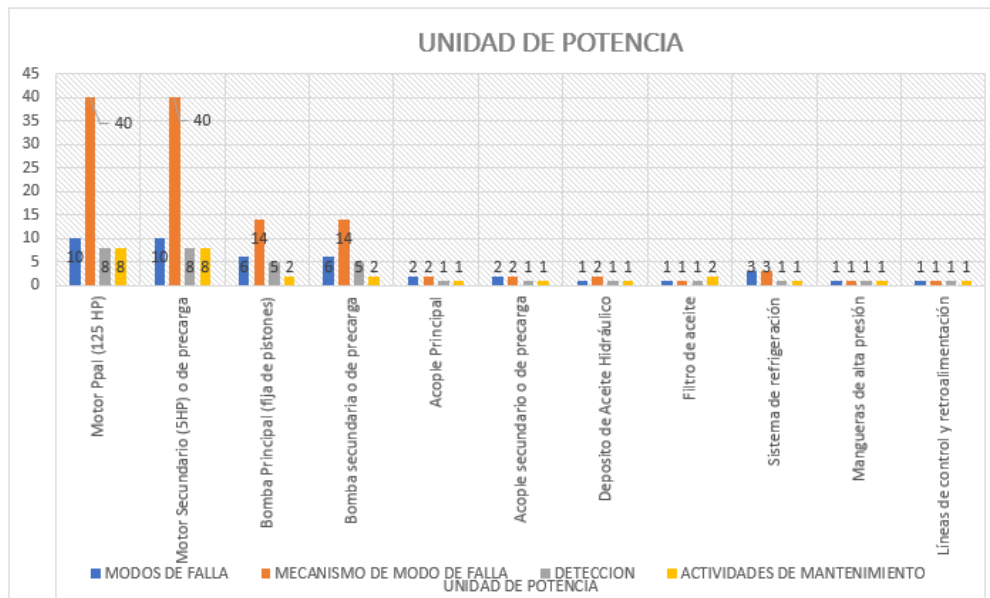


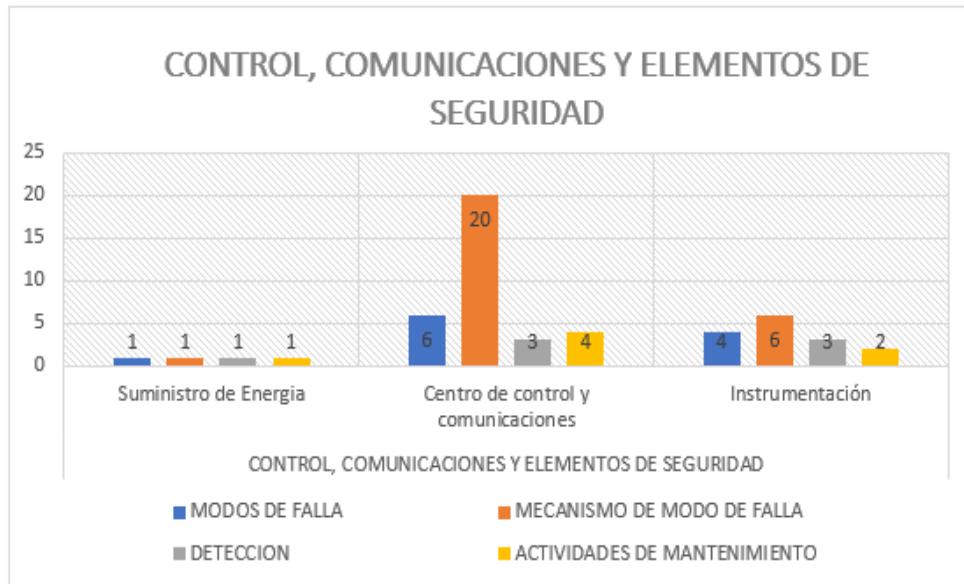
Figura 22.

Resultados del taller FMECA para la Unidad de Potencia.



