

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



TESIS

Propuesta de un Plan de Mantenimiento bajo la Metodología de Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) a bombas de mayor criticidad de un lote petrolero

Para obtener el Título Profesional de Ingeniero Mecánico Electricista

Elaborado por:

Alexis Ricardo Gonzales Pinto

 [0009-0006-6189-736X](https://orcid.org/0009-0006-6189-736X)

Asesor

MSc. Ing. Manuel Sebes Toledo Paredes

 [0000-0001-9216-4827](https://orcid.org/0000-0001-9216-4827)

LIMA – PERÚ

2024

DEDICATORIA

A mi madre Juana, por su gran amor, sacrificio, ejemplo de superación y por el gran apoyo incondicional en todo el trayecto de mi vida. A mi padrastro Eugenio, por su apoyo en mí formación personal. A mi hermano Jhohan, quien estoy seguro que en el futuro también será parte de mi alma mater.

A todos los integrantes de mi familia, por las enseñanzas y virtudes impartidas en mi niñez y etapa adulta.

AGRADECIMIENTOS

A dios, por brindarme la vida y permitir disfrutar cada momento del día con salud, paz y bienestar. A mi madre, por forjar un gran hombre e impartir virtudes para ser un ciudadano de bien, que contribuya en el gran desarrollo de su país. A mi alma mater, la Universidad Nacional de Ingeniería, donde anhelé estudiar desde muy temprana edad y con mucho esfuerzo, pasión y dedicación logré ser parte de ella, así mismo por sus grandiosas enseñanzas y experiencias en mi etapa universitaria. A mi asesor, el Ing. Manuel Toledo Paredes, por guiarme en todo el proceso y desarrollo de la metodología de la investigación en la presente tesis. A mis compañeros y colegas del área de mantenimiento, por sus enseñanzas, experiencias y permitir conocer más a fondo el maravilloso mundo de la Gestión de Mantenimiento.

LISTA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
LISTA DE CONTENIDOS.....	iv
LISTA DE TABLAS.....	viii
LISTA DE FIGURAS	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN	xiii
CAPÍTULO I GENERALIDADES	1
1.1. Antecedentes de la investigación	1
1.2. Identificación y descripción del problema de estudio	3
1.3. Formulación del problema	9
1.3.1. Problema principal.....	9
1.3.2. Problemas secundarios	9
1.4. Justificación e importancia	10
1.5. Objetivos	12
1.5.1. Objetivo general	12
1.5.2. Objetivos específicos.....	12
1.6. Hipótesis.....	13
1.6.1. Hipótesis general.....	13
1.6.2. Hipótesis específicas.....	13
1.7. Variables y operacionalización de variables.....	13
1.7.1. Variables	13
1.7.2 Operacionalización de variables.....	13
1.8. Metodología de la investigación	15
1.8.1. Unidad de análisis	15
1.8.2. Tipo, enfoque y nivel de investigación.....	15

1.8.3. Diseño de investigación.....	16
1.8.4. Fuentes de información	16
1.8.5. Población y muestra	17
1.8.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	17
1.8.7. Análisis y procesamiento de datos	18
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	19
2.1. Marco Teórico	19
2.1.1. Mantenimiento	19
2.1.2. Gestión del mantenimiento	20
2.1.3. Tipos de mantenimiento en el sector industrial	21
2.1.4. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)	27
2.1.5. Objetivos del RCM	29
2.1.6. Las 7 preguntas del RCM.....	30
2.1.7. Proceso de aplicación general del RCM.....	31
2.1.8. Resultados del uso de la metodología RCM	35
2.1.9. Análisis de modos y efectos de fallas (FMEA)	36
2.1.9.1. Ventajas del FMEA.....	36
2.1.9.2. Etapas de desarrollo del FMEA.....	37
2.1.10. Funciones de un equipo	38
2.1.11. Contexto Operativo.....	39
2.1.12. Falla.....	39
2.1.12.1. Tipo de falla.....	40
2.1.13. Modo de Falla.....	41
2.1.14. Efectos de Falla.....	41
2.1.15. Consecuencias de falla	42
2.1.16. Análisis de criticidad	44
2.1.17. Cálculo de factor de criticidad de equipos	47
2.1.18. Número de prioridad de riesgo (NPR)	48
2.1.18.1. Severidad	49
2.1.18.2. Ocurrencia	51
2.1.18.3. Detección	52

2.1.19. Contexto operacional de las bombas horizontales multietapas.....	53
2.1.20. Componentes de las bombas horizontales multietapas	62
2.2. Marco Conceptual	72
2.2.1. Análisis de criticidad	72
2.2.2. Análisis de fallas.....	72
2.2.3. Falla.....	72
2.2.4. Diagrama de decisión.....	72
2.2.5. Hoja de información RCM	73
2.2.6. Hoja de decisión RCM.....	73
2.2.7. Confiabilidad.....	73
2.2.8. Mantenibilidad	74
2.2.9. Disponibilidad	74
2.2.10. Tiempo promedio entre fallas (MTBF)	75
2.2.11. Tiempo promedio para la reparación (MTTR)	75
2.2.12. Gráfica de Pareto	76
CAPÍTULO III DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	77
3.1. Análisis de criticidad de las bombas en un lote petrolero	77
3.2. Resultados del análisis de criticidad de los equipos de bombeo de un lote petrolero	85
3.3. Análisis de criticidad de subsistemas de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER.....	88
3.4. Resultados del análisis de criticidad de subsistemas de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER	89
3.5. Análisis de modos y efectos de falla de componentes críticos de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER.....	90
3.5.1. Evaluación de funciones de componentes críticos de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER.	90
3.5.2. Evaluación de fallas funcionales de subsistemas críticos de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER.....	91
3.5.3. Evaluación de los modos de falla de subsistemas críticos de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER.....	92
3.5.4. Evaluación de los efectos de falla de componentes críticos de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER.....	95

3.6. Cálculo de número de prioridad de riesgo (NPR) de modos de falla de componentes de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER	102
3.7. Resultados de NPR de modos de falla de subsistemas críticos de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER	107
CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	112
4.1. Análisis de resultados.....	112
4.2. Contrastación de Hipótesis.....	119
4.3. Discusión de resultados	127
CONCLUSIONES	131
RECOMENDACIONES	132
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133
ANEXOS	138

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	<i>Historial de disponibilidad de bombas horizontales multietapas</i>	9
Tabla 2	<i>Operacionalización de variable dependiente</i>	14
Tabla 3	<i>Operacionalización de la variable independiente</i>	14
Tabla 4	<i>Jerarquización de activos del lote petrolero en sistemas</i>	54
Tabla 5	<i>Datos técnicos de motor de bomba Booster</i>	59
Tabla 6	<i>Datos técnicos de bombas horizontales multietapas (HPS)</i>	62
Tabla 7	<i>Datos técnicos de motor eléctrico trifásico WEG W50</i>	65
Tabla 8	<i>Tabla de datos técnicos de bomba horizontal multietapas HPS</i>	68
Tabla 9	<i>Tabla de datos técnicos de cámara de empuje</i>	69
Tabla 10	<i>Tabla de datos técnicos de patín de bomba horizontal multietapas</i>	70
Tabla 11	<i>Listado de instrumentos de bombas horizontales multietapas</i>	71
Tabla 12	<i>Listado de bombas de las facilidades de producción de petróleo</i>	78
Tabla 13	<i>Criterios de evaluación para análisis de criticidad de equipos</i>	79
Tabla 14	<i>Cuadro de ponderación de la frecuencia de fallas</i>	80
Tabla 15	<i>Cuadro de ponderación del impacto a la operación</i>	81
Tabla 16	<i>Cuadro de ponderación de impacto en el gasto de reparación</i>	81
Tabla 17	<i>Cuadro de ponderación de impacto a la seguridad humana</i>	82
Tabla 18	<i>Cuadro de ponderación del impacto medioambiental</i>	83
Tabla 19	<i>Representación de criterios en análisis de criticidad de equipos</i>	84
Tabla 20	<i>Rango numérico de niveles de criticidad de equipos</i>	85
Tabla 21	<i>Resultados de análisis de criticidad de equipos de bombeo del lote petrolero</i>	86
Tabla 22	<i>Descripción de subsistemas de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER</i>	88
Tabla 23	<i>Resultados de análisis de criticidad de componentes de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER</i>	89
Tabla 24	<i>Funciones primarias de subsistemas críticos de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER</i>	91
Tabla 25	<i>Fallas funcionales primarias de subsistemas críticos de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER</i>	92
Tabla 26	<i>Modos de falla de componentes críticos de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER</i>	93
Tabla 27	<i>Consecuencias de modos de falla de componentes críticos de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER</i>	95
Tabla 28	<i>Rango numérico de NPR para modos de falla de componentes críticos de bombas multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER</i>	104
Tabla 29	<i>Ponderación de niveles de ocurrencia de modos de falla de subsistemas críticos de bombas multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER</i>	104

Tabla 30 <i>Ponderación de niveles de severidad de modos de falla de subsistemas críticos de bombas multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER</i>	105
Tabla 31 <i>Ponderación de niveles de detección de modos de falla de subsistemas críticos de bombas multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER</i>	106
Tabla 32 <i>Números de prioridad de riesgos de subsistemas críticos de bombas multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER</i>	107
Tabla 33 <i>Números de prioridad de riesgos con frecuencia acumulada de subsistemas críticos de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6</i>	109
Tabla 34 <i>Nivel de NPR de modos de fallas de subsistemas críticos de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6</i>	113
Tabla 35 <i>Propuesta de Plan de Mantenimiento de bombas horizontales multietapas</i>	115

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	<i>Plan de Mantenimiento de una bomba tipo Tornillo en un lote petrolero</i>	5
Figura 2	<i>Producción diaria de petróleo fiscalizado</i>	6
Figura 3	<i>Programa de Mantenimiento Semanal</i>	8
Figura 4	<i>Estructura de tipos de mantenimiento</i>	21
Figura 5	<i>Diferencias entre el RCM y el mantenimiento tradicional</i>	28
Figura 6	<i>Diagrama de etapas de proceso de aplicación de RCM</i>	32
Figura 7	<i>Conformación del grupo de trabajo de RCM</i>	33
Figura 8	<i>Etapas de desarrollo de la aplicación del FMEA</i>	37
Figura 9	<i>Esquema de representación de tipos de fallas</i>	40
Figura 10	<i>Clasificación de las consecuencias de una falla</i>	43
Figura 11	<i>Ejemplo de gráfica de barras resultado de un análisis de criticidad</i>	45
Figura 12	<i>Criterios fundamentales para un análisis de criticidad</i>	48
Figura 13	<i>Ejemplo de escalas numéricas de NPR</i>	49
Figura 14	<i>Criterios referenciales de evaluación para el análisis de severidad de falla</i>	50
Figura 15	<i>Criterios referenciales de evaluación para el análisis de ocurrencia de falla</i>	51
Figura 16	<i>Criterios de evaluación para el análisis de detección de falla</i>	52
Figura 17	<i>Diagrama de proceso de reinyección de agua producida</i>	55
Figura 18	<i>Bosquejo de la zona de producción del lote petrolero</i>	56
Figura 19	<i>Ubicación técnica y distribución de bombas horizontales multietapas en zona HPS</i>	57
Figura 20	<i>Bosquejo de tanques de agua producida</i>	58
Figura 21	<i>Diagrama P&ID de bomba horizontal multietapas HPS-03</i>	61
Figura 22	<i>Componentes de una bomba horizontal multietapas</i>	63
Figura 23	<i>Motor eléctrico trifásico WEG W50</i>	63
Figura 24	<i>Curva de desempeño en carga de motor eléctrico WEG W50</i>	66
Figura 25	<i>Bomba horizontal multietapas HPS</i>	67
Figura 26	<i>Cámara de empuje Baker Hugues Modelo HTC 875</i>	69
Figura 27	<i>Estructura de soporte para montaje de componentes- Patín</i>	70
Figura 28	<i>Histograma de factores de criticidad de equipos de bombeo de facilidades de producción de petróleo</i>	87
Figura 29	<i>Factores de criticidad de subsistemas de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER</i>	90
Figura 30	<i>Diagrama de Pareto de NPR y frecuencia acumulada de modos de falla de subsistemas críticos de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6</i>	111

RESUMEN

El desarrollo de la presente investigación reside primordialmente en la elaboración de una propuesta de Plan de Mantenimiento mediante la aplicación sistemática de la Metodología de Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) a las bombas de mayor criticidad del proceso de producción de un lote petrolero considerando la evaluación de riesgos. El estudio toma lugar, inicialmente, mediante la identificación del nivel de criticidad de todas las bombas de los diferentes procesos en la producción de petróleo, ello mediante una evaluación del nivel criticidad de activos. La evaluación determinó que los equipos de bombeo más críticos son las bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER del proceso de reinyección de agua producida, los cuales obtuvieron un valor numérico crítico de 21, encabezando el listado de activos críticos y, de esa forma, direccionando la aplicación de la metodología FMEA a dichos equipos. Posteriormente, se llevó a cabo también la evaluación de criticidades de los subsistemas que componen a las bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER. Posteriormente, se desarrolló la evaluación de la Metodología FMEA, poniendo énfasis y atención de estudio a los modos de falla más críticos según la evaluación del riesgo, ello mediante el Número de Prioridad de Riesgo (NPR). El desarrollo de la investigación permitió aplicar la Metodología de Análisis de Modos y Efectos de falla (FMEA) a las bombas de mayor criticidad del proceso de producción de un lote petrolero. Con la propuesta del Plan de Mantenimiento consignada en el estudio, se espera evitar y/o minimizar los riesgos asociados a los modos de falla que conllevan a la ocurrencia de una falla no programada en los equipos.

Palabras claves: Evaluación de riesgo, FMEA, Bombas Horizontales Multietapas

ABSTRACT

The development of this research resides primarily in the elaboration of a Maintenance Plan proposal through the systematic application of the Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) Methodology to the most critical pumps in the production process of an oil lot, considering the risk assessment. The study takes place, initially, by identifying the criticality level of all the pumps in the different processes in oil production, through an evaluation of the criticality level of assets. The evaluation determined that the most critical pumping equipment is the HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER horizontal multistage pumps of the produced water reinjection process, which obtained a critical numerical value of 21, heading the list of critical assets and, in this way, directing the application of the FMEA methodology to said equipment. Subsequently, the criticality assessment of the subsystems that make up the HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER horizontal multistage pumps was also carried out. Subsequently, the FMEA Methodology evaluation was developed, placing emphasis and study attention on the most critical failure modes according to the risk assessment, using the Risk Priority Number (RPN). The development of the research allowed the application of the Failure Mode and Effects Analysis Methodology (FMEA) to the most critical pumps in the production process of an oil lot. With the proposed Maintenance Plan included in the study, it is expected to avoid and/or minimize the risks associated with the failure modes that lead to the occurrence of an unscheduled failure in the equipment.

Keywords: Risk Analysis, FMEA, Horizontal Multistage Pumps

INTRODUCCIÓN

En el ámbito operativo de los lotes de producción de petróleo, la efectividad del mantenimiento de equipos críticos juega un papel crucial en la continuidad operativa y la seguridad del proceso. Por ello, el presente estudio se centra en la elaboración de la Propuesta de un Plan de Mantenimiento utilizando la Metodología FMEA (Análisis de Modo y Efectos de Falla) aplicado a los equipos de mayor criticidad de un lote petrolero considerando la evaluación de riesgos asociados a las fallas. El objetivo principal del FMEA es identificar y mitigar los riesgos potenciales asociados con fallos en estos equipos, mediante una evaluación detallada de los modos de fallo posibles y sus efectos. Esta metodología proporciona un marco estructurado para priorizar acciones preventivas y correctivas, minimizando y/o evitando los riesgos asociados ante la ocurrencia de una falla en diferentes aspectos, ello incluye considerar efectos directos (interrupción en la producción y la seguridad) como los efectos indirectos (gastos por reparaciones no programadas o inclusive sanciones regulatorias).

Debido a ello, el planteamiento y desarrollo del presente trabajo de investigación se fundamenta en la siguiente interrogante: ¿Cómo proponer un Plan de Mantenimiento bajo la Metodología de Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) a las bombas de mayor criticidad de un lote petrolero considerando la evaluación de riesgos?

Para cumplir con el objetivo, ha sido necesario desarrollar un análisis de criticidad de activos a los equipos de bombeo (bombas) de los diferentes procesos de producción del lote petrolero, ello para identificar a las bombas de mayor criticidad dentro del proceso productivo.

Así mismo, ha sido necesario seguir el paso a paso de la aplicación sistemática de la Metodología de Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA), en el cual se evalúan las características de las fallas de los equipos según la evaluación del riesgo asociado a cada uno. La evaluación se realiza mediante el análisis de las características de las fallas y la selección de los modos de falla más críticos (fallas que generaría el mayor impacto) de los componentes según el Número de Prioridad de Riesgo (NPR). Posteriormente, se consignan las acciones de mantenimiento dentro del Plan de Mantenimiento, con el objetivo de proponer acciones que procuren evitar la ocurrencia y/o minimización de los riesgos asociados ante la ocurrencia de una falla no programada.

Para una mejor comprensión de la investigación desarrollada, el estudio se encuentra estructurado en cuatro capítulos, claramente diferenciados entre sí, los cuales se detallan de la siguiente forma:

En el capítulo I “Generalidades”, se describen las generalidades del estudio, los antecedentes referenciales considerados, tanto en el entorno nacional como internacional, la identificación y descripción del problema de estudio, la formulación del problema principal y secundarios, la justificación e importancia de la investigación del estudio, los objetivos general y específicos, el planteamiento de las hipótesis, las variables y su operacionalización, la metodología de la investigación seleccionada para el estudio de la presente Tesis, detallando el tipo, enfoque y nivel asociado a la presente investigación.

En el capítulo II “Marco teórico y conceptual”, se recopila y consigna la información necesaria que concierne al marco teórico y conceptual de la investigación, abarcando conceptos básicos y también especializados, los cuales permiten y coadyuvan a comprender y desarrollar adecuadamente la investigación

En el capítulo III “Desarrollo del trabajo de investigación”, se desarrolla propiamente la Tesis, es decir, la evaluación del análisis de criticidad de las bombas del lote petrolero y la propuesta del Plan de Mantenimiento bajo la Metodología de Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) a las bombas de mayor criticidad, según los conceptos indicados en el Marco Teórico y conceptual del Capítulo II.

En el capítulo IV “Análisis y discusión de resultados”, se realiza la presentación del análisis y discusión de los resultados obtenidos en el desarrollo del presente trabajo de investigación.

Por último, en la parte final se presentan las conclusiones y recomendaciones correspondientes a la investigación. Además, en este apartado se incluyen las referencias bibliográficas y anexos empleados en el tratamiento del presente estudio.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. Antecedentes de la investigación

Torres (2022) en su trabajo de investigación de pregrado “Plan de mantenimiento centrado en confiabilidad para mejorar disponibilidad de electrofiltros secos tipo F3X7500X4500X4875 de Refinería Nexa Resources” tuvo como objetivo principal mejorar la disponibilidad de los Electrofiltros Secos B2033-1/2 en la planta 2 de la Refinería Nexa Resources mediante un Plan de Mantenimiento Basado en la Confiabilidad para reducir costos de mantenimiento y evitar pérdidas de producción por falta de equipo disponible. El autor analizó la disponibilidad de los equipos en los años 2017 de 83.86% y en el 2018 de 69.47% obteniendo datos propios de la refinería. El autor propuso un plan utilizando la metodología FMEA para identificar funciones, fallas funcionales y modos de fallas. Así mismo, llevó a cabo un análisis de criticidad de los componentes de los Electrofiltros Secos según los criterios de la refinería, identificando las fallas con mayor riesgo.

Flores (2022) realizó y presentó su investigación que llevaba por título “Plan de Mantenimiento basado en la confiabilidad RCM para mejorar la disponibilidad del equipo de alta criticidad en la línea de deshidratado de la Planta de Alimentos Villa Andina S.A.C- Cajamarca”, en el cual el autor plasmó como objetivo principal en el estudio direccionando a obtener mejoras en la disponibilidad mecánica del equipo usado para el proceso de deshidratación, ello mediante el uso del RCM con actividades seleccionadas que permitan prevenir las fallas. El procedimiento utilizado por el autor se basó principalmente en el análisis de las funciones, modos y efectos de falla (FMEA) y los diagramas de decisión RCM. Previamente, el investigador determinó que

el equipo más crítico en el proceso de deshidratación era el Deshidratador N.º 02 y sobre el cual puso énfasis. Finalmente, mediante el análisis e implementación de un plan de mantenimiento con RCM en el Deshidratador N.º 02, el autor con la metodología aplicada logró aumentar la disponibilidad del equipo en un 3.6%, es decir un incremento desde 92.6% a 96.2%. Así mismo, obtuvo un ahorro en costos de mantenimiento de 4178 soles y en costo de producción de 149 835 soles.

Cruzado (2020) en su trabajo de investigación de pregrado “Aplicación del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) a bombas de carga de una refinería” tuvo como principal objetivo desarrollar e implementar un plan mantenimiento estructurado bajo el RCM a bombas de tipo tornillo en una industria de refinería de crudo con uso de la Metodología FMEA y, de esa forma, identificar los modos de falla del equipo que permitan disminuir o impedir las consecuencias de dichas fallas. De igual forma, el investigador utilizó diferentes herramientas, tal como el diagrama de Pareto, prioridades de riesgo y estudio de criticidad. Finalmente, en las conclusiones del autor, este señala que el uso del RCM permitió direccionar con énfasis las actividades y tareas de mantenimiento a los componentes del subsistema que manifestaban mayor incidencia de fallas en el transcurso de los tiempos de operación del equipo. Bajo la información obtenida, también consiguió dirigir los recursos eficientemente de acuerdo a las prioridades.

Mariñas (2022) desarrolló su tesis denominado “Plan de Mantenimiento basado en RCM para maximizar la disponibilidad de tráileres de 32 toneladas en una empresa de transportes en Lima Norte”. El investigador en su estudio plasmó principalmente su objetivo en demostrar, en efecto, la efectividad de la metodología estructurada del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad en el marco de estudio de 3 tráileres de carga pesada como activos fijos. Previo

al uso e implementación del RCM, la disponibilidad de los equipos era de 80.8%; posteriormente, luego de la implementación de un Plan de Mantenimiento basado en el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad obtuvo la disponibilidad mecánica promedio de 89.04%, mostrándose un incremento de 8.24% en la nueva disponibilidad de los activos fijos. También, logró aumentar el tiempo medio entre fallas (MTBF) de 77.86 a 102 horas y el tiempo promedio entre reparaciones (MTTR) cayó de 18.49 a 12.5 horas.

1.2. Identificación y descripción del problema de estudio

La industria del petróleo está comprendida y estructurada principalmente en 3 etapas o procesos muy bien diferenciados entre sí, fases que se contemplan desde la exploración del hidrocarburo hasta la última etapa de distribución para llegar al usuario final. (Cruzado, 2020). Así mismo, la norma ISO 14224:2016 hace referencia a las 3 etapas mencionadas, las cuales son: Upstream, Midstream y Downstream. El estándar internacional referenciado define conceptualmente a cada una de dichas etapas de la siguiente forma:

- **Upstream:** Etapa que contempla los procesos de exploración y producción de petróleo. En esta etapa se encuentra el lote petrolero.
- **Midstream:** Etapa que contempla los procesos de procesamiento, almacenamiento y transporte de petróleo.
- **Downstream:** Etapa que contempla los procesos de post producción de petróleo, en el cual se incluyen a las refinerías y plantas petroquímicas.

Uno de los principales problemas que se aborda en la gestión de mantenimiento en el lote petrolero es la disposición y ejecución de planes de mantenimiento básicos (Ver Figura 1), es

decir, planes de mantenimiento con tareas que no procuran evitar y/o minimizar uno o varios modos de falla en los equipos. Así mismo, las tareas de mantenimiento consignadas no abarcan a todos los componentes o subsistemas del equipo para su ejecución correspondiente. La ejecución de tareas de mantenimiento sin una evaluación de los riesgos asociados a cada modo de falla, involucra un gran problema que conllevaría a consecuencias graves ante la posible falla en los equipos, debido a la alta probabilidad de la ocurrencia de un modo de falla que no fue identificada y atendida a tiempo. En el mismo aspecto, la no identificación de los modos de falla más críticos no permite la priorización de acciones y asignación eficiente de recursos.

En complemento, un Plan de Mantenimiento de equipos desempeña un papel fundamental en el mantenimiento de la eficiencia, fiabilidad y seguridad en los equipos, un Plan de Mantenimiento bien estructurado no solo identifica, sino que también aborda de manera efectiva los riesgos potenciales relacionados con fallas o averías en los equipos (Rahulprasad, 2023).

En la Figura 1 se muestra un plan de mantenimiento de frecuencia calendario semestral de una bomba tipo tornillo del proceso de producción, en ella, al igual que las otras bombas del proceso de producción, se aprecia lo generalizado y básico de las tareas, siendo en su mayoría inspecciones.