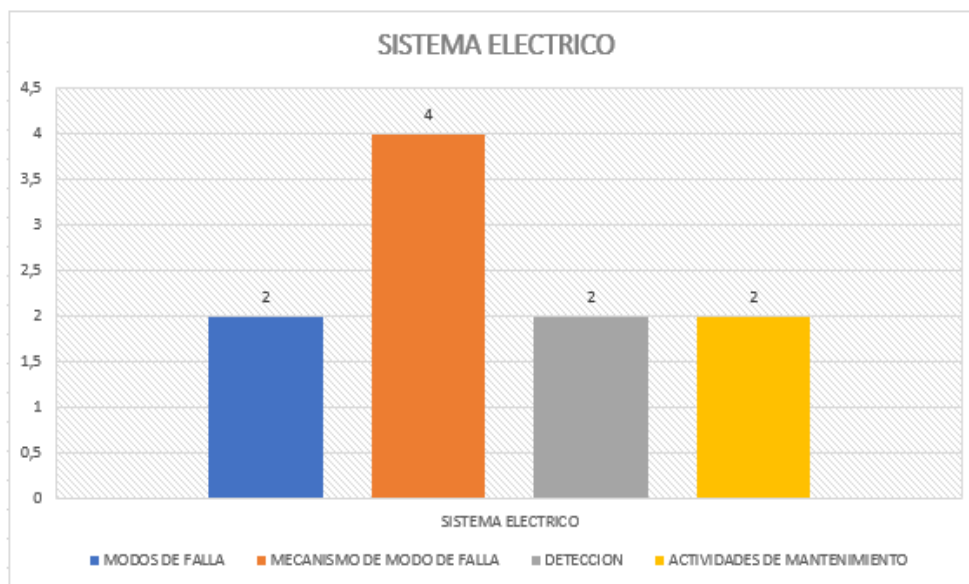
**Figura 23.**

*Resultados del taller FMECA para el Control, Comunicaciones y Elementos de seguridad.*



**Figura 24.**

*Resultados del taller FMECA para el sistema eléctrico.*



Concluyendo se da a conocer las tareas o actividades de mantenimiento como resultado del desarrollo del taller FMECA y las posibles recomendaciones que se evidenciaron en el manual del fabricante por subsistemas

**Figura 25.**

*Tareas de mantenimiento para la unidad de bombeo.*

SISTEMA	SUBSISTEMA	COMPONENTE	Descripcion de la tarea	Numero de personas	Duracion de la actividad	Unidad en Horas	Estrategia
UNIDAD DE BOMBEO	Mecanismo de elevación de polea	Cartuchos de lubricación rodillos de la polea	Reemplazar un elemento por uno nuevo	2	3	H	DIARIA
	Mecanismo de elevación de polea	Guardapolea	Inspección/visión periódica	2	0,6	H	DIARIA
	Mecanismo de elevación de polea	Guaya	Inspección/visión periódica	2	0,6	H	DIARIA
	Mecanismo de elevación de polea	Polea	Inspección/visión periódica	2	0,6	H	DIARIA
	Cilindro hidráulico de triple cámara	Sellos hidráulicos	Reemplazar un elemento por uno nuevo	2	32	H	A CONDICION
	Cilindro para Contrapeso (Nitrógeno)	Vasija	Inspección Scan Á al cuerpo y defectología a soldaduras	2	24	H	2 AÑOS
	Cilindro hidráulico de triple cámara	Pistón y vástago	Reemplazar un elemento por uno nuevo	2	4	H	A CONDICION
	Cilindro hidráulico de triple cámara	Pistón y vástago	Mantenimiento manual para restaurar un elemento a su estado o apariencia original	2	4	H	A CONDICION
	Base estructural	Estructura	Inspección/visión periódica	2	0,6	H	DIARIA
	Mecanismo de elevación de polea	Cartuchos de lubricación rodillos de la polea	Traer dentro de tolerancias cualquier condición que las exceda. Inspeccion visual	2		H	180 DIAS
	Cilindro para Contrapeso	Válvulas	nuevo	2	4	H	A CONDICION

Figura 26.

Tareas de mantenimiento para la unidad de potencia.

SISTEMA	SUBSISTEMA	COMPONENTE	Descripcion de la tarea	Numero de personas	Duracion de la actividad	Unidad en Horas	Estrategia	
UNIDAD DE POTENCIA	Líneas de control y retroalimentación	Manguera actuador	Reemplazo de mangueras	2	2 H	A	CONDICION	
	Líneas de control y retroalimentación	Manguera presión de nitrógeno	Reemplazo de mangueras	2	2 H	A	CONDICION	
	Líneas de control y retroalimentación	Manguera retorno de hidráulico	Reemplazo de mangueras	2	2 H	A	CONDICION	
	Mangueras de alta presión	Manguera Bajada sistema	Reemplazo de mangueras	2	2 H	A	CONDICION	
	Mangueras de alta presión	Manguera Subida Sistema	Reemplazo de mangueras	2	2 H	A	CONDICION	
	Acople Principal	Araña (Elastómero)	Monitoreo de vibraciones	2	1 H	3	MESES	
	Motor Ppal (125 HP)	Acometidas (borneras)	Inspección visual de acometida	2	0,6 H	3	MESES	
	Motor Ppal (125 HP)	Acometidas (borneras)	Termografía	2	1 H	3	MESES	
	Motor Ppal (125 HP)	Acometidas (borneras)	Medición de aislamiento de acometida	2	1 H	3	MESES	
	Motor Ppal (125 HP)	Rodamientos	Monitoreo de vibraciones	2	1 H	3	MESES	
	Motor Ppal (125 HP)	Rodamientos	Termografía	2	1 H	3	MESES	
	Motor Ppal (125 HP)	Rodamientos	Lubricación	2	1 H	3	MESES	
	Motor Secundario (5HP) o de prec	Acometidas (borneras)	Inspección visual de acometida	2	1 H	3	MESES	
	Motor Secundario (5HP) o de prec	Acometidas (borneras)	Termografía	2	1 H	3	MESES	
	Motor Secundario (5HP) o de prec	Acometidas (borneras)	Medición de aislamiento de acometida	2	1 H	3	MESES	
	Motor Secundario (5HP) o de prec	Rodamientos	Monitoreo de vibraciones	2	1 H	3	MESES	
	Motor Secundario (5HP) o de prec	Rodamientos	Termografía	2	1 H	3	MESES	
	Motor Secundario (5HP) o de prec	Rodamientos	Lubricación	2	1 H	3	MESES	
	Filtro de aceite	Filtro de aceite hidráulico	Cambio del filtro de aceite hidráulico (3 filtros)	2	3 H	6	MESES	
	Filtro de aceite	Filtro de humedad	Limpieza de filtro (tamiz)	2	2 H	6	MESES	
	Bomba Principal (fija de pistones)	Carcasa	Inspección visual	2	1 H	3	MESES	
	Bomba Principal (fija de pistones)	Carcasa	Inspección visual por el recorredor	2	0,6 H	Diaria		
	Bomba Principal (fija de pistones)	Sellos	Inspección visual	2	1 H	3	MESES	
	Bomba Principal (fija de pistones)	Sellos	Inspección visual por el recorredor	2	0,6 H	Diaria		
	Bomba secundaria o de precarga	Carcasa	Inspección visual	2	1 H	3	MESES	
	Bomba secundaria o de precarga	Carcasa	Inspección visual por el recorredor	2	0,6 H	Diaria		
	Bomba secundaria o de precarga	Sellos	Inspección visual	2	1 H	3	MESES	
	Bomba secundaria o de precarga	Sellos	Inspección visual por el recorredor	2	0,6 H	Diaria		
	Acople Principal	Manzanas	Monitoreo de vibraciones	2	1 H	3	MESES	
	Motor Ppal (125 HP)	Carcasa	Inspección visual del motor	2	1 H	3	MESES	
	Motor Secundario (5HP) o de prec	Carcasa	Inspección visual del motor	2	1 H	3	MESES	
	Sistema de refrigeración	Cooler	Monitoreo de vibraciones	2	1 H	3	MESES	
	Sistema de refrigeración	Cooler	Monitoreo de vibraciones	2	1 H	3	MESES	
	UNIDAD DE POTENCIA	Bomba secundaria o de precarga	Sellos	Inspección visual por el recorredor	2	0,6 H	Diaria	
		Acople Principal	Manzanas	Monitoreo de vibraciones	2	1 H	3	MESES
		Motor Ppal (125 HP)	Carcasa	Inspección visual del motor	2	1 H	3	MESES
		Motor Secundario (5HP) o de prec	Carcasa	Inspección visual del motor	2	1 H	3	MESES
		Sistema de refrigeración	Cooler	Monitoreo de vibraciones	2	1 H	3	MESES
		Sistema de refrigeración	Mangueras	Monitoreo de vibraciones	2	1 H	3	MESES
		Sistema de refrigeración	Motor	Monitoreo de vibraciones	2	1 H	3	MESES
		Acople secundario o de precarga	Manzanas	Inspección visual	2	0,3 H	Diaria	
		Deposito de Aceite Hidráulico	Tanque	Inspección visual	2	0,3 H	Diaria	
		Bomba Principal (fija de pistones)	Eje	Inspección visual por el recorredor. (Verificación de parámetros: variación de presiones del sistema hidráulico, temperatura)	2	0,3 H	Diaria	
		Bomba secundaria o de precarga	Eje	Inspección visual por el recorredor. (Verificación de parámetros: variación de presiones del sistema hidráulico, temperatura)	2	0,3 H	Diaria	
		Motor Ppal (125 HP)	Estator	Monitoreo de vibraciones	2	1 H	3	MESES
Motor Ppal (125 HP)		Estator	Termografía	2	1 H	3	MESES	
Motor Ppal (125 HP)		Estator	Medición de aislamiento estator	2	1 H	3	MESES	
Motor Ppal (125 HP)		Rotor	Inspección/visión periódica	2	1 H	3	MESES	
Motor Ppal (125 HP)	Rotor	Verificación de parámetros de operación del	2	1 H	3	MESES		
Motor Secundario (5HP) o de prec	Estator	Monitoreo de vibraciones	2	1 H	3	MESES		
Motor Secundario (5HP) o de prec	Estator	Termografía	2	1 H	3	MESES		
Motor Secundario (5HP) o de prec	Estator	Medición de aislamiento estator	2	1 H	3	MESES		
Motor Secundario (5HP) o de prec	Rotor	Inspección visual por el recorredor	2	1 H	3	MESES		
Motor Secundario (5HP) o de prec	Rotor	Verificación de parámetros de operación del	2	1 H	3	MESES		
Bomba Principal (fija de pistones)	Pistones	Inspección	2	1 H	3	MESES		
Bomba Principal (fija de pistones)	Pistones	toma muestra aceite hidraulico	2	1 H	3	MESES		
Bomba Principal (fija de pistones)	Válvulas	Inspección	2	1 H	3	MESES		
Bomba secundaria o de precarga	Pistones	Inspección	2	1 H	3	MESES		
Bomba secundaria o de precarga	Válvulas	Inspección	2	1 H	3	MESES		