Figura 1

Plan de Mantenimiento de una bomba tipo Tornillo en un lote petrolero

A	B	C	D	E	F	J
Item	Plan de Trabajo	Tarea	Descripción de tarea	Duración	Secuencia	Especialidad
1	PT-BOMBA_TOR_SEMESTRAL	10	Verificación de fugas en sello mecánico y bomba	00:15	1	TEC_MECANICO
2	PT-BOMBA_TOR_SEMESTRAL	20	Inspección de acoplamientos en motor-caja de transmisión y bomba-caja de	00:15	1	TEC_MECANICO
3	PT-BOMBA_TOR_SEMESTRAL	30	Revisión y limpieza de instrumentos (manómetros, switches, válvula de	01:00	1	TEC_INSTRUMENTISTA
4	PT-BOMBA_TOR_SEMESTRAL	40	Inspección de nivel de aceite en caja de transmisión	00:15	2	TEC_MECANICO
5	PT-BOMBA_TOR_SEMESTRAL	50	Limpieza de filtro succión	00:45	2	TEC_MECANICO
6	PT-BOMBA_TOR_SEMESTRAL	60	Ajuste de pernos de sujeción y prueba de funcionamiento	00:30	3	TEC_MECANICO
7	PT-BOMBA_TOR_SEMESTRAL	70	Verificación de alineamiento de acoplamientos y nivel de vibración	01:00	3	TEC_MECANICO

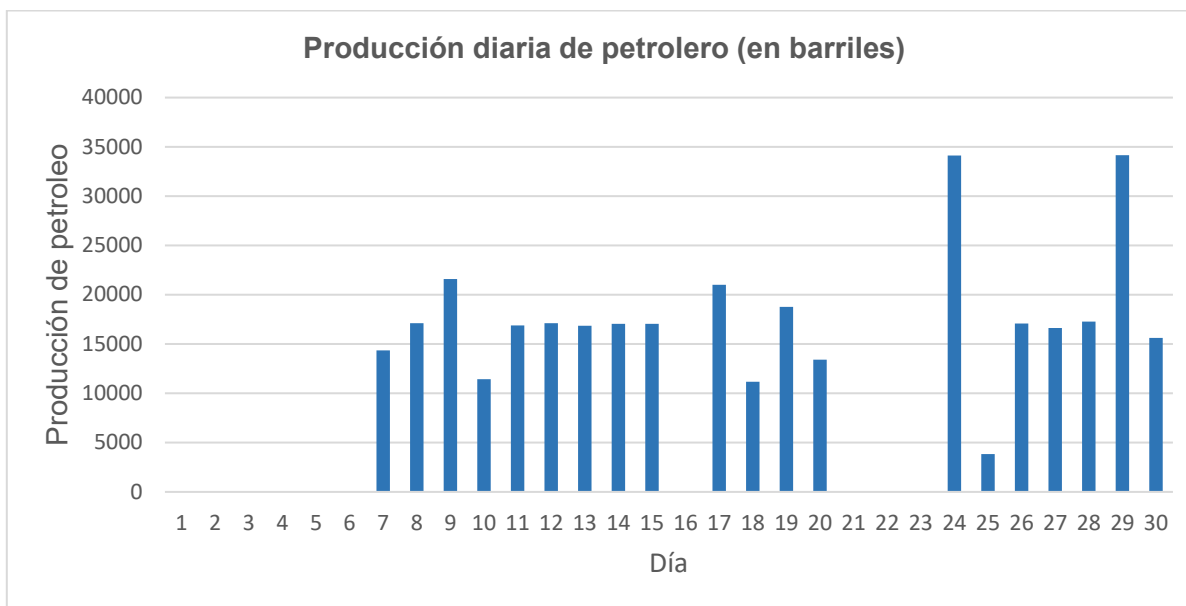
Nota. La gráfica muestra un plan de mantenimiento de frecuencia semestral de una bomba tipo tornillo. Fuente: Elaboración propia.

En el mismo aspecto, los equipos críticos son fundamentales para la operación y el rendimiento de una empresa, ya que su correcto funcionamiento influye significativamente en los resultados finales. Al priorizar y dedicar recursos adecuados a estos equipos, las organizaciones pueden minimizar tiempos de inactividad, pérdidas de producción, insatisfacción del cliente y riesgos de seguridad, asegurando así la continuidad operativa y la competitividad (Carpio, 2020)

En efecto, las bombas de mayor criticidad desempeñan un papel fundamental en el proceso de producción de petróleo. Cualquier falla puede conllevar a unas consecuencias significativas. En caso que una bomba crítica falle repentinamente, debido a un modo de falla que no fue identificado y atendido a tiempo, en efecto, conllevaría a la interrupción del proceso productivo de producción de petróleo, ocasionando pérdidas significativas de producción. La falla en una bomba crítica podría detener la producción de petróleo; la Figura 2 muestra que en el lote petrolero se alcanza la producción de hasta aproximadamente 35 000 barriles por día (BOPD).

Figura 2

Producción diaria de petróleo fiscalizado



Nota. La gráfica muestra la producción diaria de petróleo en un mes del año 2023. Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos de Reporte de Producción Fiscalizada de Hidrocarburos Líquidos a Nivel Nacional (Barriles), PerúPetro, 2023.

Así mismo, una fuga o ruptura de un equipo crítico podría desencadenar en un derrame de petróleo u otro material peligroso, conllevando a consecuencias ambientales graves, incluyendo contaminación del suelo, agua, vida silvestre y, sumado a ello, las sanciones de los organismos regulatorios en materia medioambiental. Los derrames de petróleo causan daños significativos en los ecosistemas, contaminan el agua y afectan a miles de especies, que pueden transmitir contaminantes a través de la cadena alimenticia; económicamente, los derrames afectan a las industrias. (Marcano, 2021).

Además, la falta de un análisis de riesgo conlleva a un enfoque reactivo, en lugar del preventivo, ello definitivamente podría resultar en mayores costos de reparación y tiempo de inactividad no programada del equipo, afectando seriamente la rentabilidad y eficiencia

operativa del lote petrolero. Entonces, es enormemente importante contar con planes de mantenimiento que contengan tareas que procuren evitar y/o minimizar la ocurrencia de algún modo de falla mediante una evaluación del riesgo de los mismos.

Por otra parte, el no contar con la identificación de los equipos de mayor criticidad, no permite al área de Mantenimiento (Planificación, supervisión, ejecución y las partes interesadas) centrar sus prioridades en los equipos más críticos, ello para optimizar los recursos financieros, materiales y humanos. En el lote petrolero, la jerarquización de la criticidad de los activos está dado por 3 niveles, niveles que no brindan una jerarquización de los activos del proceso de producción.

- **CRITICIDAD 1:** Todos los equipos que no forman parte del proceso de producción. Por ejemplo: equipos de lavandería, cocina, habitaciones de campamento, áreas recreativas, entre otros.
- **CRITICIDAD 2:** Todos los equipos que forman parte del proceso de producción, Por ejemplo: bombas de crudo, tanques de almacenamiento, desaladores, tratadores, entre otros.
- **CRITICIDAD 3:** Todos los equipos asociados al sistema contra incendio. Por ejemplo: Monitores hidrantes, mangueras, rociadores, entre otros.

La inexistencia de una jerarquización de equipos considerando la evaluación de riesgos, en efecto, no permite identificar la priorización de actividades de mantenimiento, tanto en las programaciones, planificaciones, gestión de backlog y solicitud de pedido de repuestos de mantenimiento.

Figura 3

Programa de Mantenimiento Semanal

PROGRAMA DE MANTENIMIENTO DISCIPLINA MECÁNICA									
SEMANA 50 (Del 11 al 17 de Diciembre del 2023)							397.0	HH Programadas	
7.4	Prom. puestos día	442.6	HH dispon. Semanal				89.7%	% HH Programadas	
8.5	HH día disp. Persona	104.0	OMs Cumpl.				335.9	HH de Cumplimiento	
63.2	HH día disp. espec.	81.9%	% Cumpl. OMs				81.4%	% Cumplimiento HH	
Mes proc	Semana Progr	Año progr	Espe	Descripción del equipo			Criticidad Prioridad	Descripción del Plan de Trabajo o Requ	
DIC	SEM 50	2023	MECAN	Bomba de diluyente (Tornillo - Netzsch) de 600 BPD" (2-P-720B)				Mantto Mensual a Bomba (Tipo: Tornillo	
DIC	SEM 50	2023	MECAN	Bomba de tanque sumidero T-300 (Tornillo - Netzsch) de 1,200 BPD (				Mantto Mensual a Bomba (Tipo: Tornillo	
DIC	SEM 50	2023	MECAN	Bomba Transf. Tanques Agua fresca a Fase 2 (Tornillo - Netzsch) de 1				Mantto Mensual a Bomba (Tipo: Tornillo	
DIC	SEM 50	2023	MECAN	Bomba de Exportación de crudo (Tornillo - Netzsch) de 200 M3/H "30				Mantto Mensual a Bomba (Tipo: Tornillo	
DIC	SEM 50	2023	MECAN	Bomba de Exportación de crudo (Tornillo - Netzsch) de 200 M3/H "30				Mantto Mensual a Bomba (Tipo: Tornillo	
DIC	SEM 50	2023	MECAN	Bomba de Exportación de crudo (Tornillo - Netzsch) de 200 M3/H "30				Mantto Mensual a Bomba (Tipo: Tornillo	
DIC	SEM 50	2023	MECAN	Bomba de Rechazo de crudo (Tornillo - Netzsch) de 23.70 M3/H "360				Mantto Mensual a Bomba (Tipo: Tornillo	
DIC	SEM 50	2023	MECAN	Bomba de Rechazo de crudo (Tornillo - Netzsch) de 23.70 M3/H "360				Mantto Mensual a Bomba (Tipo: Tornillo	
DIC	SEM 50	2023	MECAN	Bomba de recirculación (Tornillo - Netzsch) de 430 BPD a 60 Hz (P-55				Mantto Mensual a Bomba (Tipo: Tornillo	
DIC	SEM 50	2023	MECAN	Bomba de recirculación (Tornillo - Netzsch) de 430 BPD a 60 Hz (P-55				Mantto Mensual a Bomba (Tipo: Tornillo	
DIC	SEM 50	2023	MECAN	Bomba de tanque sumidero T-310 (Tornillo - Netzsch) de 400 BPD" (P				Mantto Mensual a Bomba (Tipo: Tornillo	
DIC	SEM 50	2023	MECAN	Bomba Surt. Diesel Fase 1-2; Drilling y Pta Gen (Tornillo-Netzsch) de				Mantto Mensual a Bomba (Tipo: Tornillo	
DIC	SEM 50	2023	MECAN	Bomba Surt. Diesel Fase 1-2; Drilling y Pta Gen (Tornillo-Netzsch) de				Mantto Mensual a Bomba (Tipo: Tornillo	
DIC	SEM 50	2023	MECAN	Compresor de Aire 1 (Tornillo - Kaeser) de 88 CFM (C-100)				Mantto Mensual a Compresor de Aire (T	
DIC	SEM 50	2023	MECAN	Compresor de Aire 2 (Tornillo - Kaeser) de 88 CFM				Mantto Mensual a Compresor de Aire (T	
DIC	SEM 50	2023	MECAN	Compresor de Aire 3 (Tornillo - Kaeser) de 231 CFM				Mantto Mensual a Compresor de Aire (T	
DIC	SEM 50	2023	MECAN	Intercambiador Calentador de "Agua fresca-Agua producida" de 1800 BWPD (1-E-320)			2	Mantto Semestral a Intercambiador de c	
DIC	SEM 50	2023	MECAN	Intercambiador Calentador de "Agua producida-Agua fresca" de 1800 BWPD (2-E-320A)			2	Mantto Semestral a Intercambiador de c	
DIC	SEM 50	2023	MECAN	Intercambiador Calentador de "Agua fresca-Agua producida" de 350 BPD (H-20)			2	Mantto Semestral a Intercambiador de c	
DIC	SEM 50	2023	MECAN	Intercambiador Pre-Calentador de "Agua fresca-Agua producida" de 350 BPD (H-21)			2	Mantto Semestral a Intercambiador de c	

Nota. La figura muestra un programa semanal de mantenimiento con los 3 niveles criticidad (Criticidad 1, 2 y 3) de equipos de un lote petrolero. Fuente: Programa de Mantenimiento Semanal, contrata.

De la misma forma, se puede observar en la Tabla 1 el promedio de la disponibilidad de las unidades de bombas horizontales multietapas del sistema de reinyección de agua en el año 2023. Según detalla dicha información, se evidencia que el promedio menor de la disponibilidad de una de las bombas horizontales multietapas en dicho año es de 91.36%, el cual no alcanza el valor de 94% (valor mínimo requerido).

Tabla 1

Historial de disponibilidad de bombas horizontales multietapas

DESCRIPCIÓN	TAG	DISPONIBILIDAD	ESTADO	UBICACIÓN
BOMBA HORIZONTAL 01	HPS-01	91.90%	OPERATIVO	ZONA HPS
BOMBA HORIZONTAL 02	HPS-02	92.30%	OPERATIVO	ZONA HPS
BOMBA HORIZONTAL 03	HPS-03	91.36%	OPERATIVO	ZONA HPS
BOMBA HORIZONTAL 04	HPS-04	93.06%	OPERATIVO	ZONA HPS
BOMBA HORIZONTAL 05	HPS-05	91.74%	OPERATIVO	ZONA HPS
BOMBA HORIZONTAL 06	HPS-06	91.67%	OPERATIVO	ZONA HPS
BOMBA HORIZONTAL 07	HPS-07	92.68%	OPERATIVO	ZONA HPS

Nota: La tabla muestra la disponibilidad de las 07 bombas horizontales en el año 2023. Fuente:

Elaboración propia.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema principal

¿Cómo proponer un Plan de Mantenimiento bajo la Metodología de Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) a las bombas de mayor criticidad de un lote petrolero considerando la evaluación de riesgos?

1.3.2. Problemas secundarios

- ¿Cómo jerarquizar e identificar a las bombas de mayor criticidad de un lote petrolero mediante el análisis de criticidad?
- ¿Cómo aplicar el Análisis de Modos y Efectos de Falla para evaluar los riesgos asociados a las bombas de mayor criticidad y priorizar los modos de falla?

- ¿Qué tareas y tipos de mantenimiento específicos se deben incluir en el Plan de Mantenimiento propuesto para las bombas de mayor criticidad considerando los resultados del análisis FMEA?

1.4. Justificación e importancia

La Metodología de Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) permite proponer un Plan de Mantenimiento mediante la evaluación de los modos de falla de los componentes y sus efectos en el equipo. Este plan incluirá actividades estratégicas de mantenimiento que permiten reducir la probabilidad de la ocurrencia de una falla y los riesgos asociados, ello mediante la evaluación de los modos de falla más críticos, el cual no solo mejorará la disponibilidad y confiabilidad del equipo, sino también que también optimizará los recursos y reducirá los impactos ante la ocurrencia de una falla no programada.

La identificación y jerarquización de las bombas de mayor criticidad dentro del proceso de producción de petróleo es sumamente importante, dado que ello va a permitir identificar a las bombas cuyo fallo generaría el mayor impacto en el proceso productivo, la seguridad y el medio ambiente. Ello incluye considerar efectos directos (interrupción en la producción y la seguridad) como los efectos indirectos (gastos por reparaciones no programadas o inclusive sanciones regulatorias). Así mismo, al centrarnos en los equipos críticos, se puede optimizar los recursos financieros, materiales y humanos, ello dirigiendo actividades de mantenimiento hacia los equipos que generarían los mayores impactos (productivos, económicos, financieros, seguridad y medioambiente).

La identificación de las bombas de mayor criticidad de los procesos de producción del lote petrolero y la propuesta de un Plan de Mantenimiento efectivo hacia dichos equipos mediante la Metodología de Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) son, definitivamente, de gran importancia, debido a lo estratégico que resulta para garantizar la operación continua,

segura y eficiente en la producción de petróleo. Así mismo, para preservar los intereses financieros de la empresa y proteger la seguridad de los colaboradores y el medio ambiente que lo rodea.

Además, es menester resaltar que, existe la enorme necesidad en el área de mantenimiento de la contratista del servicio de mantenimiento de mejorar y optimizar los planes de mantenimiento de los equipos, respondiendo a una necesidad, según lo planteado. En el mismo aspecto, dado que, según las estimaciones del aumento en la producción de petróleo con la perforación de nuevo pozos de petróleo, es necesario priorizar y optimizar las tareas de mantenimiento a los equipos más críticos, debido a ello, se propondrá un Plan de Mantenimiento bajo el Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) a las bombas de mayor criticidad del lote petrolero considerando la evaluación de riesgos, con ello se espera evitar y/o minimizar la ocurrencia de los modos de falla y los impactos que generaría.

Alcance de la investigación

Se presentará la propuesta de un Plan de Mantenimiento aplicando los conceptos del Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA). Se utilizará información de mantenimiento disponible de los planificadores de mantenimiento de la contratista en el año 2023.

La investigación tiene las siguientes limitantes:

- La investigación se limita al estudio de las bombas que forman parte directa del proceso de producción de petróleo del lote petrolero; no se consideran las bombas electro sumergibles de fondo de pozo ni bombas que no pertenecen al proceso directo, tales como bombas de PTAR (Planta de tratamiento de aguas residuales), PTAP

(Planta de tratamiento de agua potable), bombas de cocina, lavandería, hotelería, entre otros.

- Para el análisis de criticidad de equipos se utiliza criterios de evaluación y ponderación usando de referencia a otros autores.
- No se conoce el tiempo de vida de los componentes de las bombas horizontales multietapas.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Proponer un Plan de Mantenimiento bajo la Metodología de Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) a las bombas de mayor criticidad de un lote petrolero, considerando la evaluación de riesgos.

1.5.2. Objetivos específicos

- Jerarquizar e identificar a las bombas de mayor criticidad de un lote petrolero mediante el análisis de criticidad.
- Aplicar el Análisis de Modos y Efectos de Falla para evaluar los riesgos asociados a las bombas de mayor criticidad y priorizar los modos de falla relevantes.
- Determinar las tareas y tipos de mantenimiento específicos del Plan de Mantenimiento propuesto para las bombas de mayor criticidad, considerando los resultados del FMEA.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis general

La aplicación de la Metodología de Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) considerando la evaluación de riesgos permitirá desarrollar la propuesta de un Plan de Mantenimiento a las bombas de mayor criticidad de un lote petrolero.

1.6.2. Hipótesis específicas

- La aplicación del análisis de criticidad permitirá jerarquizar e identificar a las bombas de mayor criticidad de un lote petrolero.
- La aplicación del Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) a las bombas de mayor criticidad facilitará una evaluación exhaustiva de los riesgos asociados y una priorización efectiva de los modos de falla más relevantes.
- La determinación de tareas y tipos de mantenimiento específicos, basados en los resultados del FMEA, permitirá la elaboración de un Plan de Mantenimiento para las bombas de mayor criticidad.

1.7. Variables y operacionalización de variables

1.7.1. Variables

- **Variable independiente:** Plan de Mantenimiento bajo Metodología de Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA)
- **Variable dependiente:** Evaluación de riesgos

1.7.2 Operacionalización de variables

Tabla 2

Operacionalización de variable dependiente

VARIABLE	DEFINICIÓN	DIMENSIÓN	INDICADOR
Plan de Mantenimiento bajo la Metodología de Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA)	Metodología sistemática que permite el análisis de un proceso para identificar, minimizar y evitar el impacto de las fallas en los equipos antes que estos sucedan y plasmar actividades en un Plan de Mantenimiento.	Fallas	Característica de falla
		Modos de Falla	Diversidad de modos de falla
		Efectos de Falla	Severidad de fallas
		Tipos de Mantenimiento	Variedad de tipos de mantenimiento

Nota. La tabla muestra la operacionalización de la variable. Fuente: Elaboración propia

Tabla 3

Operacionalización de la variable independiente

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIÓN	INDICADOR
Evaluación de riesgos	Variable que posibilita determinada categorización de elementos en relación al efecto global que generan, ello con la finalidad de identificar las áreas que deben tener mayor énfasis en la atención de mantenimiento en cuanto a la función que realiza.	Severidad	Número de Prioridad de Riesgo (NPR) • Inaceptable (>120) • Medianamente aceptable (75-120) • Aceptable (1-74)
		Ocurrencia	
		Detección	
		Criticidad de equipos	Nivel de criticidad • Alta (>19) • Media (12-19) • Baja (1-11)

Nota. La tabla muestra la operacionalización de la variable. Fuente: Elaboración propia

1.8. Metodología de la investigación

1.8.1. Unidad de análisis

La unidad de análisis en la presente investigación es la bomba horizontal multietapas (HPS-03) HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER del sistema de reinyección de agua producida en un lote petrolero. En el lote petrolero se cuentan con 07 unidades de bombas horizontales multietapas, cada una de ellas con las mismas características técnicas, condiciones de instalación, condiciones climáticas, variables de operación y ubicación física.

1.8.2. Tipo, enfoque y nivel de investigación

Tipo de investigación: La presente investigación corresponde a una investigación de tipo **aplicada**, porque está orientada a resolver un problema práctico en las instalaciones de un lote petrolero. Este tipo de investigación aplica los conocimientos teóricos y metodológicos existentes sobre el análisis de riesgos de fallas en los equipos mediante la Metodología de Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) para proponer una solución a un problema real con repercusiones tangibles en el contexto industrial.

Enfoque de investigación: La presente investigación corresponde a una investigación de enfoque mixto, el cual combine métodos cualitativos y cuantitativos para analizar los riesgos de fallas en bombas. El componente cualitativo explora los impactos en el lote petrolero y sus alrededores a través de consultas, grupos focales y revisión de información cualitativa, captando las percepciones de operadores, técnicos y especialistas de mantenimiento. En contraste el enfoque cuantitativo evalúe las decisiones del Plan de

mantenimiento mediante los registros de datos estadísticos analizando la frecuencia de fallas, el tiempo de inactividad, costos de reparaciones entre otros.

Nivel de investigación: La presente investigación corresponde a una investigación de nivel **descriptivo**, porque implica describir la situación y características del riesgo de las fallas de las bombas del lote petrolero. Así mismo, porque busca la descripción del análisis FMEA, las funciones, fallas funcionales, modos de falla, efecto, prioridades de riesgo asociado a cada uno de los componentes de las bombas de mayor criticidad de un lote petrolero y la propuesta de mejora.

1.8.3. Diseño de investigación

La presente investigación corresponde a una investigación de diseño **No experimental**, porque no se desarrolla la manipulación directa de variables ni la aplicación de tratamientos o intervenciones específicas a las bombas; sino más bien, se centra en la observación y descripción de la situación actual y la propuesta de mejora.

1.8.4. Fuentes de información

- Archivos documentados de mantenimiento
- Bibliografía de estado del arte
- Diagrama de decisión RCM
- Hoja de decisión de RCM
- Hoja de información de RCM
- Matriz de criticidad de activos físicos fijos
- Programa Microsoft Excel 2016

- Programa Ms Project 2016
- Juicio de expertos

1.8.5. Población y muestra

- **Población:** Activos físicos fijos de los procesos de producción de un lote petrolero.
- **Muestra:** 40 unidades de equipos de bombeo (bombas) de los procesos de producción del lote petrolero.

1.8.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para el desarrollo de la presente investigación, se hizo uso de la técnica **observacional participante**, dado que se visualizó el estatus actual de las bombas horizontales multietapas del sistema de reinyección de agua producida del lote petrolero. El cual ha permitido al investigador observar directamente las operaciones y mantenimiento de las bombas de mayor criticidad, entender los desafíos en tiempo real e identificar detalles, recopilando información como fallas frecuentes, parada programadas y no programadas, componentes de los equipos, ubicación técnica de los activos, estado de los equipos, entorno medioambiental y de seguridad.

Así mismo, se hizo uso de la técnica de **grupos focales**, para explorar temas específicos relacionados con las fallas de las bombas, los procedimientos de mantenimiento y las posibles mejoras, fomentando la discusión entre diferentes participantes involucrados en el mantenimiento de los equipos.

Para el desarrollo de la presente tesis se hizo uso del **análisis documental** como instrumento de recolección de datos, dado que se recopiló y revisó registros de mantenimiento existentes, informes de fallas pasadas, manuales técnicos de las bombas, entre otros documentos relevantes que proporcionan contexto y detalles de funcionamiento y características de las bombas. Así mismo, se hizo uso de **checklist de observación** para registrar sistemáticamente la información, tales como:

- Formato tabla para registro de equipos
- Formato tabla para análisis de criticidad
- Formato tabla para análisis de modos y efectos de falla
- Hoja de decisión RCM para elección de tareas y estrategias de mantenimiento

1.8.7. Análisis y procesamiento de datos

En base a toda la información recolectada para el desarrollo de la investigación, se realiza la evaluación de la criticidad de los equipos de bombeo (bombas) de los procesos de producción del lote petrolero, para identificar las bombas más críticas y establecer prioridades de mantenimiento hacia ellos. Una vez identificado las bombas de mayor criticidad, se procede a jerarquizar la criticidad de los subsistemas (un conjunto de subsistemas conforma a un equipo) del activo físico identificado. Posteriormente, con el activo y sus subsistemas críticos identificados, se procede a direccionar la Metodología de Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) a dichos equipos, realizando la evaluación de las fallas considerando el riesgo asociado a cada uno de ello. Así mismo, la criticidad de los modos de falla se realiza mediante el Número de Prioridad de Riesgo (NPR). Finalmente, se determinan actividades y tareas estratégicas de mantenimiento, de esa forma, proponer un Plan de Mantenimiento bajo la metodología FMEA establecida considerando la evaluación de los riesgos asociados a la falla.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1. Marco Teórico

2.1.1. Mantenimiento

Dentro de la literatura de los conceptos del mantenimiento, existen una gran variedad de definiciones que describen el término “mantenimiento”. Pérez (2021) refiere que el mantenimiento representa un conjunto de acciones que deben efectuar los encargados de un ambiente industrial para garantizar que los equipos e instalaciones mantengan las condiciones para los cuales fueron diseñados, instalados y puestos en operatividad en el entorno del proceso productivo. (p. 21).

Por su parte, el diccionario de la Real Academia Española define el mantenimiento como un conjunto de actividades y cuidados que son requeridos para que los ambientes, industrias, etc., continúen en correcto funcionamiento. (Real Academia Española: Diccionario de la lengua española, 23.^a ed.).

Moubray (2004) menciona que todo equipo es colocado en operatividad debido a que alguien requiere que el activo desarrolle algo, por ello el mantenimiento hace referencia a garantizar que los equipos se mantengan realizando lo que sus usuarios requieren que se efectúe, es decir, que el equipo desarrolle una serie de determinadas funciones preestablecidas. (p. 7).

2.1.2. Gestión del mantenimiento

La gestión de mantenimiento sigue un proceso sistemático y estructurado que direcciona sus actividades al seguimiento de los activos físicos fijos de una empresa, instalación o industria, los cuales, según las políticas empresariales, buscan disponibilidad de sus equipos, acompañado de un alta confiabilidad, costos optimizados y seguridad total en sus operaciones. De esa forma, requiere acciones necesarias para operar dentro de las condiciones tecnológicas y técnicas exigidas, que busquen generar bienes y servicios que van a satisfacer los requerimientos de los usuarios finales, contando con niveles de calidad, tiempo y presupuestos, poniendo a la empresa con mayores índices de competitividad y productividad en su línea de negocio empresarial. A su vez, garantiza una serie de acciones, consignadas dentro de un plan, que incluye la finalidad de garantizar un flujo normal de operaciones de producción, que van incurrir al menor costo posible a las posibles fallas no programadas de los equipos usados en el proceso productivo, designar las funciones del personal de mano de obra directa y a la supervisión, así mismo de las condiciones ambientales donde se opere.