Figura 27.

Tareas de mantenimiento para el control, comunicaciones y elementos de seguridad junto con el sistema eléctrico.

SISTEMA	SUBSISTEMA	COMPONENTE	Descripcion de la tarea	Numero de personas	Duracion de la actividad	Unidad en Horas	Estrategia
CONTROL, COMUNICACIONES Y ELEMENTOS DE SEGURIDAD	Centro de control y comunicaciones	<b>Baterías</b>	Inspección por parte del operador	1	0,5	H	DIARIA
	Centro de control y comunicaciones	<b>Cableado</b>	Revisión de conexiones y cableado	2	0,5	H	6 MESES
	Centro de control y comunicaciones	<b>Cableado</b>	Pruebas funcionales al cableado	2	1	H	6 MESES
	Centro de control y comunicaciones	<b>Cableado</b>	Cambio de cableado	2	1	H	POR CONDICION
	Tablero de potencia	<b>Fusibles</b>	Instalación de nuevos fusibles	2	1	H	POR CONDICION
	Centro de control y comunicaciones	<b>Barrera intrínsecamente segura</b>	Pruebas funcionales de barrera intrínsecamente segura	2	1	H	6 MESES
	Centro de control y comunicaciones	<b>Barrera intrínsecamente segura</b>	Reemplazo de barrera intrínsecamente	2	1	H	POR CONDICION
	Centro de control y comunicaciones	<b>Tarjeta rezroth</b>	Reemplazo de la tarjeta Resroth por una ya programada de fábrica	2	1	H	POR CONDICION
	Tablero de potencia	<b>Variador</b>	Limpieza y ajuste de conexiones. Medición de variables operacionales.	2	3	H	6 MESES
	Centro de control y comunicaciones	<b>PLC</b>	Ajuste de borneras, verificación de puertos de entrada y salida, y señales	2	0,5	H	6 MESES
	Centro de control y comunicaciones	<b>PLC</b>	Pruebas funcionales en entradas y salidas del PLC	2	1,5	H	6 MESES
	Centro de control y comunicaciones	<b>PLC</b>	Cuando se daña, reemplazar PLC por uno ya programado de fábrica	2	2	H	POR CONDICION
	Centro de control y comunicaciones	<b>Sensores de posición</b>	Inspección rutinaria de estado de sensores de posición	2	0,5	H	6 MESES
	Centro de control y comunicaciones	<b>Sensores de posición</b>	Pruebas funcionales de sensores	2	1	H	6 MESES
	Centro de control y comunicaciones	<b>Sensores de posición</b>	Reemplazo de sensores de posición	2	2	H	POR CONDICION
	Instrumentación	<b>Manómetros</b>	Prueba funcional (tanto cero como punto de presión comparados con un patrón)	2	1	H	6 MESES
	Instrumentación	<b>Manómetros</b>	Cambio de manómetros	2	2	H	POR CONDICION
	Centro de control y comunicaciones	<b>Delay timer</b>	Cambio de delay timer del tablero de control	2	1	H	POR CONDICION
	Suministro de Energía	<b>Baterías</b>	fabricante	2	2	H	6 MESES

En las tablas se puede observar una amplia variedad de actividades de mantenimiento tomando principios del mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo. Los monitoreos por condición son primordiales para evitar algún percance mayor ya que como se mencionaba anteriormente, las diferidas juegan un papel importante en el desarrollo económico del negocio. También incluye del mantenimiento TPM, el rol del operador o en este caso recorredor de pozos como una especie de observador y mantenedor, relacionando no solo las variables operacionales sino el funcionamiento como tal de la unidad de bombeo y sus componentes.

## 9. Conclusiones

Se realiza con éxito el taller FMECA arrojando resultados satisfactorios, tales como el trabajo en equipo y el conocimiento sobre la unidad de bombeo TUNDRA. Fue una colaboración en conjunto pese a la poca información técnica que se tenía, pero fue valioso el acercamiento con el proveedor en Colombia.

Se desarrolló la metodología con los manuales de mantenimiento, de operación y montaje, además de la creación de la ficha técnica. Fue determinante haber dividido la unidad de bombeo TUNDRA en los diferentes sistemas, subsistemas y componentes, para identificar la categoría de ítems mantenibles.

Las características de las funciones de los ítems mantenibles fueron determinantes para poder analizar e interpretar de manera adecuada las probabilidades, efectos y las respectivas consecuencias de fallas, de este modo desarrollar un método de manejo idóneo y optimizar las tareas de mantenimiento.

Ya obtenidas las tareas de mantenimiento producto de una minuciosa inspección, el recorridor de pozo realiza una tarea crucial, la cual consiste en ejecutar de forma paralela la lectura de la instrumentación e informar al equipo de mantenimiento sobre alguna anomalía en el pozo. Esta estrategia es importante ya que el equipo de mantenimiento no interactúa constantemente con el activo.

La mayoría de las tareas de mantenimiento preventivo corresponden a inspecciones visuales y pruebas de funcionamiento. Estas tareas van ligadas al mantenimiento predictivo con

los monitoreos de vibraciones, mediciones de puesta a tierra, de aislamientos, termografías, entre otros.

Para efectos de este estudio de caso, las políticas de privacidad de datos de la compañía donde desarrollamos el taller de metodología FMECA no es permitido mostrar la plantilla diligenciada, ya que es propiedad intelectual de la compañía. No obstante, quedó integrada la metodología, adicionalmente la empresa está en trámites para solicitar formalmente replicar el ejercicio en otros activos.

## Referencias

- Aguilar-Otero, José R.; Torres-Arcique, Rocío; Magaña-Jiménez, Diana. (2010). *Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad* *Tecnología, Ciencia, Educación*, vol. 25, núm. 1, pp. 15-26 Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos A.C Monterrey, México. [En línea] Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/482/48215094003.pdf>
- Buelvas Díaz, Camilo Ernesto; Martínez Figueroa, Kevin Jair. (2014). *Elaboración de un plan de mantenimiento preventivo para la maquinaria pesada de la empresa L&L* (Trabajo de grado) Barranquilla: Universidad Autónoma del Caribe Facultad de Ingenierías Programa de Ingeniería Mecánica Línea en Gestión de Mantenimiento. [En línea] Disponible en: <http://repositorio.uac.edu.co/bitstream/handle/11619/813/TMEC%201144.pdf?sequence=1>
- Campos-López, Omar; Tolentino-Eslava, Guilibaldo; Toledo-Velázquez, Miguel; Tolentino-Eslava, René. (2018). *Metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) considerando taxonomía de equipos, bases de datos y criticidad de efectos*, Instituto Politécnico Nacional México. [En línea] Disponible en: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/614/61458265006/61458265006.pdf>
- Cansino Flores, Elvis Alberto. (2015). *Elaboración de un plan de mantenimiento preventivo y seguridad industrial para la fábrica Mineros* (Proyecto de grado) Quito: Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería mecánica.