Así mismo, Mora (2011) resalta en el contenido de su publicación que, la gestión de mantenimiento se encuentra constituido por diferentes aspectos, tales como la planificación, el ambiente organizacional, las coordinaciones, el desarrollo de la ejecución y finalmente el control de todas las acciones propias del mantenimiento, conservando el objetivo de cumplir con su misión. (p. 38).

De acuerdo a Ranjan, et al. (2019) refieren que la innovación de cada empresa es constante a través de los años en el ambiente de la práctica del mantenimiento, innovaciones que, efectivamente, van mejorando la disponibilidad de los equipos y en aumento a la productividad de la organización.

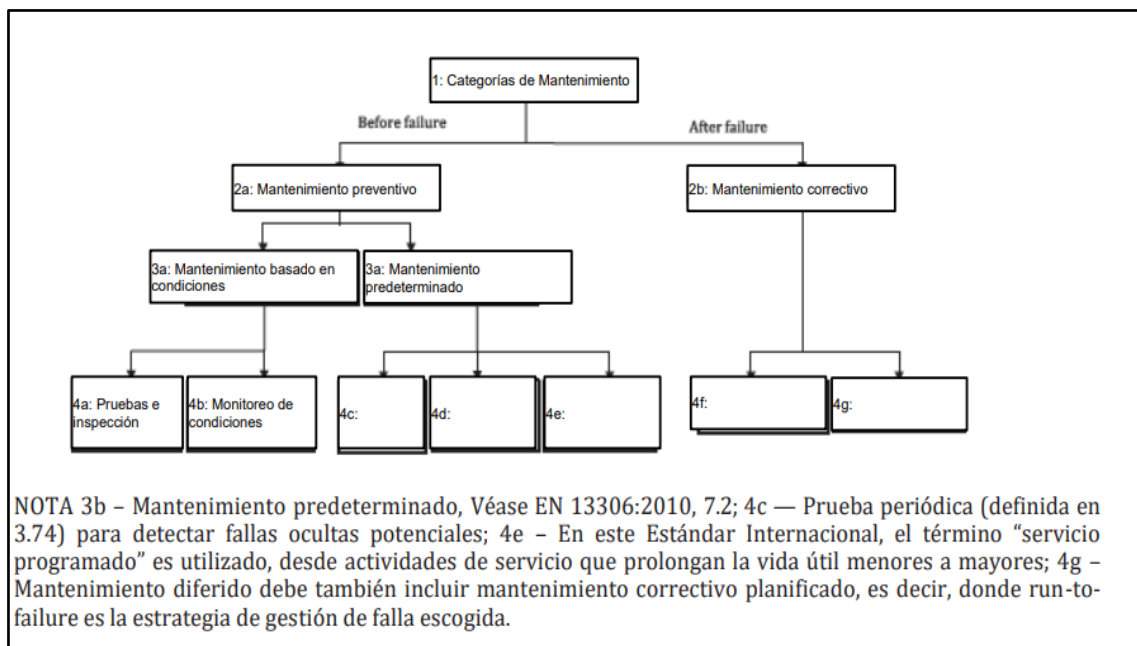
2.1.3. Tipos de mantenimiento en el sector industrial

Existen diferentes fuentes que mencionan una gran variedad de los tipos de mantenimiento que existe en el sector industrial, una diferente a otra respecto a cada autor, algunas más extensas en diversidad respecto a las mismas.

La norma ISO 14224 menciona que, existen 2 categorías fundamentales de mantenimiento, el mantenimiento preventivo (antes de la ocurrencia de una falla) y correctivo (después de la ocurrencia de una falla). (ISO 14224, 2016, p. 50). Luego, según el estándar mencionado, los tipos de mantenimiento se ramifican, de cada uno, en diferentes categorías, encontrando, por ejemplo, el mantenimiento basado en la condición, el mantenimiento predeterminado, entre otros.

Figura 4

Estructura de tipos de mantenimiento



Nota. El gráfico representa la categorización de los tipos de mantenimiento. Fuente: Norma BN EN ISO 14224 (2016).

Por su parte, Pinzón (2023) en su artículo “Tipos de mantenimiento” indica que existen 6 tipos de mantenimiento, los cuales detalla en: mantenimiento correctivo, mantenimiento preventivo, mantenimiento predictivo, mantenimiento productivo total, mantenimiento centrado en la confiabilidad y mantenimiento basado en el riesgo

Por ello, dentro de la industria, principalmente se describe los siguientes tipos de mantenimiento que tienen coincidencia y más comunes entre los diferentes autores, mantenimientos como: Correctivo, Preventivo, Predictivo y Proactivo.

a) Mantenimiento Correctivo

Este tipo de mantenimiento es también denominado, comúnmente, como mantenimiento reactivo, el cual es aplicable en el momento que el activo deja de funcionar, ya sea debido a la presencia de una falla. El principal objetivo de este tipo de mantenimiento es restablecer el normal funcionamiento del equipo y ponerlo nuevamente en marcha al proceso, en efecto, sin realizar modificación en la productividad de la empresa, tratando de primar la sustitución o reparación de los componentes o el equipo completo en el menor periodo de tiempo posible. Así mismo, este tipo de mantenimiento también se ejecuta en los supuestos casos donde las empresas no cuenten con conocimientos de diagnósticos de las fallas presentadas en el equipo, las herramientas adecuadas, personal calificado y tecnologías modernas para efectuar otras variantes de tipos de mantenimiento. El mantenimiento correctivo se puede ramificar en otras 2 clases. (Pérez, 2021, p.37).

- **Mantenimiento correctivo programado:** se desarrolla cuando se conoce con anticipación que el equipo va a fallar, por tal motivo se programa, para otro momento, el mantenimiento para corregir la supuesta falla.

- **Mantenimiento correctivo no programado:** se desarrolla en el momento que aparece una falla imprevista en el equipo, el cual genera una detención o interrupción en el normal funcionamiento del equipo, es decir, el equipo deja de funcionar.

b) Mantenimiento Preventivo

Es considerado como un agrupamiento de actividades planificadas, las cuales serán ejecutadas en periodos y fechas preestablecidos. Este tipo de mantenimiento presenta como objetivo principal que los activos físicos fijos desarrollen las funciones que se requieren dentro de un contexto de operación, tratando de conseguir la eficiencia de los procesos, de esta forma para prevenir y anticiparnos a posibles fallas de los componentes de un equipo. Dentro de sus actividades refiere a inspección, reemplazo de componentes, evaluaciones, limpieza, lubricación, etc. que se realizan con frecuencia de calendario o por horas. (Pérez, 2021, p.39).

Dentro de los objetivos más importantes se encuentran los de incrementar al máximo la disponibilidad y confiabilidad de los equipos en cada instalación o ambiente. Cada término es definido de la siguiente forma:

1. Disponibilidad: definida como la probabilidad de que un equipo pueda funcionar cada vez que se necesite por sus usuarios.
2. Confiabilidad: definida como la probabilidad que un equipo se encuentre funcionando en cada instante que el usuario lo requiera.

Pérez (2021) establece 3 categorías dentro del mantenimiento preventivo. Así mismo, establece 4 etapas dentro del proceso de la aplicación de un plan de mantenimiento preventivo, los cuales se mencionan de acuerdo a lo siguiente:

Categorías de mantenimiento preventivo:

- Cubrimiento del manteamiento preventivo: contempla en establecer y considerar la cantidad de equipos de criticidad alta respecto al total para los cuales se han desarrollado programas de mantenimiento de prevención.
- Ejecución del mantenimiento preventivo: representa la cantidad de mantenimientos preventivos programados que han sido ejecutadas en un periodo determinado.
- Trabajos originados por la redundancia del mantenimiento preventivo: se consideran como la cantidad de actividades requeridos y/o solicitados que cuenta como punto de inicio u origen una rutina de mantenimiento preventivo.

Etapas de aplicación para un plan preventivo de mantenimiento:

- Planificación: etapa que contempla los recursos y actividades que van a ser desarrolladas, tales como la mano de obra ejecutora, la duración, maquinas, herramientas, etc.
- Programación: etapa que incluye el momento exacto en el que se desarrollarán las actividades, fecha, hora, lugar de desarrollo, etc.
- Ejecución: etapa que consigna la aplicación del trabajo, es decir, el desarrollo propiamente de las actividades, que han sido establecidos previamente en la planificación y programación.
- Control: etapa que se centra en verificar y validar los trabajos que han sido desarrollados en la etapa de ejecución.

c) Mantenimiento Predictivo

Es un tipo de mantenimiento que consiste, en cierto aspecto, pronosticar una futura falla o problema de un componente o equipo, el cual direcciona el objetivo de sus actividades en tratar que dicho componente o equipo pueda ser reemplazado, de acuerdo a un plan, previo a la ocurrencia de una posible falla. De esta forma, se trata de que el tiempo de inoperatividad del equipo disminuya y, además, el tiempo en el ciclo de vida del equipo o componente se extienda al máximo posible. Por lo tanto, este tipo de mantenimiento precisa y gestiona los valores de pre alarma, teniendo en cuenta el registro, medición, rastreo y supervisión de los parámetros y las condiciones de operación de un equipo en el contexto de su instalación. (Pérez, 2021, p.48).

La práctica de mantenimiento predictivo más comunes en la industria abarca a los siguientes:

- Análisis vibracional
- Termografía
- Análisis de aceites.
- Ultrasonido
- Análisis de gases de combustión
- Análisis de luz ultravioleta.
- Control de espesores de elementos metálicos

Los objetivos del mantenimiento predictivo están basados, principalmente en lo siguiente:

- Aumentar la disponibilidad del equipo
- Mejorar la confiabilidad del equipo o instalación
- Minimizar la pérdida de insumos primarios debido paradas o interrupciones no planificadas.
- Disminuir el índice de intervenciones por periodo, que se den en los equipos.
- Minorizar los gastos por concepto de consumo de repuestos y consumibles.
- Optimizar el ciclo de vida del equipo.

d) Mantenimiento Proactivo

Para Amendola (2017), el mantenimiento proactivo logra y también permite asegurar el mejor performance durante el funcionamiento de los activos físicos fijos de una empresa o instalación. Así mismo, menciona que, el mantenimiento proactivo es una estrategia de mantenimiento que se sustenta en diferentes metodologías y herramientas, tales como el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) , en el estudio RAM (confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad), en los análisis causa raíz (ACR) y en las inspección centradas en el riesgo; siendo de gran ayuda y cooperación para permitir identificar las fallas en los equipos de una planta y, de esa forma, evitar en la medida que sea posible las intervenciones innecesaria al equipo. Por lo que, este tipo de mantenimiento se fundamenta en una metodología organizada que direcciona sus acciones hacia la búsqueda de la clasificación en la productividad de los equipos y llevar a efecto las acciones de corrección para minimizar los costos durante el ciclo de vida útil del activo. Los principales objetivos en el mantenimiento proactivo radican en lo siguiente:

- Reducir los costos provenientes de la intervención de fallas en el equipo y por acciones inadecuadas de mantenimiento.
- Extender la capacidad de producción donde opera el equipo
- Optimizar el performance, costos y riesgos asociados a los equipos
- Extender del tiempo de vida útil de un equipo durante su ciclo de vida
- Minimizar el tiempo de inmovilización de un equipo
- Mejorar la confiabilidad de los equipos e instalaciones

2.1.4. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)

El Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) es una técnica que se emplea para la realización de un Plan en Mantenimiento en una empresa industrial, el cual permite mejorar las estrategias de mantenimiento que se sustenta principalmente en asegurar la disponibilidad y confiabilidad de los activos físicos que han sido determinados como críticos en el proceso de producción de una empresa.

Moubray (2009) menciona que el RCM es un desarrollo o progreso que es empleado para diagnosticar de que es lo que se debería ejecutar para garantizar que un equipo se mantenga realizando lo que las personas que usan el equipo desean que desarrolle en su ambiente de operación vigente. (p.7).

Por su parte, Amendola (2006) detalla que el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad se centra principalmente en el Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA), para proceder a desarrollar una evaluación de las funciones de un equipo, listar las posibles fallas, efectuar una localización de los modos de falla y sus causas, conocer cuáles son los efectos de dichas fallas y también evaluar las consecuencias que podría generarse a causa

de ello y, bajo esas evaluaciones, decidir las actividades estratégica más convenientes para su operatividad, el cual mantenga una armonía técnica factible y económica.

Por tal motivo Velasco, et al. (2016), manifiestan que dicho mantenimiento centrado en confiabilidad, va a permitir mejorar la aplicación de principios de confiabilidad en los equipos.

Torres (2017) en su investigación realizó una comparación entre las diferencias que presentan el mantenimiento tradicional respecto al Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad. (p. 25). La comparación se muestra en la Figura 5:

Figura 5

Diferencias entre el RCM y el mantenimiento tradicional

Mantenimiento Tradicional	Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)
Mantenimiento para conservar los equipos en buen estado.	Mantenimiento para conservar las funciones de los activos físicos.
Mantenimiento rutinario para prevenir la falla.	Mantenimiento rutinario para evitar reducir o eliminar las consecuencias.
El objetivo del mantenimiento era optimizar la disponibilidad de la planta a un costo bajo.	Su objetivo no solo es optimizar la disponibilidad de la planta, sino también aumentar la seguridad, la integridad ambiental, la calidad de los productos y el servicio al cliente.
La mayoría de los equipos tiende a fallar a medida que envejecen.	Se presenta modelo de fallas de los equipos determinados por curvas de probabilidad de falla contra la vida útil.

Nota. La gráfica muestra las principales diferencias entre el Mantenimiento tradicional y el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM). Fuente: Meléndez (2019).

Por lo mencionado, Moubray (2004), describe que el RCM es una metodología que permite identificar las fallas funcionales en base a conocimientos de las circunstancias y sucesos que dieron paso a la falla del activo (p.16). Así mismo, busca analizar las fallas funcionales, modos y efectos de la falla, teniendo en cuenta las consecuencias críticas de las mismas, considerando medidas correctivas, dentro de dichas medidas correctivas se consideran tareas proactivas que se basan en tres categorías:

1. Tareas de restauración programadas: centrado en la prefabricación de los componentes o la restauración del componente de una maquinaria o equipo, antes que termine su vida útil programada, sin considerar en la condición que se encuentre.
2. Tareas de descarte programadas: consta en deshacerse del componente de una maquina o equipo antes del tiempo programado, sin considerar la condición en ese momento.
3. Tareas en condición programadas: las nuevas técnicas son útiles para detectar fallas potenciales, de tal forma se pueda tomar acciones para evitar consecuencias que lleguen a traer consigo fallas funcionales, por lo que las tareas en condición buscan que los compontes de un equipo o maquina sean controlados bajo la condición que estén dentro de sus parámetros normales de funcionamiento adecuado.

2.1.5. Objetivos del RCM

Los objetivos del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad radican principalmente en 2 categorías, los cuales se establecen en los siguientes conceptos:

- **Objetivo estratégico:** El RCM permite desarrollar y fomentar habilidades de competencia durante su proceso, desde las actividades de operación de la empresa. Además, debido al aporte que efectúa, mejora la eficacia de los sistemas

de producción, tolerancia a la flexibilidad y a la capacidad de reacción, los cuales permiten reducir los costos de operación y, además, la preservación del conocimiento en la organización.

- **Objetivo operacional:** El RCM mantiene como principal objetivo garantizar que los activos físicos operan sin falla, ello dentro del desarrollo de sus acciones diarias. Así mismo, busca la eliminación de todo tipo de pérdidas, el mejoramiento de la confiabilidad de los equipos y también llevar a hechos la capacidad dispuesta o instalada.

2.1.6. Las 7 preguntas del RCM

Según el contenido de la norma SAE JA1011 “Criterios de evaluación para el mantenimiento centrado en la confiabilidad” establece que el RCM en su proceso de aplicación formula 7 interrogantes dirigidas hacia los equipos que se pretende realizar una evaluación que se requiere. (Moubray, 2004, p.7). Así mismo, el RCM debe disponer la facultad de responder de forma fructífera cada una de las 7 formulaciones en el orden que se muestra a continuación:

1. ¿Cuáles son las funciones y niveles de performance relacionado al equipo que se deben cumplir en su contexto operacional vigente?
2. ¿De qué maneras podría fallar al cumplir sus funciones?
3. ¿Qué es lo que causa cada uno de las fallas funcionales?
4. ¿Qué es lo que sucede en el momento de ocurrencia de cada falla?
5. ¿De qué forma radica la importancia de cada falla?
6. ¿Qué es lo que debería efectuarse con el objetivo de predecir o prevenir cada una de las fallas?

7. ¿Qué acciones se deben aplicar en caso de no definirse un lineamiento de actividad proactiva conveniente?

De acuerdo a Barrios & Molina (2018), refieren que la aplicación del RCM a los activos físico fijos, es en efecto muy rentable desde el punto de vista económico, dado que permite disminuir los costos de operación y, así mismo, también permite aumentar la productividad de la empresa. En complemento a dicho argumento, Guerra & Montes (2019), mencionan que el bajo ratio de performance en el cumplimiento de los planes de mantenimiento de los equipos disminuye la disponibilidad y confiabilidad de los activos y, de esa forma, el aumento en gran medida de los costos operativos, lo que podría aducirse como un beneficio que implica el uso del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad en el entorno de las empresas industriales.

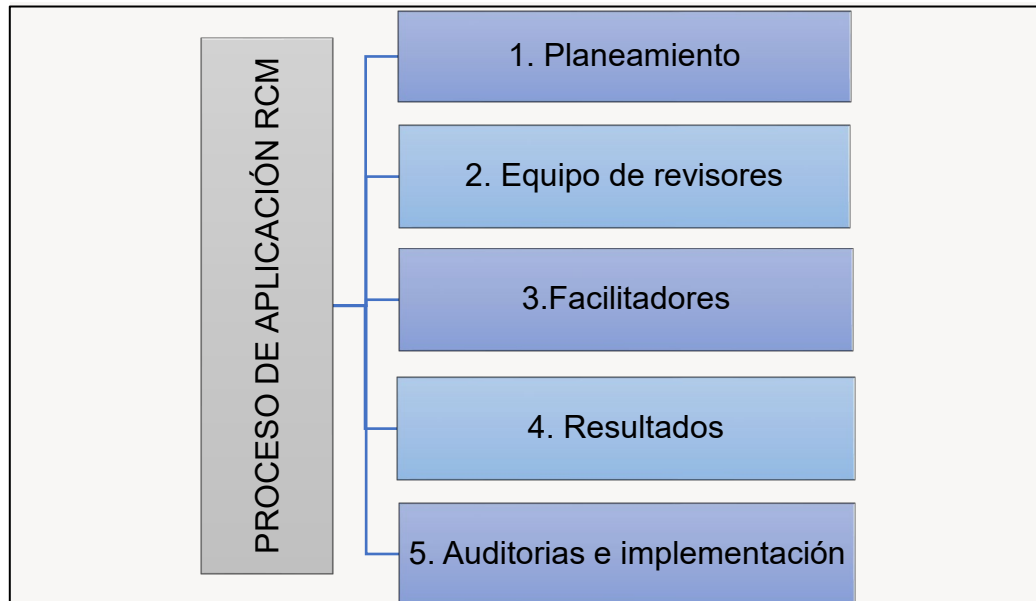
2.1.7. Proceso de aplicación general del RCM

Córdova (2005) menciona que el proceso de implementación o aplicación del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) se encontrará influenciado principalmente en el performance del conjunto de personas conformados para en análisis RCM, quienes deben seguir una serie de pasos, tales como: consolidación del grupo de trabajo, elección del sistema y determinación de la situación operacional, análisis FMEA, uso de la hoja de decisión y finalmente entrega del plan de mantenimiento.

Por su lado, Moubray (2004) detalla que la aplicación de la metodología del RCM también comprende una serie de pasos. (p. 17). La serie de pasos se mencionan en la Figura 6 y se describen a continuación.

Figura 6

Diagrama de etapas de proceso de aplicación de RCM



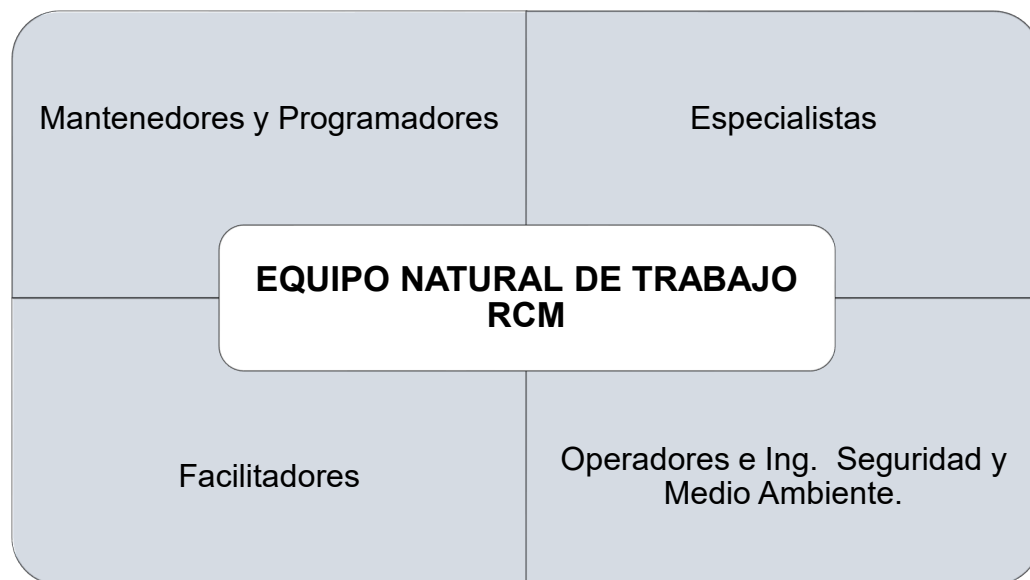
Nota. La gráfica muestra 5 etapas en el desarrollo de la aplicación RCM. Fuente: Elaboración propia, adaptado de Moubray (2004)

1. **Planeamiento:** La correcta aplicación del RCM logrará mayor efectividad, velocidad y mejoras en la gestión de mantenimiento en base a una planificación minuciosa y bien elaborada , la cual estará enmarcado en los siguientes procesos: seleccionar cuáles serán los activos físicos fijos que serán más favorecidos con la metodología y cómo serán beneficiados, analizar los recursos que se necesitan para el desarrollo del proceso, elegir minuciosamente quien o quienes llevarán a hechos y, además, quien auditará cada análisis, así como cuando y en qué lugar se llevarán a cabo las capacitaciones, finalmente garantizar que el ambiente de operación del equipo se muestre claramente detallado.

2. **Equipo de revisores:** Debe estar constituida por un grupo de personas multidisciplinarias, es decir, de diferentes especialidades y áreas de la organización, entre ellos personal de mantenimiento y operaciones, quienes deben estar correctamente capacitados en cuanto al RCM. La Figura 7 muestra un ejemplo típico de un equipo revisores de RCM.

Figura 7

Conformación del grupo de trabajo de RCM



Nota. La gráfica muestra un ejemplo de conformación del equipo de trabajo para el desarrollo del RCM. Fuente: Elaboración propia, adaptado de Cruzado (2020).

3. **Facilitadores:** El equipo de revisores de RCM labora bajo los lineamientos, guía y supervisión de especialistas altamente calificados en RCM, quienes son generalmente conocidos como “facilitadores”. Las principales funciones de los facilitadores son garantizar lo siguiente:

- a) La evaluación del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad se desarrolle en la horizontalidad correcta, la circunscripción en cuanto al sistema esté notoriamente determinados, que algún ítem significativo no sea dejado de lado, es decir, sin análisis y que los resultados producto de la evaluación sean correctamente consignados en la documentación que corresponde.
- b) Que cada uno de los miembros del equipo de trabajo logre por completo comprender el análisis RCM y que puedan aplicarlo exitosamente.
- c) Que cada integrante del equipo mantenga el entusiasmo a lo largo del desarrollo de RCM y, que los mutuos acuerdos en las decisiones se logren sin demoras y de forma organizada.
- d) Que la evaluación se lleve a cabo razonablemente sin muchas demoras y se logre culminar dentro de periodos aceptables, es decir, sin atrasos.

4. **Resultados:** de lograrse una aplicación exitosa y efectiva el análisis RCM, como lo mencionado anteriormente, se pueden conseguir 3 grandes resultados, los cuales son:

- a) Rutinas de mantenimiento según el sector competente
- b) Procedimientos operativos que son seguros para los operadores del equipo.
- c) Un listado de acciones específicas sobre los cambios que se requieren en el entorno del diseño, fabricación o modo de operación del equipo, ello para revertir los puntos que no están logrando los niveles de productividad y exigencia deseados, de acuerdo a la configuración actual y/o vigente.

5. **Auditorías e implementación:** posterior a la culminación en la revisión de cada equipo, el personal responsable (generalmente los gerentes) deben aprobar la satisfacción de las decisiones tomadas dentro del grupo de revisión. Posteriormente, al ser aceptado por el personal responsable, cada una de las decisiones tomadas pasan a ser incluidos en las rutinas los planes de mantenimiento. Así mismo, se propone la incorporación de cambios en los procedimientos de operación de los equipos.

2.1.8. Resultados del uso de la metodología RCM

La correcta aplicación en el proceso del mantenimiento centrado en la confiabilidad brinda los siguientes beneficios:

- El RCM conduce a la eliminación o minimización de los efectos asociados a los riesgos medioambientales y propias a la completa integridad del equipo.
- El RCM trata de asegurar su direccionamiento de actividades a los mantenimientos que son más convenientes para cada equipo, es decir, focaliza las actividades de mantenimiento.
- El RCM ayuda a garantizar que absolutamente todo lo que se usa y gasta para los mantenimientos sean aplicados en las áreas donde se generen y obtengan los más fructíferos resultados y performance del equipo.
- El RCM ayuda a extender el tiempo de vida aprovechable de los equipos.
- El RCM brinda al final de su aplicación un registro de información de su aplicación, en el cual se consigan cada requerimiento de mantenimiento para el activo en análisis.
- El RCM brinda motivación a los integrantes del grupo en el proceso de análisis del mismo, dado que brinda una amplia comprensión del funcionamiento y soluciones a los activos.

- El RCM difunde el trabajo en equipo mediante un medio comunicativo que permite ser entendible sin ninguna dificultad ante cualquier individuo que tenga correlación con el mantenimiento.

2.1.9. Análisis de modos y efectos de fallas (FMEA)

El FMEA (Failure Mode and Effects Analyses) que en español significa “ Análisis de Modos y Efectos de Falla” es un método que permite establecer los modos de falla de un sistema o equipo, en relación a su impacto y frecuencia con la que se presentan, clasificando a las fallas en un orden de acuerdo a su importancia, de esta forma logra detallar las tareas de mantenimiento para los sectores o áreas que podrían presentar mayor impacto económico, con el objetivo de reducirlas o eliminarlas por completo. (García, 2012, p. 109).

Por su parte, Franco (2010) menciona que el FMEA es una metodología que se utiliza para determinar las posibles fallas con alta potencialidad dentro de un equipo o proceso, con la finalidad es disminuir el riesgo involucrado a los mismos.

El FMEA tiene como objetivo básico, encontrar los modos de falla de un activo dentro de un proceso, así como reconocer las posibles consecuencias de fallo en relación a tres aspectos importantes del RCM, los cuales son: la seguridad medioambiental, la seguridad humana y a la productividad.

2.1.9.1. Ventajas del FMEA

En su estudio, Fernández (2019) realiza un listado de los beneficios del RCM, los cuales por ejemplo radican en: Identificación de fallas de un equipo, reconocimiento profundo de un equipo, identificación de las posibles consecuencias de una falla, reconocimiento de las causas, evaluación de la severidad de los efectos, oportunidades de mejoramiento, generación de conocimiento “Know How”, entre otros. (p.17)

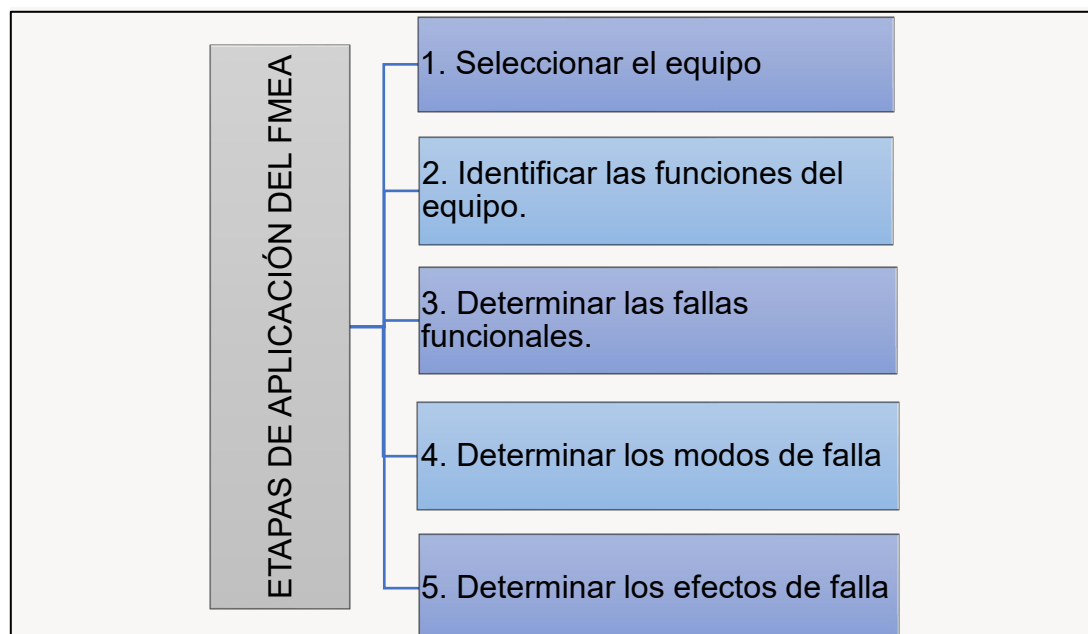
Coronado (2007) menciona que la mitigación de las fallas potenciales en los equipos representa provechoso a corto y largo plaza. En un horizonte inmediato, manifiesta ahorros significativos respecto a los costos en las restauraciones, disminución en periodos de detenimiento del equipo y la disminución de ensayos que se repiten constantemente. La utilidad a un horizonte más amplio, se encuentra en función de satisfacer al cliente con el bien y con su interpretación de la calidad.

2.1.9.2. Etapas de desarrollo del FMEA

El FMEA representa una metodología en el proceso de aplicación de la metodología del RCM y que, además, existen 5 etapas fundamentales durante el proceso de su aplicación. (García, 2011, p.112). La Figura 8 muestra las etapas de aplicación del FMEA.

Figura 8

Etapas de desarrollo de la aplicación del FMEA



Nota. La gráfica muestra 5 etapas que cuenta la aplicación de la Metodología de Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA). Fuente: Elaboración propia, adaptado de García (2012).

2.1.10. Funciones de un equipo

La norma SAE JA1011 define a la función de un equipo o sistema como la acción que sus usuarios necesiten que se lleve a cabo. (SAE JA1011, 2002, p. 6).

Por su parte, Coronado (2007) menciona que la función de un equipo o sistema representa a la finalidad para el cual fue adquirido.

Moubray (2004) manifiesta que las funciones representan una situación de los equipos que se requiere conservar por sus usuarios. Además, la estructuración del enunciado de la función de un equipo debe contener un verbo, un objetivo y, sobre todo, un nivel de desempeño aceptable y satisfactorio por sus beneficiarios. (p.23).

Las funciones se clasifican en dos categorías, los cuales son:

a) Funciones Primarias

Las entidades compran bienes físicos por varias razones, dicha “razón” para la obtención de un bien se le denomina funciones primarias, los cuales son de fácil reconocimiento, además, se debe definir con mucha precisión. Por lo que, mantener y alcanzar los niveles satisfactorios de calidad va a depender de la capacidad y la condición de las expectativas de funcionamiento involucradas a las funciones primarias (Moubray, 2004, p.36).

b) Funciones Secundarias

Consta que en su gran mayoría los activos físicos fijos desarrollan varias funciones complementarias o adicionales, muy aparte de la ejecución de la función primaria, dichas funciones son denominadas como funciones secundarias. Dichas funciones son menos

evidentes, requieren mayor atención y, además, las fallas pueden ser aun de mayor gravedad que las funciones primarias (Moubray, 2004, p.40).

Para garantizar las funciones secundarias, se tiene en cuenta 7 categorías necesarias, los cuales son:

- Integridad en la estructura o seguridad.
- Integración medioambiental.
- Retención, control y comodidad
- Estética
- Custodia
- Económico y eficiente
- Funciones prescindibles

2.1.11. Contexto Operativo

Es el conjunto de condiciones del proceso por el cual opera un equipo, así mismo incluye todo los parámetros y criterios de desempeño deseado por el usuario, los cuales están definidos a partir de descripciones y diagramas del proceso en el que opera el equipo, al igual que, las entrevistas del personal de producción, mantenimiento y operación, previamente analizando y comprendiendo el contexto operativo antes de comenzar la aplicación del RCM (Moubray, 2004, p.29).

2.1.12. Falla

Ramírez (2014) define a la falla como una circunstancia no deseada o que no brinda cierta satisfacción. Es decir, que un elemento o equipo no cumple su una función en base a ciertas características predefinidas.

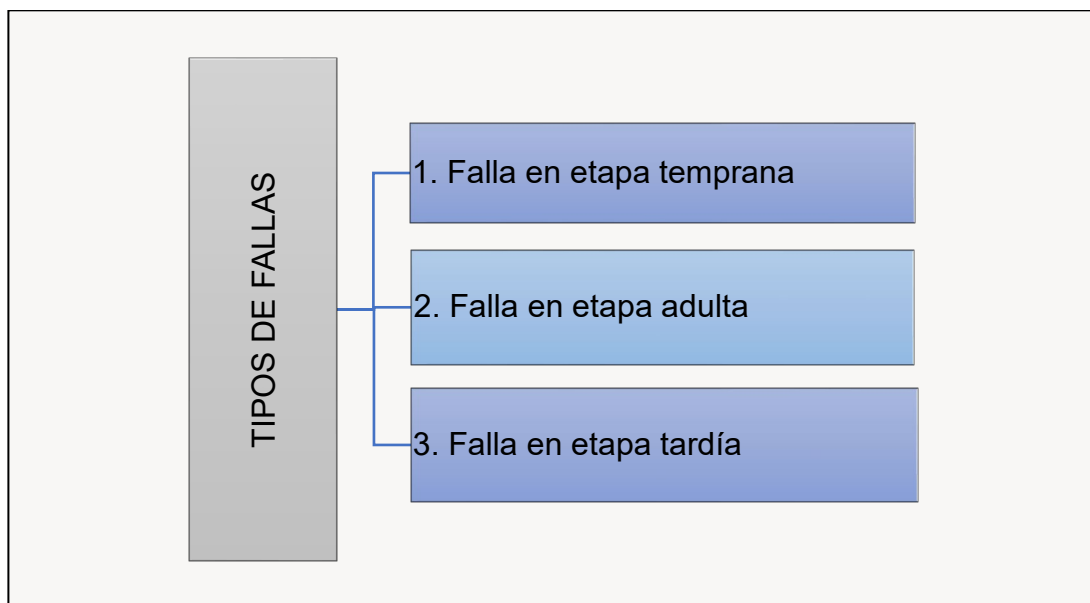
Así mismo, una falla funcional representa la pérdida de la función de un equipo, también se define como la incapacidad de un bien que no cumple con una función determinada en cuanto al nivel de desempeño aceptable por el personal que usan el equipo. (Moubray, 2004, p.31).

2.1.12.1. Tipo de falla

Martínez (2010) enfatiza que existen 3 tipos de fallas, las cuales se muestra en la Figura 9 y se definen de la siguiente forma:

Figura 9

Esquema de representación de tipos de fallas



Nota. La gráfica muestra la jerarquización de 3 los tipos de falla que se presentan en los equipos. Fuente: Elaboración propia, adaptado de Martínez (2010).

Falla en etapa temprana: Fallas que suceden al inicio del ciclo de vida de un componente o equipo.

- Falla en etapa adulta: Fallas que se dan durante la vida útil del componente o equipo, adquieren notoriedad lentamente y son las fallas que ocurren con más frecuencia.
- Falla en etapa tardía: Fallas que acontecen en la última fase durante el proceso del ciclo de vida de los componentes o equipos.

2.1.13. Modo de Falla

Es descrito como cualquier situación que provoca una falla funcional en un equipo. Si se requiere aplicar verdaderamente un mantenimiento proactivo a los activos, se debe tener en cuenta que eventos van a generar fallas, es decir, los modos de falla, dado que un equipo puede fallar por cientos de modos de falla. Una vez que se identifique el modo de falla, se procede a realizar una evaluación de su consecuencia y, posteriormente, tomar acciones que conlleven en adelantar, anticipar, rectificar, localizar o a volver a realizar una modificación del diseño en el componente o equipo. (Moubray, 2004, p.56).

En complemento, Coronado (2007) adiciona que los modos de falla pueden ser reconocidos mediante la descripción de la manera en que falla un componente o equipo.

2.1.14. Efectos de Falla

Muestra la descripción de que es lo sucede en el momento que se presenta un modo de falla, dicho detalle de la descripción debe contener toda la información que será necesaria para realizar el análisis que conlleva a las consecuencias de falla (Moubray, 2004, p.76).

Cuando se describen los efectos de falla de un equipo se deben registrar los siguientes aspectos:

- Evidencias del suceso de la falla
- En qué medida representa un peligro medioambiental y a la seguridad.
- De qué forma perjudica a la producción y operación.

- Los perjuicios tangibles ocasionados.
- Qué acciones deben llevarse a hecho para remediar la falla.

2.1.15. Consecuencias de falla

Cada falla que ocurre en un equipo perjudica de ciertas formas a la empresa que le da uso. Las fallas producen perjuicios a la producción, calidad, seguridad, medio ambiente, costos, entre otros. La criticidad de cada uno de esos perjuicios refiere a la consecuencia de dichas fallas. Así mismo, el efecto de falla refiere a lo que sucede ante el suceso de una falla, mientras que la consecuencia refiere a la importancia de “cómo” y “cuánto”. (Moubray, 2004, p.95).

Además, Moubray (2004) también menciona que se debe tomar la elección si en realidad es justificable la ejecución de alguna actividad de tipo proactiva en el mantenimiento del activo, que consideren los aspectos y principios en el proceso de análisis de las consecuencias de fallas. (p.96).

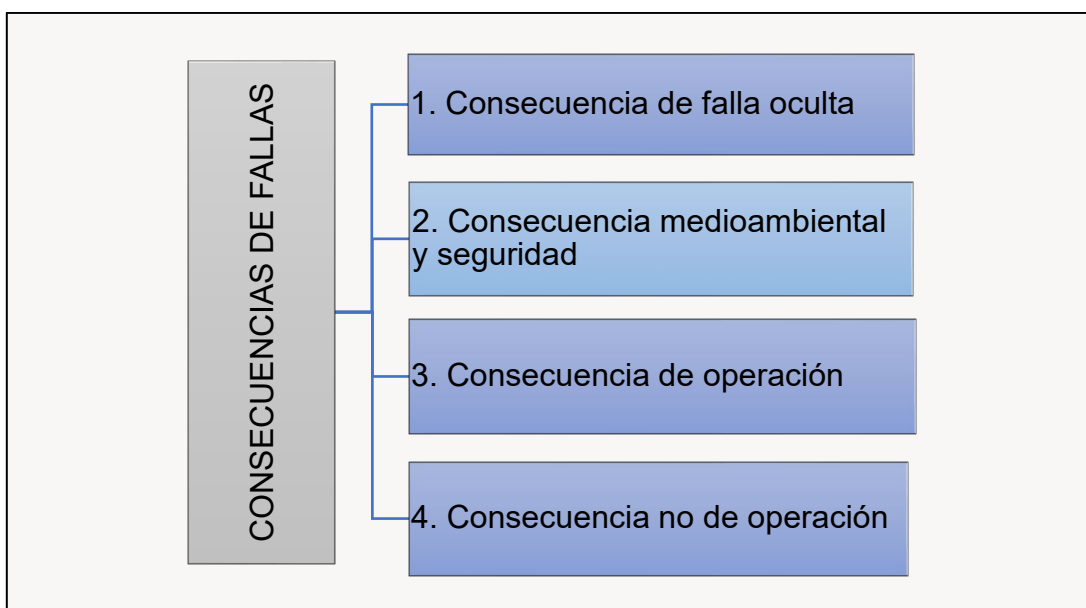
Así mismo, Sexto (2014) describe que las consecuencias de falla pueden dividirse en 4 aspectos, los cuales se pueden visualizar en la Figura 10. Así mismo, a continuación, se describen la clasificación de las consecuencias de las fallas en las siguientes líneas:

- Falla oculta: representa un peligro para la organización, dado que podría conllevar a otra serie de fallas múltiples, los cuales podían generar resultados catastróficos de gran envergadura.
- Medioambiental y seguridad: representa un riesgo ante el incumplimiento de alguna normativa medioambientalista local o exterior, así como potenciales riesgos a la seguridad y también ocasionar desenlaces funestos en las personas que trabajan en la operación y mantenimiento de los equipos.

- Operativas: afecta principalmente a la producción de bienes o servicios de la empresa en diferentes categorías, tales como: eficiencia, gastos, calidad, lucro cesante, entre otros.
- No operativas; afectan principalmente en los gastos que se generan por concepto de mantenimientos; sin que se impacte a la seguridad.

Figura 10

Clasificación de las consecuencias de una falla



Nota. La gráfica muestra la categorización de los tipos de consecuencias ante la ocurrencia de fallas en los equipos. Fuente: Elaboración propia, adaptado de Sexto (2014).

2.1.16. Análisis de criticidad

El diccionario de la Real Academia Española (RAE) define a la “criticidad” como la condición de crítico. Mientras que, el término “crítico” hace representación a algo de intensa gravedad. (Real Academia Española: *Diccionario de la lengua española*, 23.^a ed., [versión 23.7 en línea]. <<https://dle.rae.es>> [29 de febrero de 2024]).

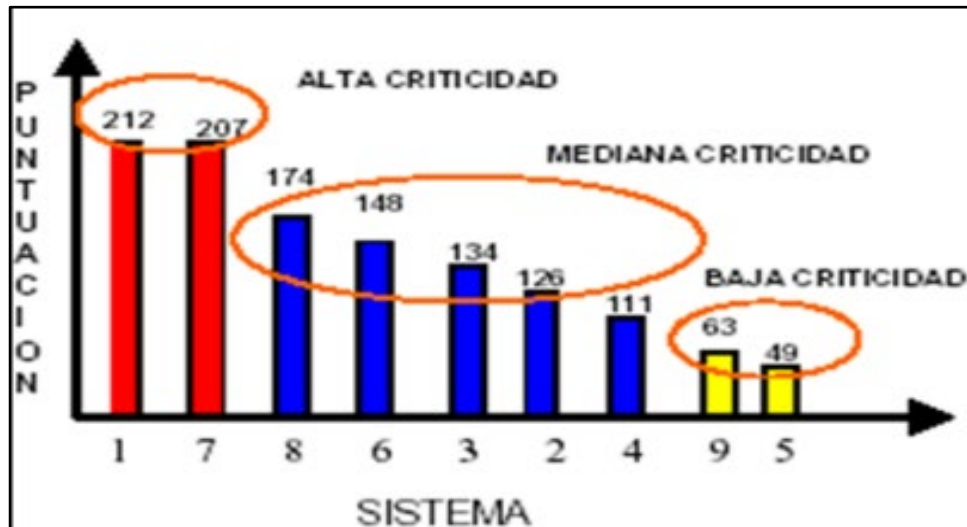
Coronado (2007) menciona que el análisis de criticidad representa un método estructurado que permite determinar y categorizar el ordenamiento y la jerarquización de algún elemento, tal como un equipo, un proceso o componente. Así mismo, la aplicación de este método brinda un registro ponderado, en el cual, mediante una numeración ascendente o descendente, se mencionan los elementos que son considerado críticos respecto a la totalidad de los elementos en evaluación. Generalmente, el método de análisis determina 3 zonas o grupos de calificación de criticidad: baja, media y alta. Una vez realizado ese agrupamiento, se ejecutan con mayor direccionamiento las estrategias que requieren cada uno de ellos.

Por su parte, Huerta (2000) enfatiza en su estudio que el fin último de un análisis de criticidad es la instauración de una metodología que contribuya, en los mejores aspectos, a la consecución de una determinada clasificación de los elementos de una organización, de tal manera que se pueda dividir en unidades que puedan ser posibles controlarlos y auditarlos. Para realizar el análisis, se debe establecer un alcance y un objetivo. (p.13)

Así mismo, Hernández & Pabón (2012) también mencionan que el resultado del desarrollo de un análisis de criticidad diferencia las 3 mismas áreas de agrupamiento, es decir, baja, mediana y alta criticidad.

Figura 11

Ejemplo de gráfica de barras resultado de un análisis de criticidad



Nota. La gráfica muestra un ejemplo de resultado de análisis de criticidad en ciertos equipos, notándose la agrupación en alta, mediana y baja criticidad. Fuente: Huerta (2000).

El análisis de criticidad puede ser de gran utilidad en ambientes de diferentes procesos, plantas industriales, activos físicos fijos y/o elementos que necesitan ser jerarquizados en relación a su efecto en su medio de análisis. Las áreas en las que en gran mayoría es utilizado son los siguientes ámbitos:

Mantenimiento

La aplicación del análisis de criticidad permitirá priorizar de manera eficiente los planes y programas de mantenimiento de los equipos, ello debido a que previamente se dispondrá de la identificación y agrupación de los equipos o sistemas más críticos, así mismo, coadyuvará en la decisión del orden a seguir en la ejecución de las actividades de mantenimiento u ordenes de trabajo. (Huerta, 2000, p.15).

Inspección

La aplicación del análisis de criticidad brinda facilidades para el desarrollo de un programa de inspección e indica las zonas donde se debe hacer mayor énfasis. Así mismo, también colabora en los procesos y/o elección de las frecuencias y tipos de inspección que se requieren en cualquier tipo de sistema u equipo de cualquier área de especialización. (Huerta, 2000, p.16).

Materiales

El desarrollo del estudio de criticidad ayudará a establecer el listado de herramientas y repuestos que se deben tener disponibles en stock en los almacenes de la empresa, así como también los requerimientos de los mismos. De esa forma, el estudio también permitirá lograr el costo óptimo de inventario, debido a que aclarará las cantidades de repuestos y/o materiales con los que se debe contar. (Huerta, 2000, p.16).

Disponibilidad de planta

La información de criticidad ayudará a identificar, como lugar de inicio, los puntos para la evaluación de posibles nuevos proyectos en la empresa. Los potenciales nuevos proyectos pueden radicar en la reformación o modernización de los sistemas, proceso y equipos fundamentados en los elementos que generan mayor consecuencia. (Huerta, 2000, p.16).

Nivel de personal

El desarrollo del estudio de criticidad permite ayudar a mejorar las habilidades del personal, dado que, debido a que se tiene una plena identificación de las necesidades del

ambiente industrial, se pueden realizar capacitaciones enfocadas en los ambientes de mayor criticidad. (Huerta, 2000, p.16).

2.1.17. Cálculo de factor de criticidad de equipos

La fórmula matemática que determina el valor del factor numérico de un análisis de criticidad es el siguiente:

$$\text{FC} = \text{Frecuencia} \times \text{Consecuencia} \quad (1)$$

Donde:

FC: Factor de criticidad

Para realizar un correcto análisis de criticidad, se debe tener presente fundamentalmente 5 criterios. (Huerta, 2000, p.13). Los cuales se visualizan en la Figura 12.

Figura 12

Criterios fundamentales para un análisis de criticidad



Nota. La gráfica muestra 5 criterios fundamentales para la evaluación de un análisis de criticidad en equipos. Fuente: Elaboración propia, adaptado de Huerta (2000).

2.1.18. Número de prioridad de riesgo (NPR)

El número de prioridad de riesgo estima, en valores numéricos, las consecuencias que podrían generarse ante la ocurrencia de una falla dentro de un ambiente de análisis y, de esa forma, permite ubicar los componentes asociados a los modos de falla más críticos. Así mismo, ayuda a identificar y relacionar los riesgos más críticos en una organización y, en tal sentido, a elegir las acciones más convenientes respecto a la unidad de análisis. El valor del NPR se puede obtener mediante la multiplicación de tres parámetros fundamentales, los

cuales son: la severidad, la ocurrencia y la detección. La siguiente fórmula matemática brinda detalles del NPR (Número de Prioridad de Riesgo):

$$\text{NPR} = S \times O \times D \quad (2)$$

Donde:

NPR: Número de prioridad de riesgo

S: Severidad

O: Ocurrencia

D: Detección

En la Figura 13 se muestra un ejemplo de la escala del número de prioridad de riesgo en cierto estudio:

Figura 13

Ejemplo de escalas numéricas de NPR

NPR	Escala
NPR>200	Inaceptable
200>NPR>125	Reducción deseable
125>NPR	Aceptable

Nota. La gráfica muestra un ejemplo del establecimiento del rango del número de prioridad de riesgo (NPR). Fuente: Da Costa (2010).

2.1.18.1. Severidad

La severidad es una evaluación que puede cuantificarse en valores numéricos, el cual representa el nivel de riesgo de la consecuencia que podría generar ante la posible ocurrencia de una falla. A modo de ejemplo, en un escenario de evaluación de la severidad, se puede

establecer una escala del 1 al 10, siendo el valor 1 como el nivel de menor severidad y, en contraparte, el 10 como el nivel máximo de severidad. (Coronado, 2007, p.11).

La Figura 14 muestra una referencia de los criterios de análisis y ponderación que sugiere la norma AIAG (Grupo de acción de las industrias automotrices) para la clasificación de la severidad para un determinado estudio.

Figura 14

Criterios referenciales de evaluación para el análisis de severidad de falla

Efecto	Criterio: Severidad del efecto para un AMEF aplicado a procesos	Nivel
Peligroso sin aviso.	La falla afecta la operación segura del equipo. Puede poner en peligro al operador. La falla ocurrirá sin previo aviso.	10
Peligroso con aviso.	La falla afecta la operación segura del equipo. Puede poner en peligro al operador. La falla ocurrirá con previo aviso.	9
Muy alto	Interrupción mayor en la línea de producción. La falla ocurrirá con previo aviso.	8
Alto	Interrupción menor de la línea de producción. El equipo entra en operación en el siguiente turno.	7
Moderado	Interrupción menor de la línea de producción. El equipo entra en operación en el mismo turno.	6
Bajo	Interrupción menor de la línea de producción. El equipo opera con disminución de algunas funciones.	5
Muy bajo	Interrupción menor de la línea de producción. El equipo entra en operación en poco tiempo.	4
Menor	Interrupción menor de la línea de producción. El equipo entra en operación en muy poco tiempo.	3
Muy Menor	Sin interrupción de la línea de producción. Baja la eficiencia del equipo.	2
Ninguno	El modo de falla no tiene efecto.	1

Nota. La gráfica muestra un total de 10 niveles referenciales de ponderación en la evaluación de la severidad de falla según AIAG (Grupo de acción de las industrias automotrices). Fuente: Coronado (2007).

2.1.18.2. Ocurrencia

La ocurrencia es una evaluación que define la posibilidad de que suceda una situación en especial y conlleve a un modo de la falla durante el proceso del tiempo de vida útil del componente, equipo o sistema. A modo de ejemplo, en un escenario de evaluación de la ocurrencia, se puede establecer una escala del 1 al 5, siendo el valor 1 como el nivel de menor ocurrencia de fallas y, en contraparte, el 5 como el nivel de alta frecuencia de fallas. (Coronado, 2007, p.13).

La Figura 15 muestra una referencia de los criterios de análisis y ponderación que sugiere la norma AIAG (Grupo de acción de las industrias automotrices) para la clasificación de la ocurrencia de falla para un determinado estudio.

Figura 15

Criterios referenciales de evaluación para el análisis de ocurrencia de falla

Ocurrencia de Falla	Frecuencia de Fallas	Nivel
Muy alta: Fallas muy repetitivas	Promedio mayor o igual a 10 por año	5
Alta: Fallas repetitivas	Promedio mayor o igual a 6 y menor a 10 por año	4
Media: Fallas ocasionales	Promedio mayor o igual a 3 y menor a 6 por año	3
Baja: Pocas fallas	Promedio mayor o igual a 1 y menor a 3 por año	2
Muy baja: Muy pocas fallas	Promedio menor a 1 falla por año	1

Nota. La gráfica muestra un total de 5 niveles referenciales de ponderación en la evaluación de la ocurrencia de falla según AIAG (Grupo de acción de las industrias automotrices). Fuente: Coronado (2007).