Cendales-Ladinob, Edwin Darío. (2019). *Casos aplicados del análisis de causa raíz*. Bogotá:

Ciencia e Ingeniería Neogranadina: Science and Engineering Neogranadina. Tomo 29, N.º

1 [En línea] Disponible en:

<https://www.proquest.com/openview/1e0704b7d3003548758d1a196b75d32a/1?pq-origsite=gscholar&cbl=136121>

Corporate Headquarters. (2014). *Sure stroke intelligent Lift™ Systems Operator’s Manual*.

Canadá.

Deshpande, V.S.; Modak, J.P. (2001). *Application of RCM to a medium scale industry*. Reliability

Engineering and System Safety 77. pp.31 – 43

Gutiérrez Lagoueyte, Esteban. (2006). *Elaboración de un plan de mantenimiento preventivo para*

*el sistema de bombeo del grupo Gemi basado en el análisis FMECA y en mediciones CMD*.

(Proyecto de grado) Medellín: Universidad EAFIT. Departamento de Ingeniería Mecánica.

Área de Mantenimiento Industrial. [En línea] Disponible en:

[https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/4455/Esteban\\_GutierrezLagoueyte\\_2006.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/4455/Esteban_GutierrezLagoueyte_2006.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

ISO 14224:2006, International Standard — Petroleum, petrochemical and natural gas industries

— Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment.

López, Ernesto Andrés. (2009). *El Mantenimiento Productivo Total Tpm Y La Importancia Del*

*Recurso Humano Para Su Exitosa Implementación*, Pontificia Universidad Javeriana

Bogotá. [En línea] Disponible en:

<https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/7276/Tesis262.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

- Melendres Quispe, Kenny Alberto. (2019). *Mantenimiento Centrado En Confiabilidad (Rcm)*, Universidad Continental, Perú. [En línea] Disponible en: [https://34.199.100.111/bitstream/20.500.12394/5908/4/MP\\_MC\\_Mantenimiento\\_centrado\\_en\\_confiabilidad\\_Docente\\_Kenny\\_Melendres.pdf](https://34.199.100.111/bitstream/20.500.12394/5908/4/MP_MC_Mantenimiento_centrado_en_confiabilidad_Docente_Kenny_Melendres.pdf)
- Nowlan, F.S. (1978). *Reliability-centered maintenance*. US Department of commerce, Diciembre de 2018, Estados Unidos.
- Olarte C., William; Botero A., Marcela; Cañón A., Benhur. *Importancia Del Mantenimiento Industrial Dentro De Los Procesos De Producción*. Universidad Tecnológica De Pereira abril De 2010. [En línea] Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/849/84917316066.pdf>
- Sánchez Sánchez De Puerta, Benito Alberto. (2016). *Diseño de un plan de mantenimiento mediante metodología RCM para una línea de valorización de PEBD*. Sevilla: Universidad de Sevilla julio de 2016, España. [En línea] Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/30282/fichero/Dise%C3%B1o+de+un+plan+de+mantenimiento+mediante+metodolog%C3%ADa+RCM+para+una+l%C3%ADnea+de+valorizaci%C3%B3n+de+PEB.pdf>
- Sexto, Luis Felipe. (2018). *Tipos de mantenimiento: ¿cuántos y cuáles son?* Artículo Técnico. Electromagazine, abril de 2018. [En línea] Disponible en: [http://www.mantenimientomundial.com/notas/SEXTO\\_Tipos-Mantenimiento.pdf](http://www.mantenimientomundial.com/notas/SEXTO_Tipos-Mantenimiento.pdf)
- Valdivieso Torres, Juan Carlos. (2010). *Diseño de un plan de mantenimiento preventivo para la empresa Extruplas S.A.* (Tesis) Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana. Facultad de ingenierías. Carrera de Ingeniería Mecánica. [En línea] Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/831>