2.1.18.3. Detección

La detección es una evaluación del análisis de la probabilidad de que un tipo de control establecido tenga la capacidad de localizar algún tipo de modo de falla en un sistema o equipo en un periodo determinado, o también que pueda anticiparse a generar una alarma previamente. Así mismo, es importante resaltar que los valores numéricos de detección están relacionados directamente con los actuales controles y monitoreos. (Coronado, 2007, p.15). La Figura 16 muestra criterios referenciales de análisis y ponderación que sugiere la norma AIAG (Grupo de acción de las industrias automotrices) para la clasificación de la detección de fallas para un determinado estudio.

Figura 16

Criterios de evaluación para el análisis de detección de falla

Detección	Criterio: probabilidad de detección por control de procesos.	Nivel
Casi imposible	No existen controles conocidos para detectar el modo de falla o la causa.	10
Muy remota	Probabilidad muy remota de que los controles vigentes detecten el modo de falla o la causa.	9
Remota	Probabilidad remota que los controles vigentes detectarán el modo de falla o la causa.	8
Muy baja	Probabilidad muy baja que los controles vigentes detecten el modo de falla o la causa.	7
Baja	Probabilidad baja que los controles vigentes detecten el modo de falla o la causa.	6
Moderada	Probabilidad moderada que los controles vigentes detecten el modo de falla o la causa.	5
Moderadamente alta	Probabilidad moderadamente alta que los controles vigentes detecten el modo de falla o la causa.	4
Alta	Probabilidad alta que los controles vigentes detecten el modo de falla o la causa.	3
Muy Alta	Probabilidad muy alta que los controles vigentes detecten el modo de falla o la causa.	2
Casi certeza total.	Los controles vigentes detectarán casi con certeza el modo de falla o la causa. Controles de detección confiables.	1

Nota. La gráfica muestra un total de 10 niveles referenciales de ponderación en la evaluación de la detección de falla según AIAG (Grupo de acción de las industrias automotrices). Fuente: Coronado (2007).

2.1.19. Contexto operacional de las bombas horizontales multietapas

El lote de producción de petróleo estructura a sus activos físicos fijos dentro de una arquitectura de activos (información incluida en el software de gestión de mantenimiento), el cual plasma la ubicación técnica y física de los equipos que pertenecen a la empresa de producción de petróleo. La arquitectura de activos divide a la planta de operación y facilidades en sistemas y subsistemas, los cuales permiten conocer el agrupamiento de los equipos según la característica que define a cada uno, de acuerdo al proceso o ubicación física en el que se encuentre cada uno. La Tabla 4 muestra la división de la arquitectura de activos en 24 sistemas.

Los equipos de bombeo (bombas) cumplen funciones fundamentales en el proceso de producción de petróleo. Las bombas en el proceso productivo desarrollan funciones importantes para transportar fluidos de diferentes procesos en el lote petrolero. Ello incluye el transporte de petróleo, agua dulce, diluyente (nafta) y reinyección de agua producida (agua producto del tratamiento de crudo que se envía nuevamente al subsuelo a través de pozos perforados).

Así mismo, en los procesos de producción del lote petrolero existe una gran cantidad de equipos de bombeo (bombas), los cuales se encuentran detallados en la Tabla 12, con diferentes características técnicas, tales como marca, modelo, presión de descarga, caudal, fluido de proceso, etc. instalados en diferentes ubicaciones.

Tabla 4*Jerarquización de activos del lote petrolero en sistemas*

SISTEMA	DESCRIPCIÓN
Sistema 001	Extracción - Producción
Sistema 002	Tratamiento de Crudo
Sistema 003	Tratamiento y Disposición de gas
Sistema 004	Tratamiento de Agua de proceso
Sistema 005	Reinyección de agua
Sistema 006	Almacenamiento de Crudo
Sistema 007	Almacenamiento, Recepción y Despacho de Diluyente (Nafta)
Sistema 008	Drenajes de Proceso
Sistema 009	Captación, Tratamiento y Almacenamiento de Agua fresca
Sistema 010	Sistema Contra Incendios (SCI)
Sistema 011	Emergencias (SCE)
Sistema 012	Aire y Nitrógeno
Sistema 013	Almacenamiento, Despacho, y Recepción de Combustibles
Sistema 014	Distribución Eléctrica
Sistema 015	Refrigeración de Procesos Eléctricos
Sistema 016	Pozos a tierra, Pararrayos y Mallas
Sistema 017	Protección Catódica
Sistema 018	Integridad de Activos - Tuberías
Sistema 019	Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP)
Sistema 020	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR)
Sistema 021	Disposición de residuos
Sistema 022	Control de procesos
Sistema 023	Análisis de productos del proceso
Sistema 024	Infraestructura

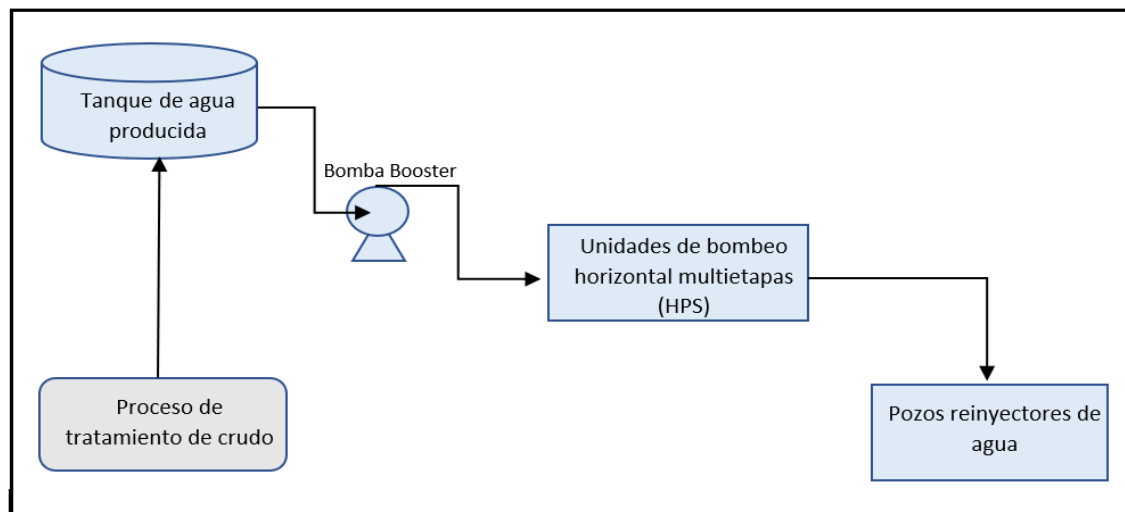
Nota. La tabla muestra la división jerárquica del lote petrolero en 24 sistemas, cada sistema se encuentra conformado por diferentes equipos. Fuente: Elaboración propia.

Uno de los procesos productivos del lote petrolero es el sistema de reinyección de agua producida, el cual es un proceso muy importante dentro del ciclo de producción de petróleo. El proceso productivo del sistema de reinyección de agua es realizado, principalmente, mediante el envío del agua producida (proveniente del proceso de tratamiento de crudo), los cuales se encuentran almacenados en los tanques de superficie (comúnmente denominados

en el sector hidrocarburos como tanques *Skimmer*) y posteriormente son transportados a través de equipos de bombeo hidráulico hacia los pozos de reinyección de agua, o también conocidos como pozos reinyectores. En la Figura 17 se muestra un bosquejo del diagrama de proceso del sistema de reinyección de agua desde el proceso de tratamiento de crudo y su disposición final en los pozos de agua.

Figura 17

Diagrama de proceso de reinyección de agua producida



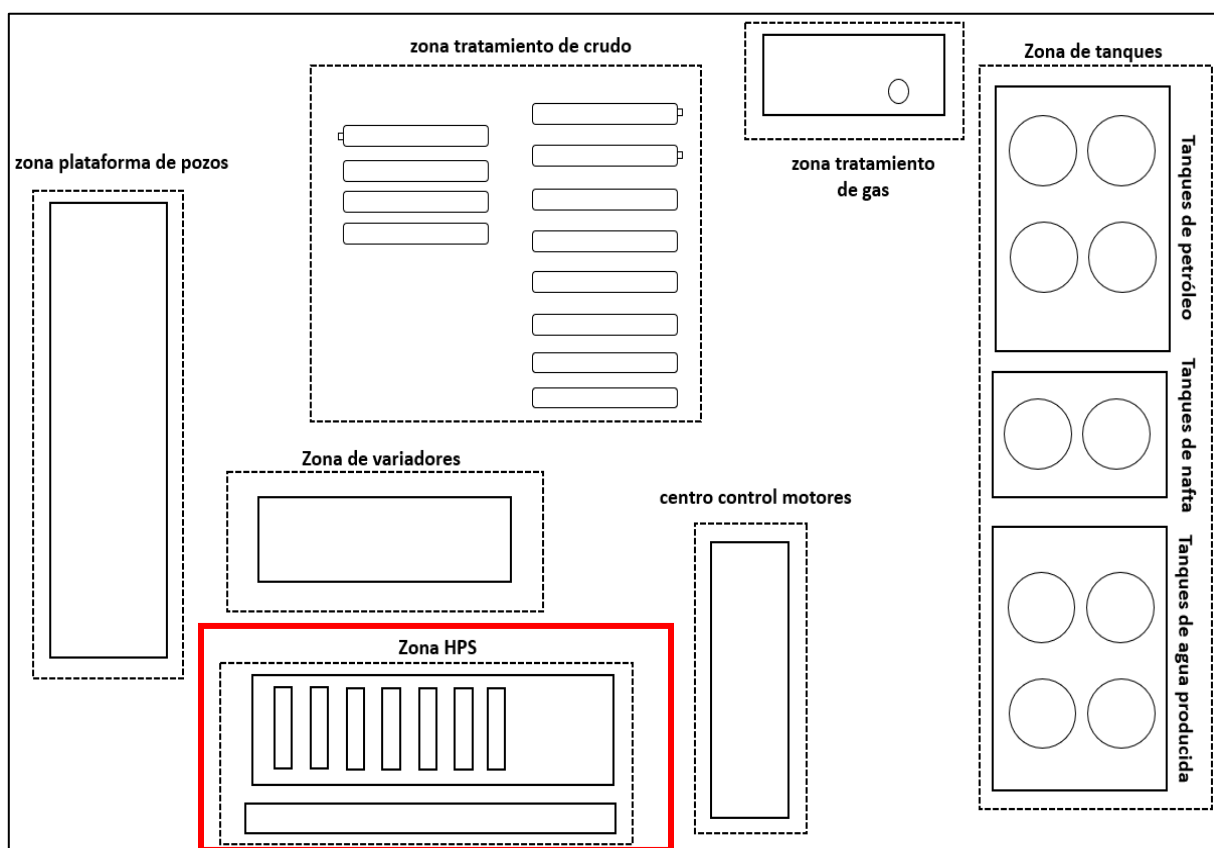
Nota. La gráfica muestra la representación del sistema reinyección de agua desde el tratamiento de crudo hasta su disposición final en los pozos reinyectores. Fuente: Elaboración propia.

El sistema de reinyección de agua (sistema 005 en la arquitectura de activos) en el lote de producción de petróleo cuenta con 07 unidades de bombas horizontales multietapas, conocidas por sus siglas como HPS (Horizontal Pump System), que traducidas al español significan Bombas Horizontales Multietapas, los cuales se encuentran instalados y operando en distribución paralela, bombeando fluido hacia diferentes pozos reinyectores.

En la Figura 18 se muestra un bosquejo de la zona de producción de petróleo, observándose en la parte inferior de la figura a la “Zona HPS”. Así mismo, la Figura 19 muestra la disposición, en su ubicación física, de las 07 unidades de bombas horizontales multietapas, los cuales se encuentra en la zona denominada “Zona HPS” dentro del sistema de reinyección de agua producida. La distribución de las bombas horizontales, según la Figura 19, va de derecha a izquierda, desde la HPS-01 hasta HPS-07, correlativamente.

Figura 18

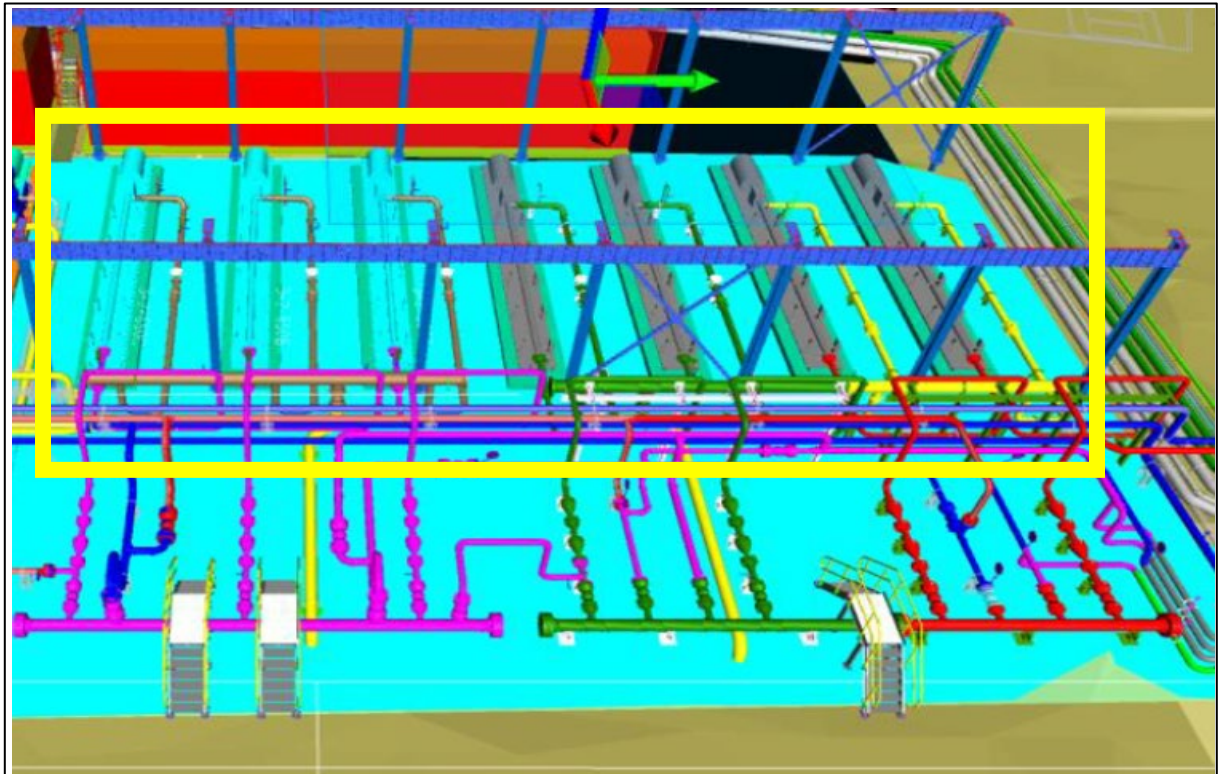
Bosquejo de la zona de producción del lote petrolero



Nota. La gráfica representa un bosquejo de la zona de producción de petróleo, resaltando la Zona HPS cercano a la parte inferior izquierda de la ilustración. Fuente: Elaboración propia.

Figura 19

Ubicación técnica y distribución de bombas horizontales multietapas en zona HPS



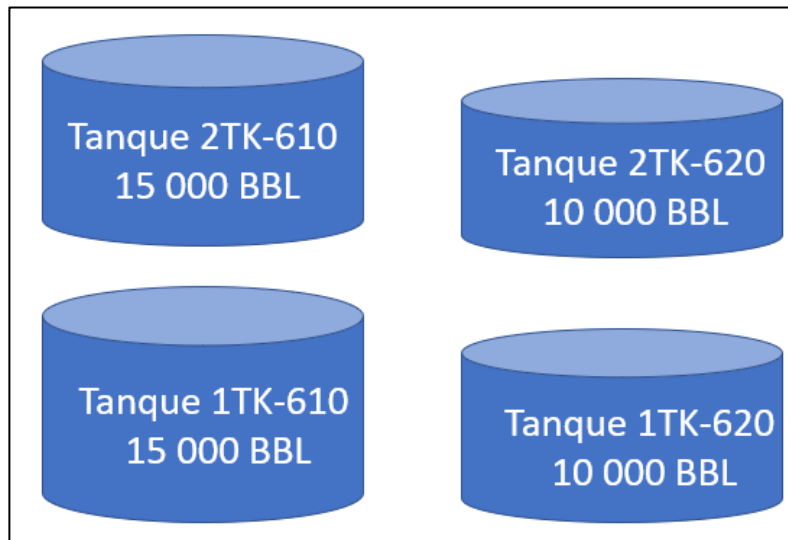
Nota. La gráfica muestra la ubicación de operación de las bombas horizontales multietapas

Fuente: Visor maqueto 3D.

Como primera etapa en el sistema de reinyección de agua, los volúmenes de agua producto del tratamiento de crudo son enviados hacia los tanques de agua producida para su recolección y almacenamiento. Se cuenta con 4 tanques metálicos de forma cilíndrica para el almacenamiento del agua, 2 de ellos tienen una capacidad de almacenamiento de 15 000 barriles (2 384.8 m³), 19.2 metros de diámetro nominal y 9.6 metros de altura; mientras que las otras 2 presentan una capacidad de 10 000 barriles (1 589.8 m³), 20 metros de diámetro nominal y 7.2 metros de altura.

Figura 20

Bosquejo de tanques de agua producida



Nota. La gráfica muestra las capacidades (en barriles) de los 4 tanques de almacenamiento de agua producida. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, el agua almacenada en los tanques de agua producida es extraída a través de 3 bombas idénticas de tipo centrífuga, conocidos como bombas Booster, los cuales se encuentra instalados en paralelo con capacidades de 1750 GPM (0.13 m³/s) cada una, a 257 psi de presión de descarga, con diámetros de tuberías de succión y descarga de 6"x8" respectivamente y motor eléctrico trifásico de 150 HP 460V mediante tipo de arranque del equipo con variador de velocidad (VSD). La Tabla 5 muestra mayores detalles técnicos.

Tabla 5*Datos técnicos de motor de bomba Booster*

Datos técnicos de bombas Booster		
Bomba		
Marca	-	Gould Pumps
Modelo	-	3196
Caudal	GPM	1750
Velocidad	RPM	1755
Presión descarga	psi	257
Diámetro succión y descarga	inch	8x6
Motor		
Marca	-	WEG
Potencia	HP	150
Polos	-	4
Corriente Nominal	A	170
Frecuencia Nominal	Hz	60
Voltaje Nominal	V	460
Velocidad	RPM	1800
Factor de potencia	-	0.85
Grado de aislamiento (IP)	-	55
Altura operación	msnm	1000

Nota. La tabla muestra información de los datos técnicos del equipo. Fuente: Elaboración propia, datos tomados de ficha técnica de equipo.

Luego de ello, las bombas Booster descargan el fluido hacia las unidades de bombeo horizontal multietapas (HPS), estos equipos serán los que finalmente envíen el agua producida hacia los pozos reinyectores de agua.

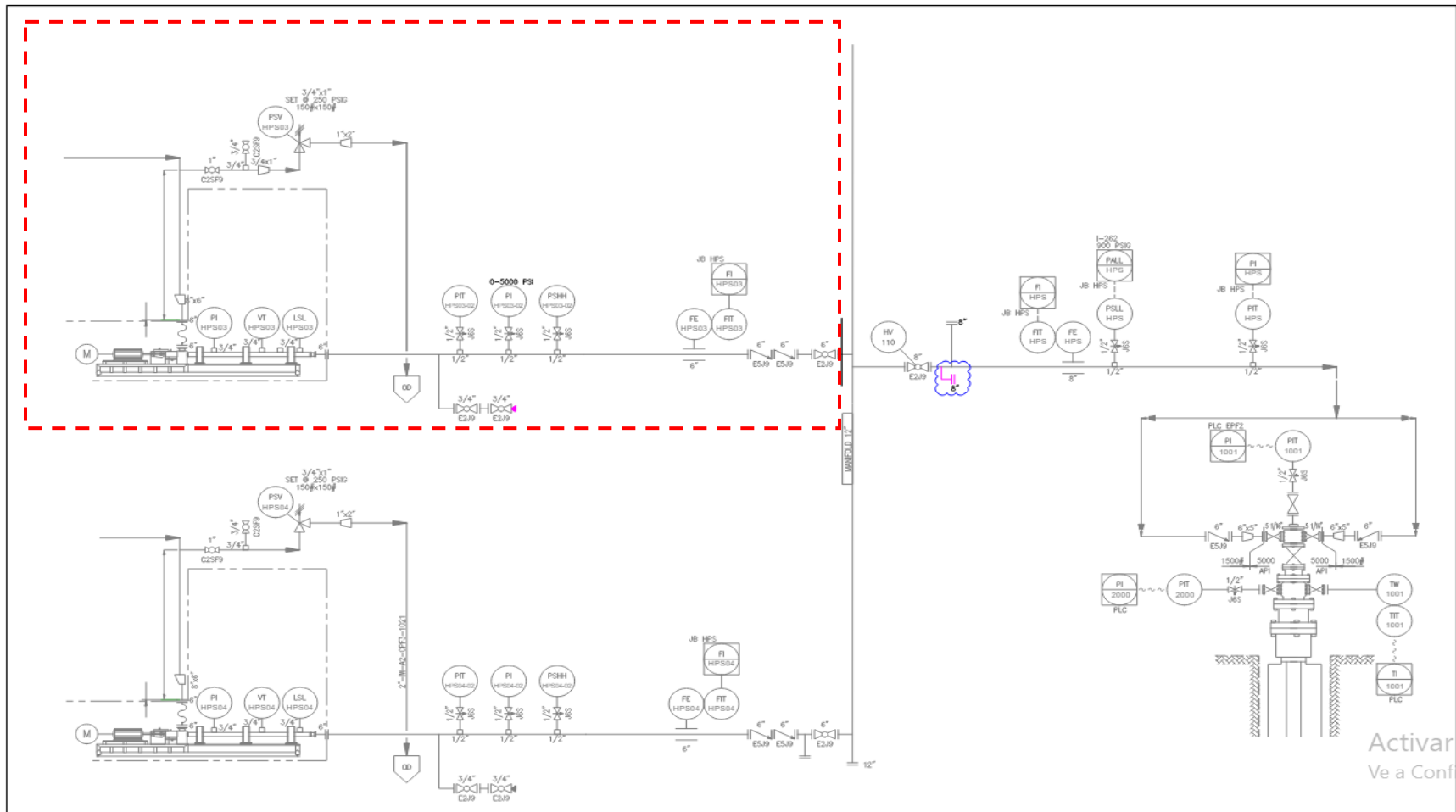
Las bombas horizontales multietapas son bombas de tipo centrífugo, los cuales están compuestos en la parte interior por una gran cantidad de difusores estáticos y también por impulsores o impellers en diferentes etapas (divididas en cuerpos) a lo largo de toda la bomba, desde la succión hasta la descarga, para generar variación de presión y así desplazar el fluido de operación. Todas las etapas de la bomba horizontal multietapas se encuentran ensamblados dentro de una misma unidad general divididas en cuerpo y montados en un mismo eje de rotación horizontal sobre un skid metálico. Cada etapa de la bomba multietapas actúa como si fuera una sola bomba, es decir, como una bomba independiente pero acoplado al resto de bombas.

A la fecha, el sistema de reinyección de agua producida del lote petrolero cuenta con 07 unidades de bombas horizontales multietapas (HPS), cada una con las mismas características técnicas. La Figura 19 detalla la representación de la ubicación física en la que se encuentran las bombas horizontales multietapas. Así mismo, Figura 21 detalla información del diagrama P&ID de 2 bombas multietapas (HPS-03 y HPS-04, resaltando la HPS-03).

Por otra parte, la Tabla 6 muestra detalles técnicos e información de los equipos.

Figura 21

Diagrama P&ID de bomba horizontal multietapas HPS-03



Nota. La gráfica muestra el diagrama P&ID de la bomba horizontal HPS-03. Fuente: Elaboración propia, referido de Planos P&ID.

Tabla 6*Datos técnicos de bombas horizontales multietapas (HPS)*

BOMBA HPS	MOTOR ELÉCTRICO	CÁMARA DE EMPUJE	BOMBA
HPS-01	WEG W50 1000HP/4160V/60Hz	BAKER HUGUES BH875	BAKER HUGUES HC 20000/ HPHVMARC H6 FER
HPS-02	WEG W50 1000HP/4160V/60Hz	BAKER HUGUES BH876	BAKER HUGUES HC 20000/ HPHVMARC H6 FER
HPS-03	WEG W50 1000HP/4160V/60Hz	BAKER HUGUES BH877	BAKER HUGUES HC 20000/ HPHVMARC H6 FER
HPS-04	WEG W50 1000HP/4160V/60Hz	BAKER HUGUES BH878	BAKER HUGUES HC 20000/ HPHVMARC H6 FER
HPS-05	WEG W50 1000HP/4160V/60Hz	BAKER HUGUES BH879	BAKER HUGUES HC 20000/ HPHVMARC H6 FER
HPS-06	WEG W50 1000HP/4160V/60Hz	BAKER HUGUES BH880	BAKER HUGUES HC 20000/ HPHVMARC H6 FER
HPS-07	WEG W50 1000HP/4160V/60Hz	BAKER HUGUES BH881	BAKER HUGUES HC 20000/ HPHVMARC H6 FER

Nota. La tabla muestra detalles técnicos de las 07 bombas horizontales. Fuente: Elaboración

propia, datos tomados de ficha técnica de equipos.

2.1.20. Componentes de las bombas horizontales multietapas

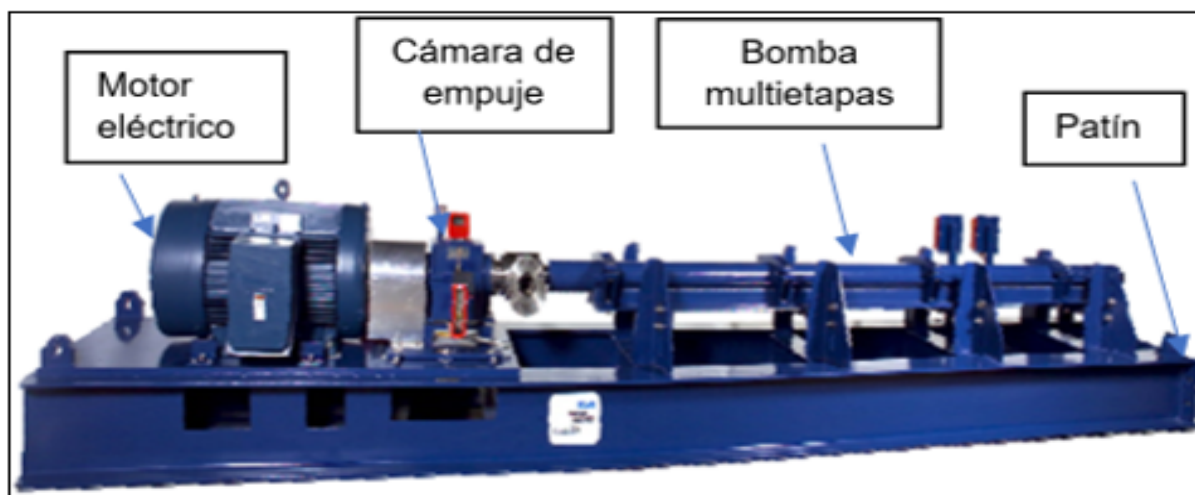
Las bombas HPS se encuentran conformados por diferentes equipos y componentes. En el siguiente listado se muestran algunos de los componentes:

- Motor eléctrico
- Cámara de empuje (HTC)
- Bomba multietapa
- Arrancador (Soft Starter)
- Patín (Skid)
- Instrumentos de medición y control

Así mismo, en la Figura 22 se describen los principales componentes asociados al activo:

Figura 22

Componentes de una bomba horizontal multietapas



Nota. La gráfica muestra las partes de una bomba horizontal multietapas. Fuente: Manual de instalación, operación y mantenimiento (IOM), Baker Hugues Centrilift, 2008.

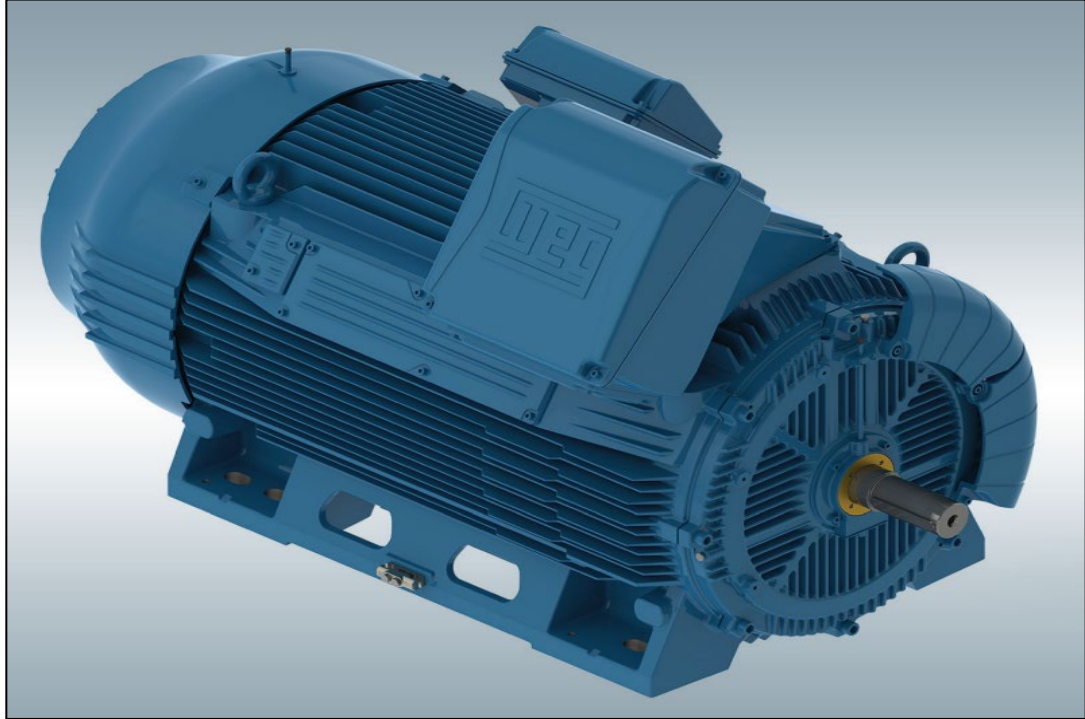
a) Motor eléctrico

El motor eléctrico es un activo fijo que utiliza la energía mecánica a partir de una transformación de la energía eléctrica. (Guía de especificación de motores eléctricos WEG, s.f.). La bomba centrífuga multietapas utiliza un motor eléctrico de 1000 HP de potencia marca WEG modelo W50, el cual utiliza energía eléctrica a 4160 V y la convierte en energía mecánica en el eje de salida del motor a 3600 RPM.

La Figura 23 y la Tabla 7 muestran la imagen del motor eléctrico y los datos técnicos principales del mismo, respectivamente.

Figura 23

Motor eléctrico trifásico WEG W50



Nota. La gráfica muestra un motor eléctrico WEG modelo W50. Fuente: Catálogo técnico WEG, Motor eléctrico trifásico WEG W50.

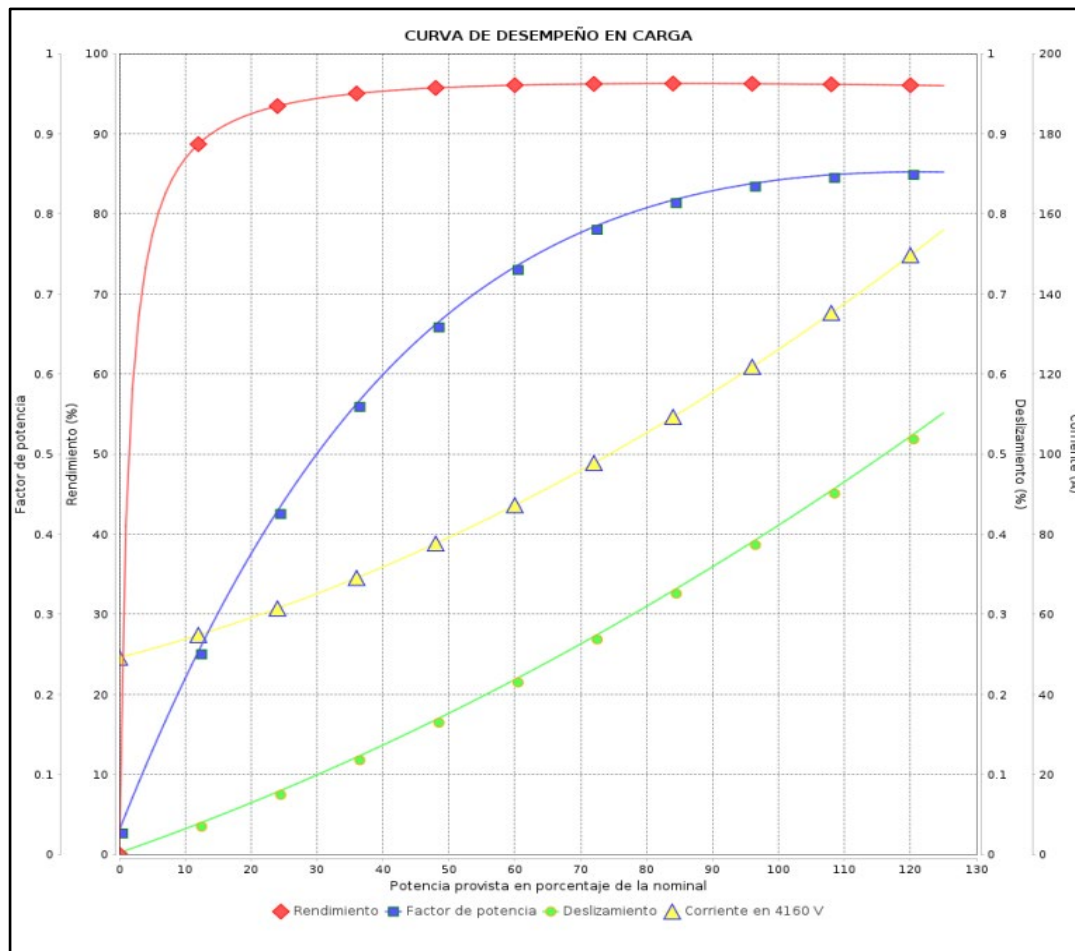
Tabla 7*Datos técnicos de motor eléctrico trifásico WEG W50*

Datos técnicos de motor eléctrico de bomba horizontal multietapas		
Marca	-	WEG
Modelo	-	W50
Potencia	HP	1000
Polos	-	2
Tensión nominal	V	4160
Corriente nominal	A	121
Frecuencia nominal	Hz	60
Factor de potencia	-	0.85
Eficiencia	-	95.8%
Corriente en vacío	A	49
Velocidad nominal	RPM	3600
Torque nominal	Kgfm	607
Clase de aislamiento	-	F
Grado de protección IP	-	55
Sentido de giro	-	Ambos
Altitud	msnm	1000
Temp. Ambiente	° C	40
Carcasa	-	TEFC
Peso	Kg	5313

Nota. La tabla muestra las características técnicas del motor eléctrico. Fuente: Elaboración propia, datos tomados de ficha técnica de equipo.

Figura 24

Curva de desempeño en carga de motor eléctrico WEG W50



Nota. La gráfica muestra la curva de rendimiento, factor de potencia, deslizamiento y consumo de corriente del motor eléctrico. Fuente: Ficha técnica del equipo.

b) Bomba horizontal multietapas

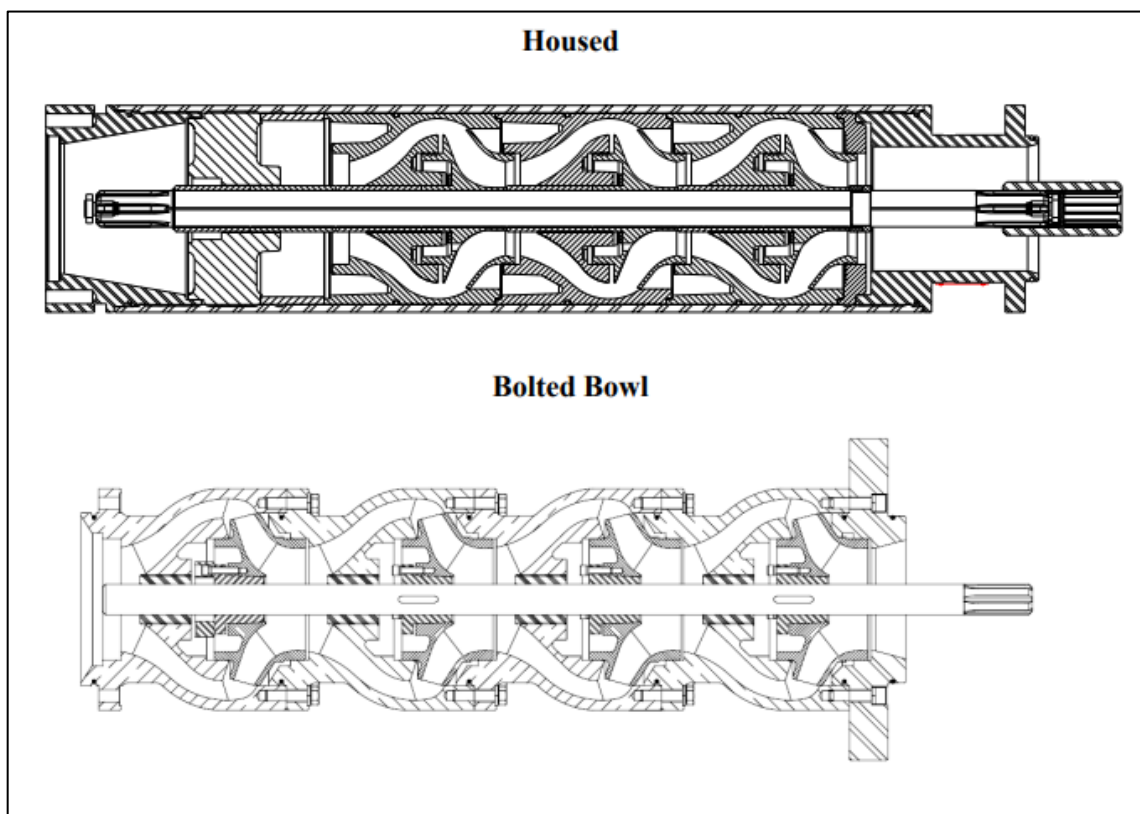
La bomba horizontal multietapas es una bomba de tipo centrífugo, compuestos por una gran cantidad de difusores estáticos e impulsores que permiten generar diferencia de presión y, de esa forma, desplazar el fluido de operación. Todas las etapas de la HPS se

encuentran ensamblados dentro de una misma unidad, divididas en diferentes cuerpos que componen a la bomba.

La Figura 25 y la Tabla 8 muestran la imagen de la bomba horizontal HPS y los datos técnicos principales del mismo, respectivamente.

Figura 25

Bomba horizontal multietapas HPS



Nota. La gráfica muestra una vista de corte de la bomba horizontal multietapas. Fuente: Manual de instalación, operación y mantenimiento (IOM), Baker Hugues Centrilift, 2008.

Tabla 8

Tabla de datos técnicos de bomba horizontal multietapas HPS

Datos técnicos de bomba horizontal multietapas		
Marca	-	Baker Hugues
Modelo	-	HPHVMARC H6 FER
Tipo	-	HC 20000 ARC
Caudal	BPD	20 000
Presión Descarga	psi	2 800
Diámetro de succión	inch	8"
Diámetro de descarga	inch	6"
Cuerpo UPPER (UT)	-	1
Etapas	-	26
Cuerpo LOWER (LT)	-	1
Etapas	-	26

Nota. La tabla muestra las características técnicas de la bomba horizontal multietapas.

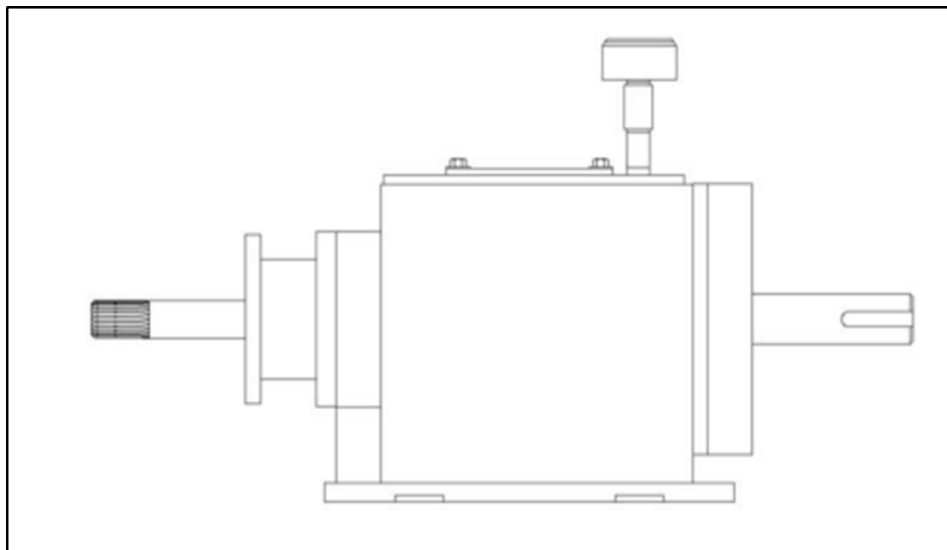
Fuente: Elaboración propia, datos tomados de ficha técnica de equipo.

c) Cámara de empuje

La cámara de empuje es un componente de la bomba horizontal multietapas que se encuentra instalado, generalmente, entre el motor eléctrico y la bomba multietapa. El interior de la cámara de empuje se encuentra inmerso con un líquido lubricante, el cual permite transmitir el par mecánico o torque a la bomba, hermetizar el fluido de bombeo con el medio exterior y también mitigar las cargas mecánicas que se pudiesen generar durante el funcionamiento del equipo. La bomba centrífuga horizontal multietapas utiliza una cámara de empuje modelo HTC 875 de la marca Baker Hugues. La Figura 26 y la Tabla 9 muestran la cámara de empuje y los datos técnicos principales del mismo, respectivamente.

Figura 26

Cámara de empuje Baker Hugues Modelo HTC 875



Nota. La gráfica muestra la vista lateral de la cámara de empuje. Fuente: Manual de instalación, operación y mantenimiento (IOM), Baker Hugues Centrillift, 2008.

Tabla 9

Tabla de datos técnicos de cámara de empuje

Datos técnicos de cámara de empuje de bomba horizontal multietapas	
Marca	- Baker Hugues
Modelo	- HTC 875
Tipo de aceite	- TC-200 Centrillift

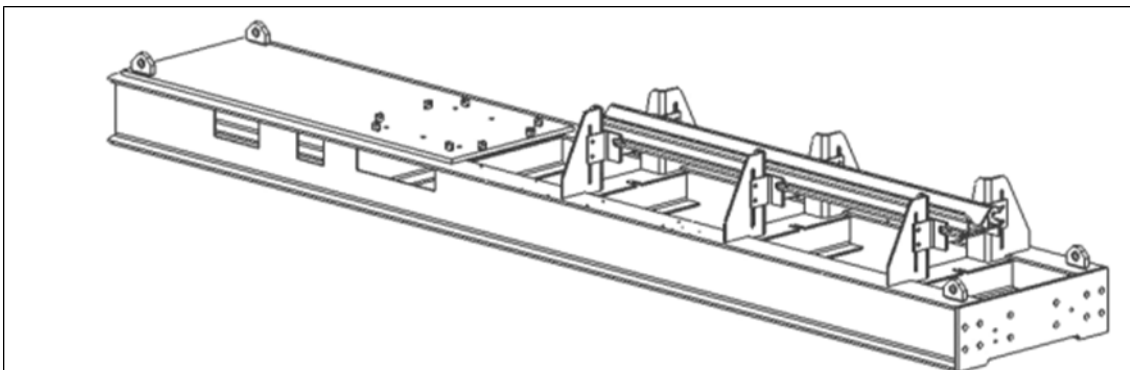
Nota. La tabla muestra las características técnicas de la cámara de empuje. Fuente: Elaboración propia, datos tomados de ficha técnica de equipo.

d) Patín

El patín es la estructura metálica que brinda el soporte sobre el cual se instalan todos los componentes de la unidad de bombeo horizontal. La Figura 27 y la Tabla 10 muestran la imagen del patín y los datos técnicos del mismo, respectivamente.

Figura 27

Estructura de soporte para montaje de componentes- Patín



Nota. La gráfica muestra la representación de la estructura de soporte de la bomba horizontal.

Fuente: Manual de instalación, operación y mantenimiento (IOM), Baker Hugues Centrillift., 2008.

Tabla 10

Tabla de datos técnicos de patín de bomba horizontal multietapas

Datos técnicos de patín de bomba horizontal multietapas		
Marca	-	Baker Hugues
Modelo	-	C68139

Nota. La tabla muestra las características técnicas del patín. Fuente: Elaboración propia, datos tomados de ficha técnica de equipo.

e) Instrumentación

Las bombas horizontales multietapas HPS cuenta con diversos instrumentos de medición, control y protección en diversas partes del equipo (motor eléctrico, cámara de empuje, bombas y en las líneas de ingreso y salida del fluido de operación, es decir, del agua

producida). Dichos instrumentos permiten disponer de información de los parámetros del equipo, gobernar el sistema y también proteger a los activos. La Tabla 11 muestra los instrumentos con los que disponen el conjunto de las unidades de bombeo horizontal multietapas:

Tabla 11

Listado de instrumentos de bombas horizontales multietapas

Listado de instrumentos de medición, control y protección en bombas HPS		
Transmisor de flujo total de descarga	bbl/d	Bomba
Transmisor de flujo de descarga	bbl/d	Bomba
Transmisor de presión en succión	psi	Bomba
Transmisor de presión en descarga	psi	Bomba
Medidor de vibración	inch/s	Cámara de empuje
Switch de bajo nivel de aceite	-	Cámara de empuje
Switch de baja presión	-	Enfriador
Manómetro en succión	psi	Bomba
Manómetro en descarga	psi	Bomba
Manómetro de descarga	psi	Enfriador
Sensor de temperatura - Línea R (RTD)	°C	Motor eléctrico
Sensor de temperatura - Línea S (RTD)	°C	Motor eléctrico
Sensor de temperatura - Línea T (RTD)	°C	Motor eléctrico
Sensor de temperatura- Rodamiento anterior (RTD)	°C	Motor eléctrico
Sensor de temperatura- Rodamiento posterior (RTD)	°C	Motor eléctrico
Sensor de temperatura de aceite (RTD)	°C	Cámara de empuje
Válvula de alivio de presión (PSV)	psi	Bomba

Nota. La tabla muestra el listado de instrumentos de medición y control instalados en las bombas horizontales multietapas. Fuente: Elaboración propia.

2.2. Marco Conceptual

2.2.1. Análisis de criticidad

Se describe como una metodología que posibilita categorizar en cierta estructura a las instalaciones, proceso y máquinas de una organización, en relación al efecto global que generan, ello con la finalidad de identificar las áreas que deben tener mayor énfasis en la atención de mantenimiento en cuanto a la función que se realice y, de esa forma, la asignación eficiente de recursos. (García, 2012, p. 110).

2.2.2. Análisis de fallas

Martínez (2010) menciona que el análisis de fallas se fundamenta en la adquisición y archivamiento de la información que concierne a los eventos de falla que se dieron en algún momento en los equipos, ello para poder ser utilizados en estudios que se lleven a cabo más adelante (futuro) y, además, en el uso de dicha información para la evaluación estadística que van a permitir poner en conocimiento el patrón de fallas que pudiesen presentarse en cada activo preestablecido.

2.2.3. Falla

Ramírez (2014) hace referencia que una falla representa una insatisfacción o no funcionamiento de ciertas características predeterminadas de un equipo.

2.2.4. Diagrama de decisión

El diagrama de decisión es el responsable de vincular las actividades de mantenimiento y la información reunida en el proceso de análisis. Así mismo, consigna formulaciones sencillas que da respuesta a cada modo de falla y brinda un rango de antelación para la designación eficiente de recursos.

2.2.5. Hoja de información RCM

Es el formato responsable de reunir las funciones, falla funcional, modos de falla y los efectos de avería.

2.2.6. Hoja de decisión RCM

Se representa como la responsable del análisis y desarrollo que se genera ante el efecto a lo que conlleva un modo de falla y también a la elección de las actividades de mantenimiento más convenientes. Así mismo, se define como una herramienta del RCM que tiene como utilidad registrar las acciones que se deciden durante el desarrollo y/o respuestas al diagrama de decisión. Además, ayuda a seleccionar de forma eficiente las mejores tareas, es de decir, tareas óptimas para cada uno de los equipos y, de esa forma, minimizar o eliminar los diferentes modos de falla.

2.2.7. Confiabilidad

La confiabilidad es la probabilidad que un activo físico fijo cumpla o efectúe su función correctamente bajo ciertas condiciones preestablecida en un rango de tiempo determinado. Según ello, puede definirse que, si un equipo presenta menores fallas respecto a otro equipo, entonces se podría determinar que la confiabilidad de este es mayor a la otra, respectivamente, bajo los parámetros normales de operación, dentro de su entorno y el medio ambiente que rodea al equipo. (Alvarado, 2021).

La confiabilidad es la probabilidad de que un equipo no presente una o más fallas mientras se encuentra en operación en un rango de tiempo definido. (Nava, 2001).

Pérez (2021) define a la confiabilidad de un equipo como el tiempo que el equipo que estuvo libre de fallas en un rango de tiempo determinado. Determina la relación que existe entre el tiempo de horas que opera un equipo y el tiempo que estuvo fuera de operación por falla. (p. 101).

2.2.8. Mantenibilidad

La mantenibilidad es la probabilidad de que un componente, equipo o máquina, tenga la capacidad de regresar a su estado de funcionamiento normal, posteriormente a cualquier tipo o situación de interrupción productiva (de servicio o funcional), falla o avería, por medio de una intervención y/o reparación adecuada, ello mediante un plan de mantenimiento orientado a perfeccionar las tareas de mantenimiento (Komatsu, 2014, p. 30).

La mantenibilidad se asocia a simplicidad de un componente o equipo se puede restablecer a las condiciones de funcionalidad determinadas, el cual no necesariamente representa a su diseño inicial, sino a sus parámetros de carácter usual con que el equipo desarrolla sus bienes o servicios. (Mora, 2011, p.104)

2.2.9. Disponibilidad

La disponibilidad indica el vínculo de porcentaje que existe entre el tiempo del equipo que se encuentra disponible y el total de horas que se encuentra operando, ya que evalúa la capacidad de producción de un equipo o máquina de acuerdo a su función destinada (Komatsu, 2014, p. 31).

De acuerdo a Parra & Crespo (2012), mencionan que existen factores que van influir en el valor de disponibilidad de un equipo, el cual será el resultado del comportamiento del tiempo promedio entre fallas (MTBF) y el tiempo promedio para la reparación (MTTR).

Pérez (2021) formula el cálculo de la disponibilidad mecánica de un equipo mediante la ecuación. (p.98).

$$\text{Disponibilidad (\%)} = \left(\frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \right) \times 100\% \quad (3)$$

Donde:

MTBF: Tiempo promedio entre fallas (horas)

MTTR: Tiempo promedio para la reparación (horas)

2.2.10. Tiempo promedio entre fallas (MTBF)

El tiempo promedio entre fallas es una representación de intervalo de suceso de cada falla, en su fórmula matemática está representado como una relación entre el tiempo que el equipo ha operado y el total de fallas ocurridas en ese mismo periodo. (Duffuaa, 2000, p.285)

$$\text{MTBF} = \frac{\text{Tiempo de operación del equipo}}{\text{Número de paradas por fallo}} \quad (4)$$

2.2.11. Tiempo promedio para la reparación (MTTR)

El tiempo promedio para la reparación es una representación de la demora que conlleva a devolver a su estado de funcionamiento a un equipo que ha fallado, es su fórmula matemática está representado como una relación entre el tiempo que ha tomado reparar y la cantidad de veces que falló el equipo en ese mismo periodo. (Duffuaa, 2000, p.285)

$$MTBF = \frac{\text{Tiempo total de las reparaciones}}{\text{Número de reparaciones por fallo}} \quad (5)$$

2.2.12. Gráfica de Pareto

La gráfica de Pareto es un diagrama en el que se representan la separación de los ámbitos más importantes con respecto a lo menos importante que involucran a un problema, de tal forma que un grupo de personas pueda direccionar eficientemente y de la mejor forma sus recursos. Para un mejoramiento global, será mucho más fructífero buscar disminuir los problemas que tienen mayor impacto, que disminuir los que generan menor impacto. Frecuentemente, solamente algunos de los aspectos tienen una representación aproximadamente en el 80% de los problemas. (Martínez, 2004).

CAPÍTULO III

DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

3.1. Análisis de criticidad de las bombas de un lote petrolero

Con el objetivo de identificar y seleccionar los equipos críticos en el proceso de producción de petróleo, se llevó a cabo el análisis de criticidad a los equipos de bombeo, los cuales son partícipes en diferentes procesos de las facilidades de producción de petróleo. En el listado actualizado de todos los equipos, cada una de estos dispone de una identificación técnica (TAG), designados ya desde las etapas iniciales del proyecto de construcción y equipamiento de la zona de producción. Así mismo, se incluye la marca, el tipo y/o modelo, la capacidad del caudal en barriles por día (BPD) y el fluido según el proceso en el que se encuentra. La Tabla 12 muestra el listado de bombas pertenecientes al proceso productivo.

Hasta la fecha en la que fue desarrollado el presente estudio, no se contaban una identificación y jerarquización de criticidad de las bombas de los procesos de producción del lote petrolero, salvo lo mencionado en el acápite de Identificación y Planteamiento del problema de investigación del CAPÍTULO I. Así mismo, tampoco se cuentan con criterios oficiales para la evaluación de la criticidad de los equipos que permitan establecer una matriz de desarrollo.

Tabla 12*Listado de bombas de las facilidades de producción de petróleo*

NOMBRE DEL EQUIPO	MARCA	TIPO	CAUDAL (BPD)	FLUIDO DE OPERCIÓN
Bomba P-211	Netzch	Tornillo	2100	Agua
Bomba P-212	Netzch	Tornillo	2100	Agua
Bomba 1-P-720	Netzch	Tornillo	600	Nafta
Bomba 1-P-720B	Netzch	Tornillo	600	Nafta
Bomba 2-P-720A	Netzch	Tornillo	600	Nafta
Bomba 2-P-720B	Netzch	Tornillo	600	Nafta
Bomba Viking P-01	Viking Pump	Engranaje	1029	Diésel
Bomba Viking P-02	Viking Pump	Engranaje	1029	Diésel
Bomba P-300	Netzch	Tornillo	1200	Petróleo
Bomba P-310	Netzch	Tornillo	400	Petróleo
Bomba P-510	Netzch	Tornillo	1700	Petróleo
Bomba 1-P-640A	Gould Pump	Centrifuga	20571	Agua
Bomba 1-P-640B	Gould Pump	Centrifuga	20571	Agua
Bomba P-230	Netzch	Tornado	12000	Agua
Bomba P-240	Netzch	Tornado	12000	Agua
Bomba P-100	Gould Pump	Centrifuga	3600	Petróleo
Bomba P-101	Gould Pump	Centrifuga	3600	Petróleo
Bomba P-82	Gould Pump	Centrifuga	3000	Agua
Bomba P-83	Gould Pump	Centrifuga	3000	Agua
Bomba P-200	Gould Pump	Centrifuga	34217	Agua
Bomba P-201	Gould Pump	Centrifuga	34217	Agua
Bomba P-202	Gould Pump	Centrifuga	34217	Agua
Bomba P-55	Netzch	Tornillo	430	Agua de proceso
Bomba P-56	Netzch	Tornillo	430	Agua de proceso
Bomba 1-P-401A	Netzch	Tornillo	760	Agua de proceso
Bomba 1-P-402A	Netzch	Tornillo	760	Agua de proceso
Bomba 2-P-401A	Netzch	Tornillo	760	Agua de proceso
Bomba 2-P-402A	Netzch	Tornillo	760	Agua de proceso
Bomba P-001	Corvex	Centrifuga	1000	Agua
Bomba P-002	Corvex	Centrifuga	1000	Agua
Bomba 2-P-640C	Gould Pump	Centrifuga	60000	Agua de proceso
Bomba 2-P-640D	Gould Pump	Centrifuga	60000	Agua de proceso
Bomba 2-P-640E	Gould Pump	Centrifuga	60000	Agua de proceso
Bomba HPS-01	Baker Hugues	Centrifuga	20000	Agua de proceso
Bomba HPS-02	Baker Hugues	Centrifuga	20000	Agua de proceso
Bomba HPS-03	Baker Hugues	Centrifuga	20000	Agua de proceso
Bomba HPS-04	Baker Hugues	Centrifuga	20000	Agua de proceso
Bomba HPS-05	Baker Hugues	Centrifuga	20000	Agua de proceso
Bomba HPS-06	Baker Hugues	Centrifuga	20000	Agua de proceso
Bomba HPS-07	Baker Hugues	Centrifuga	20000	Agua de proceso

Nota. La tabla muestra el listado de 40 bombas del área de producción del lote petrolero.

Fuente: Elaboración propia

Para la evaluación y determinación de las bombas de mayor criticidad dentro de las facilidades de producción de petróleo, se desarrolló la matriz de evaluación de criticidad mediante un análisis del mismo. Para el estudio, se establecieron 5 criterios, los cuales se detallan en la Tabla 13.

Tabla 13

Criterios de evaluación para análisis de criticidad de equipos

Criterios de análisis		
Ítem	Criterio	Descripción
1	Frecuencia de fallas	La cantidad de veces que un equipo presenta ha presentado fallas.
2	Impacto a la operación	La interrupción del proceso productivo es un indicador muy relevante para establecer la criticidad de los equipos.
3	Gasto por reparación	A consecuencias de las fallas que se presentan, se generan gastos. Este indicador es relevante para tener seguimiento y control de los gastos y poder utilizar la mejor estrategia de mantenimiento en los equipos críticos.
4	Seguridad Humana	La seguridad de las personas es el indicador más importante para establecer la criticidad de los equipos.
5	Medio Ambiente	El cuidado medioambiental es otro de los indicadores más relevantes. Se tiene como objetivo evitar los impactos ambientales.

Nota. La tabla muestra 5 criterios para la evaluación de análisis de criticidad de equipos.

Fuente: Elaboración propia, adaptado de Torres (2017).

Frecuencia de fallas (FF)

La frecuencia de falla determina la cantidad de veces aproximadamente que el equipo ha fallado durante el último semestre o año durante su normal operación en el sistema de producción de petróleo. El puntaje de asignación en el cuadro de ponderación es el siguiente:

Tabla 14

Cuadro de ponderación de la frecuencia de fallas

Frecuencia de fallas (FF)		
Criterio	Categoría	Puntaje
Presenta 1 falla por día	Muy Alto	9
Presenta fallas entre 1 a 15 días	Alto	7
Presenta fallas entre 15 a 90 días	Medio	5
Presenta fallas entre 90 a 365 días	Bajo	3
Presenta fallas a más de 365 días (1 año)	Muy Bajo	1

Nota. La tabla muestra 5 criterios para la evaluación de la frecuencia de fallas en el análisis de criticidad. Fuente: Elaboración propia, adaptado de Torres (2017).

Impacto a la operación (IM1)

El criterio de evaluación del impacto a la operación (IM1) determina el grado del impacto que genera la ocurrencia de alguna falla respecto a la continuación de la operación del equipo para seguir con el proceso de producción de petróleo. El puntaje de asignación en el cuadro de ponderación es el siguiente:

Tabla 15

Cuadro de ponderación del impacto a la operación

Impacto a la operación (IM1)		
Criterio	Categoría	Puntaje
Paraliza la producción por más de 24 horas	Muy Alto	9
Paraliza la producción entre 12 a 24 horas	Alto	7
Paraliza la producción entre 6 a 12 horas	Medio	5
La producción se paraliza entre 1 a 6 horas	Bajo	3
Paraliza la producción por menos de 1 hora	Muy Bajo	1

Nota. La tabla muestra 5 criterios para la evaluación del impacto a la operación en el análisis de criticidad. Fuente: Elaboración propia, adaptado de Torres (2017).

Impacto al gasto por reparación (IM2)

El criterio de evaluación del gasto a la reparación (IM2) determina el costo directo que generaría reparar el equipo y devolver a su estado de funcionamiento inicial cuando ocurriese algún tipo de falla. El puntaje de asignación en el cuadro de ponderación es el siguiente:

Tabla 16

Cuadro de ponderación de impacto en el gasto de reparación

Gasto de reparación (IM2)		
Criterio	Categoría	Puntaje
Costo mayor a 80 000 USD	Muy Alto	9
Costo entre 20 000 a 80 000 USD	Alto	7
Costo entre 5 000 a 20 000 USD	Medio	5
Costo entre 1 000 a 5 000 USD	Bajo	3
Costo menor a 1 000 USD	Muy Bajo	1

Nota. La tabla muestra 5 criterios para la evaluación del impacto al gasto de reparación en el análisis de criticidad. Fuente: Elaboración propia.

Impacto a la seguridad humana (IM3)

El criterio de evaluación del impacto a la seguridad humana (IM3) determina las consecuencias, daños y/o accidentes a las personas que podría generarse ante la ocurrencia de algún tipo de falla; el impacto que se generaría abarca desde lesiones leves o graves, hasta consecuencias fatales como la muerte de una persona. El puntaje de asignación en el cuadro de ponderación es el siguiente:

Tabla 17

Cuadro de ponderación de impacto a la seguridad humana

Impacto a la seguridad humana (IM3)		
Criterio	Categoría	Puntaje
Posibilidad de ocasionar la muerte	Muy Alto	9
Posibilidad de generar daños graves. Con secuelas luego de un procedimiento médico.	Alto	7
Posibilidad de generar daños graves. Sin secuelas luego de un procedimiento médico.	Medio	5
Posibilidad de generar daños leves. Sin secuelas luego de un procedimiento médico.	Bajo	3
Sin posibilidad de riesgo alguno.	Muy Bajo	1

Nota. La tabla muestra 5 criterios para la evaluación del impacto a la seguridad humana en el análisis de criticidad. Fuente: Elaboración propia, adaptado de Torres (2017).

Impacto medioambiental (IM4)

El criterio de evaluación del impacto al medio ambiente (IM4) determina el grado de consecuencia que generaría al medio ambiente una ocurrencia de fallas en el del equipo. El

daño y/o consecuencia se vincula principalmente a la fuga de fluido de operación hacia el medio ambiente y su grado de consecuencia. El puntaje de asignación en el cuadro de ponderación es el siguiente:

Tabla 18

Cuadro de ponderación del impacto medioambiental

Impacto medioambiental (IM4)		
Criterio	Categoría	Puntaje
Genera perjuicios medioambientales fuera del lote petrolero.	Muy Alto	9
Genera perjuicios ambientales dentro del lote petrolero.	Alto	7
Generan perjuicios ambientales sin violación de la normativa.	Medio	5
Genera perjuicios ambientales reversibles.	Bajo	3
No genera daños ambientales.	Muy Bajo	1

Nota. La tabla muestra 5 criterios para la evaluación del impacto medioambiental en el análisis de criticidad. Fuente: Elaboración propia.

Así mismo, posterior al establecimiento de los criterios de evaluación y su ponderación correspondiente, se procede a realizar el cálculo del valor del factor de criticidad de las bombas de las facilidades de producción del lote petrolero, para ello, se consideran las siguientes de valores de representación (valor de impacto) de cada uno de los criterios mencionados. Cabe resaltar que, el criterio y/o peso de cada uno de dichos criterios de evaluación han sido considerados con fines para el presente estudio, mas no representan criterios y valores propios oficiales de la empresa en la que se desarrolla la investigación.

La Tabla 19 muestra los factores de representación de cada uno de los criterios de evaluación para el cálculo del factor de criticidad de los equipos.

Tabla 19

Representación de criterios en análisis de criticidad de equipos

Ítem	Criterio de evaluación	Peso	Porcentaje
1	Frecuencia de fallas	1	100%
2	Impacto a la operación	0.3	30%
3	Costo de reparación	0.1	10%
4	Impacto a la seguridad	0.3	30%
5	Impacto medioambiental	0.3	30%

Nota. La tabla muestra el cuadro de valores de factores de representación (peso) de los criterios de evaluación de la criticidad de equipos. Fuente: Elaboración propia, adaptado de Torres (2017).

Posteriormente, los valores de los factores de criticidad de los equipos serán obtenidos por la Ecuación 6, el cual contempla los siguientes parámetros:

$$FC = (IM1 \times 0.3 + IM2 \times 0.1 + IM3 \times 0.3 + IM4 \times 0.3) \times FF \quad (6)$$

Donde:

FC: Factor de criticidad

IM1: Impacto a la operación

IM2: Impacto al costo de reparación

IM3: Impacto a la seguridad

IM4: Impacto medioambiental

FF: Frecuencia de fallas

De acuerdo a los valores numéricos que se obtendrán durante la evaluación de la criticidad de los equipos, se establecen niveles de criticidad de acuerdo al rango numérico obtenido para su jerarquización correspondiente. La Tabla 20 muestra el rango numérico según los niveles de criticidad de los equipos de las facilidades de producción de petróleo.

Tabla 20

Rango numérico de niveles de criticidad de equipos

Nivel de criticidad	Rango de factores de criticidad (FC)
ALTA	≥ 20
MEDIA	$[11 - 19>$
BAJA	$[1 - 11>$

Nota. La tabla muestra el rango numérico para la determinación del nivel de criticidad de equipos. Fuente: Elaboración propia.

3.2. Resultados del análisis de criticidad de los equipos de bombeo de un lote petrolero

En base a la evaluación anterior respecto a la criticidad de los equipos de bombeo de las facilidades de producción de petróleo, tal como se muestran los resultados en la Tabla 21 y Figura 28, los activos físicos fijos que representan nivel de criticidad alto son las bombas horizontales multietapas. A partir de dicha evaluación, se toma la decisión de aplicar la Metodología de Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) a dichos equipos, es decir, a las bombas horizontales multietapas HC20000 ARC/HPHVMARC H6 FER.

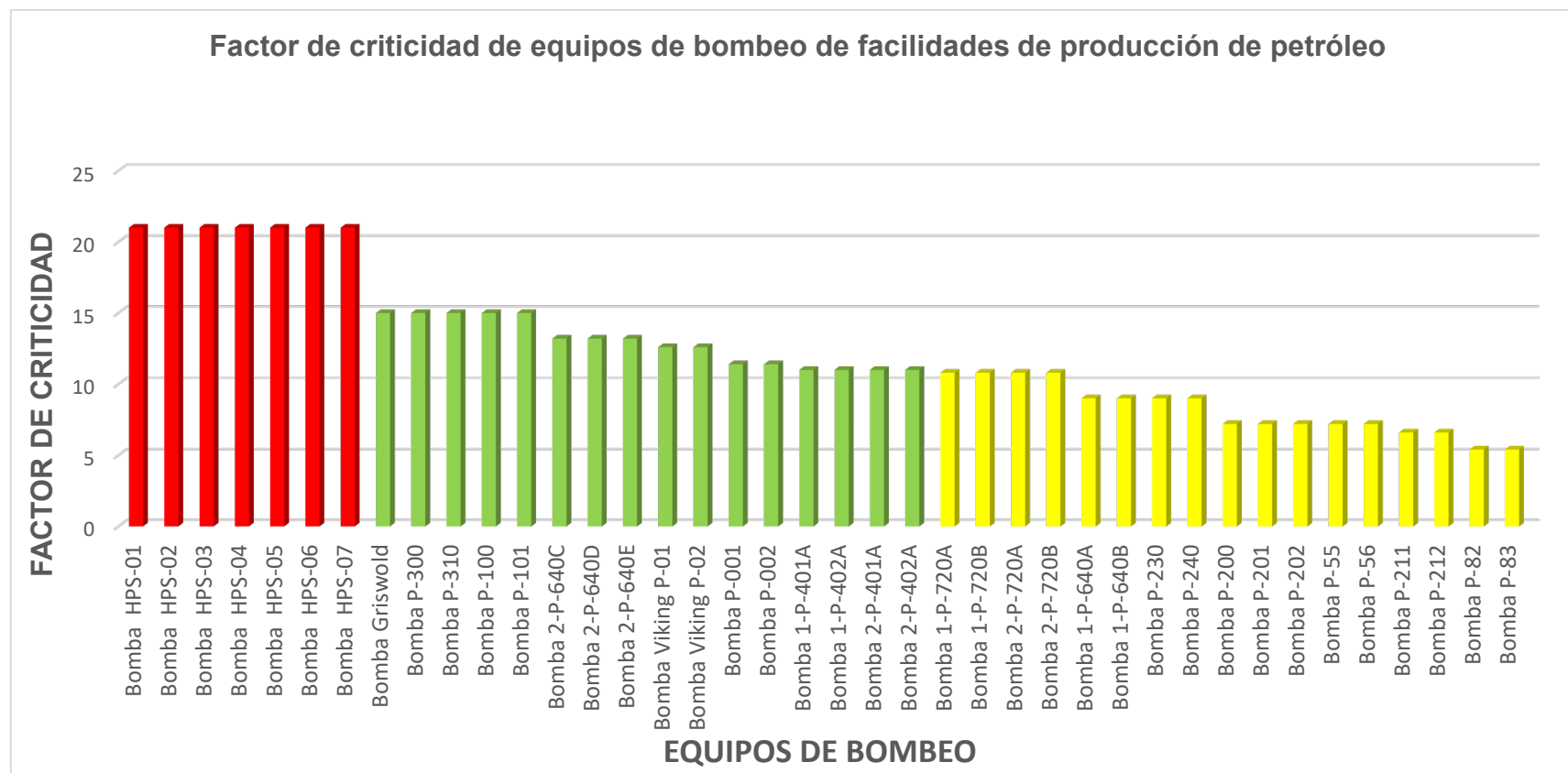
Tabla 21*Resultados de análisis de criticidad de equipos de bombeo del lote petrolero*

NOMBRE DEL EQUIPO	IM1	IM2	IM3	IM4	FF	Factor de criticidad (FC)	Nivel de criticidad
Bomba HPS-01	7	7	9	5	3	21	ALTO
Bomba HPS-02	7	7	9	5	3	21	ALTO
Bomba HPS-03	7	7	9	5	3	21	ALTO
Bomba HPS-04	7	7	9	5	3	21	ALTO
Bomba HPS-05	7	7	9	5	3	21	ALTO
Bomba HPS-06	7	7	9	5	3	21	ALTO
Bomba HPS-07	7	7	9	5	3	21	ALTO
Bomba Griswold	1	3	3	5	5	15	MEDIO
Bomba P-300	1	3	3	5	5	15	MEDIO
Bomba P-310	1	3	3	5	5	15	MEDIO
Bomba P-100	3	5	5	7	3	15	MEDIO
Bomba P-101	3	5	5	7	3	15	MEDIO
Bomba 2-P-640C	5	5	5	3	3	13.2	MEDIO
Bomba 2-P-640D	5	5	5	3	3	13.2	MEDIO
Bomba 2-P-640E	5	5	5	3	3	13.2	MEDIO
Bomba Viking P-01	5	3	3	5	3	12.6	MEDIO
Bomba Viking P-02	5	3	3	5	3	12.6	MEDIO
Bomba P-001	3	5	7	1	3	11.4	MEDIO
Bomba P-002	3	5	7	1	3	11.4	MEDIO
Bomba 1-P-401A	3	1	3	1	5	11	MEDIO
Bomba 1-P-402A	3	1	3	1	5	11	MEDIO
Bomba 2-P-401A	3	1	3	1	5	11	MEDIO
Bomba 2-P-402A	3	1	3	1	5	11	MEDIO
Bomba 1-P-720A	3	3	3	5	3	10.8	BAJO
Bomba 1-P-720B	3	3	3	5	3	10.8	BAJO
Bomba 2-P-720A	3	3	3	5	3	10.8	BAJO
Bomba 2-P-720B	3	3	3	5	3	10.8	BAJO
Bomba 1-P-640A	3	3	5	1	3	9	BAJO
Bomba 1-P-640B	3	3	5	1	3	9	BAJO
Bomba P-230	3	3	5	1	3	9	BAJO
Bomba P-240	3	3	5	1	3	9	BAJO
Bomba P-200	3	3	3	1	3	7.2	BAJO
Bomba P-201	3	3	3	1	3	7.2	BAJO
Bomba P-202	3	3	3	1	3	7.2	BAJO
Bomba P-55	3	3	3	1	3	7.2	BAJO
Bomba P-56	3	3	3	1	3	7.2	BAJO
Bomba P-211	3	1	3	1	3	6.6	BAJO
Bomba P-212	3	1	3	1	3	6.6	BAJO
Bomba P-82	1	3	3	1	3	5.4	BAJO
Bomba P-83	1	3	3	1	3	5.4	BAJO

Nota. La tabla muestra la jerarquización de las 40 bombas. Fuente: Elaboración propia.

Figura 28

Histograma de factores de criticidad de equipos de bombeo de facilidades de producción de petróleo



Nota. La gráfica muestra la representación de la jerarquización de las bombas de los procesos de producción del lote petrolero. Los equipos representados de color rojos son los equipos críticos. Fuente: Elaboración propia.

3.3. Análisis de criticidad de subsistemas de bombas horizontales multietapas HC 20000

ARC / HPHVMARC H6 FER

Con el objetivo de identificar y seleccionar los componentes críticos y/ o subsistemas de las bombas horizontales multietapas (bombas HPS), se llevó a cabo el análisis de criticidad de sus subsistemas, los cuales son componentes que finalmente engloban a la unidad de bombeo. La Tabla 22 muestra el listado de subsistema que componen a las bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER.

Tabla 22

Descripción de subsistemas de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER.

SUBSISTEMA	CÓDIGO	FUNCIÓN GENERAL
Motor eléctrico	1.A	Convertir energía eléctrica en energía mecánica al eje de salida.
Cámara de empuje	2.A	Transmitir torque mecánico del motor eléctrico hacia la bomba multietapas y hermetizar el fluido.
Bomba multietapas	3.A	Desplazar el fluido a determinada presión y caudal.
Patín	4.A	Soportar el conjunto de equipos de la bomba multietapas.
Arrancador (Soft Starter)	5.A	Arrancar el motor eléctrico determinada corriente, voltaje y tiempo.

Nota. La tabla muestra la división de la bomba multietapas en 5 subsistemas y la descripción de su función operacional principal. Fuente: Elaboración propia.

3.4. Resultados del análisis de criticidad de subsistemas de bombas horizontal es multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER

En base a la evaluación respecto a la criticidad de subsistemas de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER del proceso de reinyección de agua en las facilidades de producción de petróleo, se obtuvo finalmente como resultado que el motor eléctrico, la bomba multietapas y la cámara de empuje son los componentes con nivel de criticidad alto y medio (muy cercano al nivel alto), respectivamente. A partir de dicha evaluación, se toma la decisión de aplicar la Metodología de Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) a dichos componentes. La Tabla 23 y la Figura 29 muestran con detalle el resultado del análisis.

Tabla 23

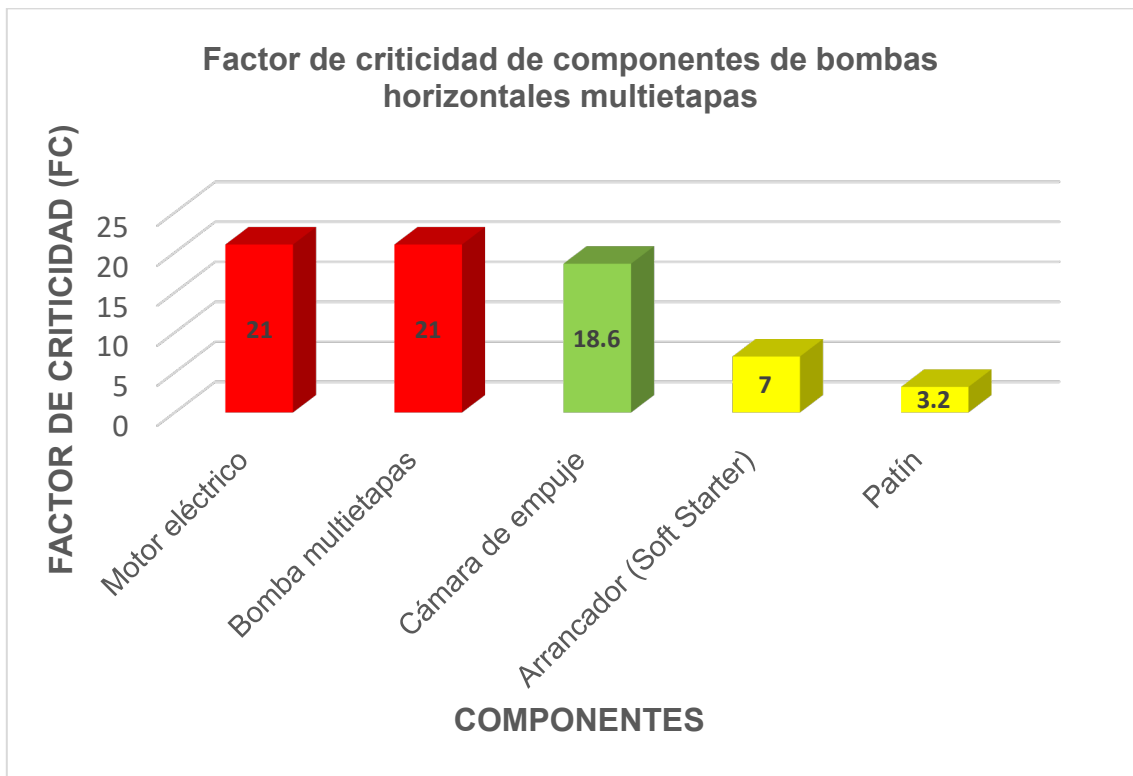
Resultados de análisis de criticidad de componentes de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER

Nombre del equipo	IM1	IM2	IM3	IM4	FF	Factor de criticidad (FC)	Nivel de criticidad
Motor eléctrico	7	7	9	5	3	21	ALTO
Bomba multietapas	7	7	9	5	3	21	ALTO
Cámara de empuje	7	5	7	5	3	18.6	MEDIO
Patín	5	5	3	1	1	3.2	BAJO
Arrancador (Soft Starter)	7	7	9	5	1	7	BAJO

Nota. La tabla muestra 2 subsistemas con nivel de criticidad alto, 1 de nivel medio y 2 subsistemas con nivel de criticidad bajo. Fuente: Elaboración propia.

Figura 29

Factores de criticidad de subsistemas de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER.



Nota. La tabla muestra el histograma con 2 subsistemas con nivel de criticidad alto, 1 de nivel medio y 2 subsistemas con nivel de criticidad bajo. Fuente: Elaboración propia.

3.5. Análisis de modos y efectos de falla de componentes críticos de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER

3.5.1. Evaluación de funciones de componentes críticos de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER.

Tabla 24

Funciones primarias de subsistemas críticos de bombas horizontales multietapas HC 20000

ARC / HPHVMARC H6 FER

Subsistemas	Código	Función
Motor eléctrico	1.A	Transformar energía eléctrica en energía mecánica al eje de rotación a 1000 HP (746 kW) y 3600 RPM.
Cámara de empuje	2.A	Soportar cargas axiales que se producen en la bomba y transmitir el torque del motor eléctrico hacia la bomba sin superar los 95 °C de temperatura del aceite refrigerante.
Bomba multietapas	3.A	Trasladar agua producida hacia los pozos reinyectores a un caudal de 20 000 BPD y una presión máxima de descarga de 2500 psi.

Nota. La tabla muestra la descripción y codificación de las funciones primarias de los subsistemas críticos. Fuente: Elaboración propia.

3.5.2. Evaluación de fallas funcionales de subsistemas críticos de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER

Tabla 25

Fallas funcionales primarias de subsistemas críticos de bombas horizontales multietapas HC

20000 ARC / HPHVMARC H6 FER

CÓDIGO	N.º	FALLA FUNCIONAL
1.A	1	No transforma energía eléctrica en energía mecánica al eje de rotación a 1000 HP (746 kW) y 3588 RPM.
2.A	1	No transmite el torque hacia la bomba y no soporta las cargas axiales que se producen en la bomba.
	2	El aceite refrigerante supera los 95 °C de temperatura.
3.A	1	Incapaz de bombear agua producida a 20 000 BPD y 2500 psi de presión máxima de descarga.

Nota. La tabla muestra la descripción y codificación de las fallas funcionales primarias de los subsistemas críticos. Fuente: Elaboración propia.

3.5.3. Evaluación de los modos de falla de subsistemas críticos de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER

Tabla 26

Modos de falla de componentes críticos de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC
/ HPHVMARC H6 FER

CÓDIGO	N.º	MODO DE FALLA
1.A.1	1	Rotura del eje mecánico del motor eléctrico ante desbalanceo de carga mecánica.
	2	Sobrecarga eléctrica de operación en fases R, S y T.
	3	Error de lectura de transmisor y sensores de temperatura (RTD) en bobinas de fases R, S y T
	4	Cortocircuito en bobinados de estator de motor eléctrico.
	5	Desgaste de rodamientos de motor eléctrico por falta de grasa lubricante.
	6	Alta vibración en puntos de motor eléctrico. Mayor a 4 mm/s.
	7	Perdida de conexión en empalmes de caja de conexiones de motor eléctrico.
	8	Perdida de aislamiento de motor eléctrico.
	9	Rotura de aletas de ventilador de motor eléctrico.
	10	Desequilibrio de niveles de tensión en fases R, S y T.
	11	Desajuste de pernos de anclaje de motor eléctrico. (Pie suelto)
	12	Presencia de armónicas. (Tercer y quinto armónico).
	13	Pérdida de aislamiento en cable de fuerza de motor eléctrico.
	14	Obstrucción de filtro de ingreso de aire a ventilador de motor eléctrico.
	15	Ingreso de polvo y suciedad en motor eléctrico. (Fuertes corrientes de aire durante el día).
	16	Ingreso de agua al interior de motor eléctrico. (Fuertes lluvias en varias temporadas del año).
	17	Sobrecalentamiento por radiación solar. (Expuesto al sol durante todo el día).
2.A.1	1	Desgaste de rodamientos en cámara de empuje.
	2	Desgaste de acople entre motor eléctrico y cámara de empuje.

	3	Fuga de aceite refrigerante por empaquetaduras del eje mecánico en cámara de empuje.
	4	Aceite refrigerante contaminado. Presencia de partículas y agua.
	5	Alta vibración en puntos de cámara de empuje. Mayor a 4 mm/s.
	6	Error de lectura de sensores de temperatura (RTD) en la cámara de empuje.
	7	Desalineamiento motor-cámara y cámara-bomba.
	9	Fisura por corrosión de cuba exterior de cámara de empuje.
2.A.2	1	Baja presión de salida de aceite refrigerante. Menor a 15 psi.
	2	Pérdida de aletas de refrigeración de enfriador.
	3	Obstrucción de flujo de refrigerante por mangueras de refrigeración.
	4	Cortocircuito en motor eléctrico de enfriador.
	5	Fuga de aceite refrigerante por conductos del enfriador.
	6	Sobrecalentamiento de refrigerante por radiación solar. (Expuesto al sol durante todo el día).
	7	Falsa lectura en mirilla de nivel de cámara de empuje.
3.A.1	1	Presencia de tensiones en soporte de bomba (skid)
	2	Avería de sello mecánico en succión de bomba.
	3	Deterioro de rodamientos en bomba.
	4	Atascamiento en impulsores de bomba.
	5	Exceso de juego radial de eje de bomba. Mayor de 2 milésimas de pulgada.
	6	Sobrepresión en succión.
	7	Descalibración de válvula de alivio de presión (PSV) no apertura en el valor de seteo de 150 psi.
	8	Baja presión de succión en bomba. Menor a 60 psi.
	9	Lectura errónea en instrumentos de presión en descarga.

	10	Fuga de agua producida por empaquetaduras espirometálicas de válvula en descarga.
	11	Altas temperaturas en cojinetes de la bomba.

Nota. La tabla muestra la descripción y codificación de los modos de falla de subsistemas críticos. Fuente: Elaboración propia.

3.5.4. Evaluación de los efectos de falla de componentes críticos de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER

Tabla 27

Consecuencias de modos de falla de componentes críticos de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER

CÓDIGO	EFFECTOS DE MODOS DE FALLA
1.A.1.1	Es notorio: Si Impacta a la seguridad: No Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Se pierde producción. Equipo deja de operar con daños. Tarea de mantenimiento: Cambiar motor eléctrico Mano de obra: 01 técnico HPS +2 técnicos mecánicos + 2 técnicos electricistas. Duración de actividad: 7 Horas
1.A.1.2	Es notorio: Si Impacta a la seguridad: Si Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Se pierde producción. Tarea de mantenimiento: Monitorear consumo de corriente y balanceo de carga en fases R, S y T. Mano de obra: 02 técnicos electricistas Duración de actividad: 1 Hora
1.A.1.3	Es notorio: Si Impacta a la seguridad: No Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Equipo se puede mantener en operación con by pass de alarmas y monitoreo continuo. Tarea de mantenimiento: Verificar transmisor de temperatura, posteriormente calibrar RTD en taller e inspección de cables a ingreso de PLC. Mano de obra: 01 técnico instrumentista. Duración de actividad: 4 Horas

1.A.1.4	Es notorio: Si Impacta a la seguridad: Si Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Se pierde producción. Equipo deja de operar con daños. Tarea de mantenimiento: Cambiar motor eléctrico. Antes de instalación se deben realizar pruebas eléctricas a motor nuevo. Mano de obra: 01 técnico HPS + 02 técnicos electricistas + 02 técnicos mecánicos Duración de actividad: 7 Horas
1.A.1.5	Es notorio: Si Impacta a la seguridad: No Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Equipo puede seguir operando con riesgo a falla catastrófica. Tarea de mantenimiento: Cambiar rodamientos en motor eléctrico. Mano de obra: 01 técnico HPS + 03 técnicos mecánicos Duración de actividad: 5 Hora
1.A.1.6	Es notorio: Si Impacta a la seguridad: No Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Perdida de producción. Equipo puede seguir operando con riesgo a falla catastrófica. Tarea de mantenimiento: Alinear ejes de motor eléctrico con cámara de empuje. Mano de obra: 01 técnico HPS + 02 técnicos mecánicos Duración de actividad: 3 Horas
1.A.1.7	Es notorio: Si Impacta a la seguridad: No Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Se pierde producción. Se manda apagar el equipo. Tarea de mantenimiento: Realizar conexión y ajuste en caja de empalmes. Mano de obra: 02 Técnicos electricistas Duración de actividad: 2.5 Horas
1.A.1.8	Es notorio: Si Impacta a la seguridad: Si Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Se pierde producción. Tarea de mantenimiento: Cambiar motor eléctrico. Retirar motor eléctrico para envío para evaluación de rebobinado a fábrica. Mano de obra: 01 técnico HPS + 02 técnicos electricistas + 02 técnicos mecánicos Duración de actividad: 7 Horas
1.A.1.9	Es notorio: Si

	Impacta a la seguridad: No Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Equipo puede seguir operando con constante monitoreo. Tarea de mantenimiento: Cambiar ventilador de motor eléctrico. Mano de obra: 01 técnico HPS + 02 Técnicos electricistas Duración de actividad: 1.5 Horas
1.A.1.10	Es notorio: Si Impacta a la seguridad: No Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Equipo puede seguir operando con constante monitoreo. Tarea de mantenimiento: Monitorear parámetros eléctricos de tensión en relé REF 615. Mano de obra: 01 técnico HPS + 01 técnico electricista. Duración de actividad: 1 Hora
1.A.1.11	Es notorio: Si Impacta a la seguridad: No Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Equipo puede seguir operando con constante monitoreo. Tarea de mantenimiento: Ajustar pernos de anclaje de motor eléctrico con Skid. Mano de obra: 01 técnico HPS Duración de actividad: 1 Hora
1.A.1.12	Es notorio: No Impacta a la seguridad: No Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Equipo puede seguir operando con constante monitoreo. Tarea de mantenimiento: Monitorear parámetros de armónicos en Relé REF615. Mano de obra: 01 técnico HPS + 01 técnico electricista. Duración de actividad: 1 Hora
1.A.1.13	Es notorio: No Impacta a la seguridad: Si Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Equipo puede seguir operando con constante monitoreo. Tarea de mantenimiento: Realizar medición de aislamiento y continuidad de cable eléctrico. Mano de obra: 01 técnico HPS + 01 técnico electricista. Duración de actividad: 1 Hora
1.A.1.14	Es notorio: Si Impacta a la seguridad: No Impacto medioambiental: No

	Impacto al proceso productivo: Equipo puede seguir operando con constante monitoreo. Tarea de mantenimiento: Limpiar rejilla de ingreso de aire hacia ventilador. Mano de obra: 01 técnico HPS Duración de actividad: 0.5 Hora
2.A.1.1	Es notorio: Si Impacta a la seguridad: No Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Equipo deja de operar. Se manda apagar el equipo por riesgo a falla catastrófica. Tarea de mantenimiento: Cambiar rodamientos Mano de obra: 01 técnico HPS + 03 técnicos mecánicos Duración de actividad: 5 Horas
2.A.1.2	Es notorio: Si Impacta a la seguridad: No Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Se pierde producción. Tarea de mantenimiento: Cambiar acople mecánico motor eléctrico y cámara de empuje Mano de obra: 01 Técnico especialista HPS + 02 Técnicos mecánicos Duración de actividad: 2.5 Horas
2.A.1.3	Es notorio: Si Impacta a la seguridad: No Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Equipo puede seguir operando con constante monitoreo. Tarea de mantenimiento: Cambiar empaquetadura de cámara de empuje. Mano de obra: 01 Técnico especialista HPS + 02 Técnicos mecánicos Duración de actividad: 2.5 Hora
2.A.1.4	Es notorio: Si Impacta a la seguridad: No Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Equipo puede seguir operando con constante monitoreo. Tarea de mantenimiento: Cambiar filtros y aceite en cámara de empuje. Mano de obra: 01 Técnico especialista HPS + 01 Técnico mecánico. Duración de actividad: 1 Hora
2.A.1.5	Es notorio: Si Impacta a la seguridad: No Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Se pierde producción. Se manda apagar el equipo.

	Tarea de mantenimiento: Alinear eje de cámara de empuje con bomba. Mano de obra: 01 especialista HPS + 02 Técnicos mecánicos Duración de actividad: 3 Horas
2.A.1.6	Es notorio: Si Impacta a la seguridad: No Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Equipo puede seguir operando con constante monitoreo. Tarea de mantenimiento: Verificar transmisor de temperatura, posteriormente calibrar RTD en taller e inspección de cables a ingreso de PLC. Mano de obra: 01 Técnico instrumentista Duración de actividad: 4 Horas
2.A.1.7	Es notorio: Si Impacta a la seguridad: No Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Se pierde producción. Tarea de mantenimiento: Alinear equipo apagado Tarea de mantenimiento: Alinear eje de cámara de empuje con bomba. Mano de obra: 01 especialista HPS + 02 Técnicos mecánicos Duración de actividad: 3 Horas
2.A.1.8	Es notorio: Si Impacta a la seguridad: No Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Se pierde producción. Tarea de mantenimiento: Cambiar cámara de empuje Mano de obra: 01 técnico HPS + 02 técnicos mecánicos Duración de actividad: 4 Horas
2.A.2.1	Es notorio: Si Impacta a la seguridad: No Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Equipo puede seguir operando con constante monitoreo. Tarea de mantenimiento: Cambiar filtro de aceite refrigerante y revisión de mangueras. Mano de obra: 01 técnico HPS Duración de actividad: 1 Hora
2.A.2.2	Es notorio: Si Impacta a la seguridad: No Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Equipo puede seguir operando con constante monitoreo.

	Tarea de mantenimiento: Cambiar radiador de enfriador. Mano de obra: 01 técnico HPS +1 técnico mecánico Duración de actividad: 2 Horas
2.A.2.3	Es notorio: Si Impacta a la seguridad: No Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Equipo puede seguir operando con constante monitoreo. Tarea de mantenimiento: Cambiar filtro de aceite refrigerante y revisión de mangueras. Mano de obra: 01 técnico HPS Duración de actividad: 1 Hora
2.A.2.4	Es notorio: Si Impacta a la seguridad: Si Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: No afecta el proceso productivo. Tarea de mantenimiento: Cambiar motor eléctrico de enfriador. Mano de obra: 02 técnicos electricistas Duración de actividad: 2.5 Horas
2.A.2.5	Es notorio: Si Impacta a la seguridad: No Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: No afecta el proceso productivo. Tarea de mantenimiento: Cambiar conductos de recirculación de refrigerante. Mano de obra: 01 técnico HPS Duración de actividad: 1 Hora
2.A.2.7	Es notorio: Si Impacta a la seguridad: No Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: No afecta el proceso productivo. Tarea de mantenimiento: cambiar mirilla de nivel de cámara de empuje. Mano de obra: 01 técnico HPS Duración de actividad: 1 Hora
3.A.1.1	Es notorio: Si Impacta a la seguridad: Si Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Afecta a la producción. Tarea de mantenimiento: Cambiar bomba Mano de obra: 01 técnico especialista HPS + 04 técnicos mecánicos. Duración de actividad: 12 Horas
3.A.1.2	Es notorio: Si Impacta a la seguridad: No Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Afecta a la producción. Tarea de mantenimiento: Cambiar sello mecánico.

	Mano de obra: 01 técnico HPS + 02 técnicos mecánicos. Duración de actividad: 4 Horas
3.A.1.3	Es notorio: Si Impacta a la seguridad: No Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Afecta a la producción. Tarea de mantenimiento: Cambiar rodamientos Mano de obra: 01 técnico HPS + 02 técnicos mecánicos. Duración de actividad: 4 Horas
3.A.1.4	Es notorio: Si Impacta a la seguridad: No Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Se pierde producción. Tarea de mantenimiento: Cambiar bomba. Envío de impulsores a fábrica para reparación. Mano de obra: 01 técnico HPS + 04 técnicos mecánicos. Duración de actividad: 12 Horas
3.A.1.5	Es notorio: No Impacta a la seguridad: Si Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Se pierde producción. Tarea de mantenimiento: Cambiar rodamientos Mano de obra: 01 técnico HPS + 02 técnicos mecánicos. Duración de actividad: 4 Horas
3.A.1.6	Es notorio: No Impacta a la seguridad: Si Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Pérdida de producción Tarea de mantenimiento: Cambiar sello mecánico. Mano de obra: 01 técnico HPS + 02 técnicos mecánicos. Duración de actividad: 4 Horas
3.A.1.7	Es notorio: No Impacta a la seguridad: Si Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Equipo puede seguir operando con constante monitoreo. Tarea de mantenimiento: Contraste y calibración de válvula de alivio de presión (PSV) en taller. Mano de obra: 01 técnico instrumentista + 01 técnico mecánico Duración de actividad: 4 Horas
3.A.1.8	Es notorio: Si Impacta a la seguridad: No Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Se pierde producción. Tarea de mantenimiento: Limpiar filtro de succión.

	Mano de obra: 02 Técnicos mecánicos Duración de actividad: 2 Hora
3.A.1.9	Es notorio: Si Impacta a la seguridad: Si Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Equipo puede seguir operando con constante monitoreo. Tarea de mantenimiento: Revisión y calibración de instrumentos de medición y control. Mano de obra: 01 Técnico instrumentista Duración de actividad: 6 Horas
3.A.1.10	Es notorio: Si Impacta a la seguridad: Si Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Pérdida de producción. Tarea de mantenimiento: cambio de válvula Mano de obra: 01 técnico HPS + 03 técnicos mecánicos Duración de actividad: 4 Horas
3.A.1.11	Es notorio: No Impacta a la seguridad: No Impacto medioambiental: No Impacto al proceso productivo: Equipo puede seguir operando con constante monitoreo. Tarea de mantenimiento: Inspección y monitoreo de temperatura en cojinetes Mano de obra: 01 técnico HPS Duración de actividad: 1Hora

Nota. La tabla muestra la descripción y codificación de los modos de falla de componentes de subsistemas críticos. Fuente: Elaboración propia.

3.6. Cálculo de número de prioridad de riesgo (NPR) de modos de falla de componentes de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER

Posteriormente a la evaluación del análisis de los modos y efecto de falla de los componentes críticos de las bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER, se continúa con el cálculo del Número de Prioridad de Riesgo (NPR). El NPR es identificado como el número de prioridad de riesgo, un valor numérico que permite enfocarnos

hacia determinados modos de fallas de los componentes críticos de las unidades de bombeo HPS. El NPR es un valor numérico que se obtiene principalmente mediante una fórmula matemática en función de 3 variables específicas, los cuales son: Severidad (S), Ocurrencia (O) y Detección (D), cada uno de ellos con una definición muy bien establecidas. Así mismo, la interpretación de los resultados está basado en que, cuando se obtienen valores altos de NPR significa que las acciones se deben direccionar a dichos modos de fallas, es decir, dar prioridad de atención a dichos ítems; mientras que, por el lado contrario, los valores bajos de NPR representan que las acciones no deben enfocarse a dichos modos de falla.

$$NPR=S \times O \times D \quad (7)$$

Donde:

NPR: Número de prioridad de riesgo

S: Severidad

O: Ocurrencia

D: Detección

De acuerdo a los valores numéricos que se obtendrán durante la evaluación de los números de prioridad de riesgo, se establecen rangos numéricos obtenidos para su jerarquización correspondiente. La Tabla 28 muestra el rango numérico mínimo y máximo según los niveles de NPR de los modos de falla de los componentes críticos de las bombas multietapas. Así mismo, las Tablas 29, 30 y 31 detallan las ponderaciones de cada uno de los criterios para la evaluación y análisis del NPR.

Tabla 28

Rango numérico de NPR para modos de falla de componentes críticos de bombas multietapas HC 2000 ARC/HPHVMARC H6 FER

NPR	Nivel de NPR	Abreviatura
>120	Inaceptable	I
[75 - 120]	Medianamente aceptable	M
[1 – 74]	Aceptable	A

Nota. La tabla muestra 3 niveles de NPR según el rango numérico. Fuente: Elaboración propia.

OCURRENCIA (O)

Tabla 29

Ponderación de niveles de ocurrencia de modos de falla de subsistemas críticos de bombas multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER

Probabilidad de incidente	Porcentaje de averías	Nivel
Eventos con poca posibilidad de evitar	1 en 2 (50%)	10
	1 en 3 (33.3 %)	9
Eventos frecuentes	1 en 8 (12.5 %)	8
	1 en 20 (5 %)	7
Eventos esporádicos	1 en 80 (1.25 %)	6
	1 en 400 (0.25 %)	5
	1 en 2000 (0.05 %)	4
Baja cantidad de eventos	1 en 15 000 (<0.05 %)	3
	1 en 150000 (<0.05 %)	2
Eventos improbables	1 en 1 500 000 (<0.05 %)	1

Nota. La tabla muestra 10 de niveles para la evaluación de la ocurrencia de falla para el análisis de criticidad. Fuente: Elaboración propia, adaptado de Torres (2017).

SEVERIDAD (S)

Tabla 30

Ponderación de niveles de severidad de modos de falla de subsistemas críticos de bombas multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER

Criterio	Efecto	Nivel
El evento afecta a la operación con seguridad del equipo. No cuenta con alarmas.	Peligros	10
El evento afecta a la operación con seguridad del equipo. Cuenta con alarmas.	Peligros	9
No se puede operar el equipo. Se pierde la función primaria.	Muy arriba	8
El equipo se puede operar. Alta reducción de ratio de funcionamiento.	Alto	7
El equipo se puede operar. Moderada reducción del nivel de funcionamiento.	Moderado	6
El equipo se puede operar. Baja reducción de la ratio de funcionamiento.	Bajo	5
Personas externas al equipo identifican la falla.	Muy bajo	4
El operario del equipo identifica la falla.	De menor importancia	3
Personal de mantenimiento del equipo identifica la falla. Exclusivamente	Muy de menor importancia	2
Ninguna consecuencia	Ninguno	1

Nota. La tabla muestra 10 de niveles para la evaluación de la severidad de falla para el análisis de criticidad. Fuente: Elaboración propia, adaptado de Torres (2017).

DETECCIÓN (D)

Tabla 31

Ponderación de niveles de detección de modos de falla de subsistemas críticos de bombas multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER

Criterio	Criterio	Nivel
Incertidumbre absoluta	El control de diseño no detecta una causa potencial del incidente o del modo de falla subsecuente; o no hay control de diseño.	10
Muy alejado	La probabilidad muy alejada de que el control de diseño detecte una causa potencial de incidente o del modo de falla subsecuente.	9
Alejado	La probabilidad alejada de que el control de diseño detectará una causa potencial del incidente o del modo de falla subsecuente.	8
Muy bajo	La probabilidad muy baja de que el control de diseño detectará una causa potencial del incidente o del modo de falla subsecuente.	7
Bajo	La probabilidad baja de que el control de diseño detectará una causa potencial del incidente o del modo de falla subsecuente.	6
Moderado	La probabilidad moderada de que el control de diseño detectará una causa potencial del incidente o del modo de falla subsecuente.	5
Moderadamente alto	La probabilidad moderada alta de que el control de diseño detectará una causa potencial del incidente o del modo de falla subsecuente.	4
Alto	La alta probabilidad de que el control de diseño detectará una causa potencial del incidente o del modo de falla subsecuente.	3
Muy Alto	La probabilidad muy alta de que el control de diseño detectará una causa potencial del incidente o del modo de falla subsecuente.	2
Casi seguro	El control de diseño detectará casi ciertamente una causa potencial del incidente o del modo de falla subsecuente.	1

Nota. La tabla muestra 10 de niveles para la evaluación de la detección de falla para el análisis de criticidad. Fuente: Elaboración propia, adaptado de Torres (2017).

3.7. Resultados de NPR de modos de falla de subsistemas críticos de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER

Se realizó la evaluación de la criticidad de los modos de falla de los subsistemas críticos de las bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER mediante el cálculo del NPR, los resultados se muestran en la Tabla 32.

Tabla 32

Números de prioridad de riesgos de subsistemas críticos de bombas multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER

Código	Ocurrencia (O)	Severidad (S)	Detección (D)	NPR
3.A.1.8	6	8	5	240
3.A.1.2	5	6	6	180
2.A.2.1	7	6	4	168
1.A.1.5	4	5	8	160
3.A.1.3	4	8	5	160
3.A.1.9	5	5	6	150
2.A.1.1	4	6	6	144
2.A.1.2	4	6	6	144
2.A.1.7	4	6	6	144
3.A.1.7	4	6	5	120
1.A.1.1	2	8	7	112
3.A.1.1	2	9	6	108
2.A.1.5	5	7	3	105
1.A.1.13	2	8	6	96
2.A.2.4	2	8	6	96
1.A.1.2	5	6	3	90
3.A.1.4	2	9	5	90
2.A.1.4	7	2	6	84
1.A.1.6	4	5	4	80

1.A.1.7	2	8	5	80
1.A.1.8	2	8	5	80
1.A.1.3	4	4	5	80
3.A.1.5	3	5	5	75
2.A.1.6	5	3	5	75
1.A.1.4	2	9	4	72
3.A.1.6	4	6	3	72
3.A.1.11	3	6	4	72
2.A.2.7	3	4	5	60
1.A.1.12	3	6	3	54
1.A.1.14	6	3	3	54
2.A.2.3	3	3	6	54
2.A.2.5	3	3	6	54
1.A.1.9	2	5	5	50
1.A.1.11	2	6	4	48
3.A.1.10	3	8	2	48
1.A.1.10	5	3	3	45
2.A.1.3	3	3	4	36
2.A.2.2	2	3	3	18
1.A.1.15	2	1	7	14
1.A.1.16	2	1	7	14
1.A.1.17	2	1	5	10
2.A.2.6	2	1	5	10
2.A.1.8	1	3	3	9

Nota. La tabla muestra los resultados de NPR. El valor más alto representa el modo de falla más crítico, mientras que el menor, el de criticidad baja. Fuente: Elaboración propia.

Además, la Tabla 33 muestra los resultados de la evaluación de los NPR, organizándolos desde el valor más alto hasta el de menor valor, incluyendo la representación porcentual de la criticidad de cada modo de falla respecto al total.

Tabla 33

Números de prioridad de riesgos con frecuencia acumulada de subsistemas críticos de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6

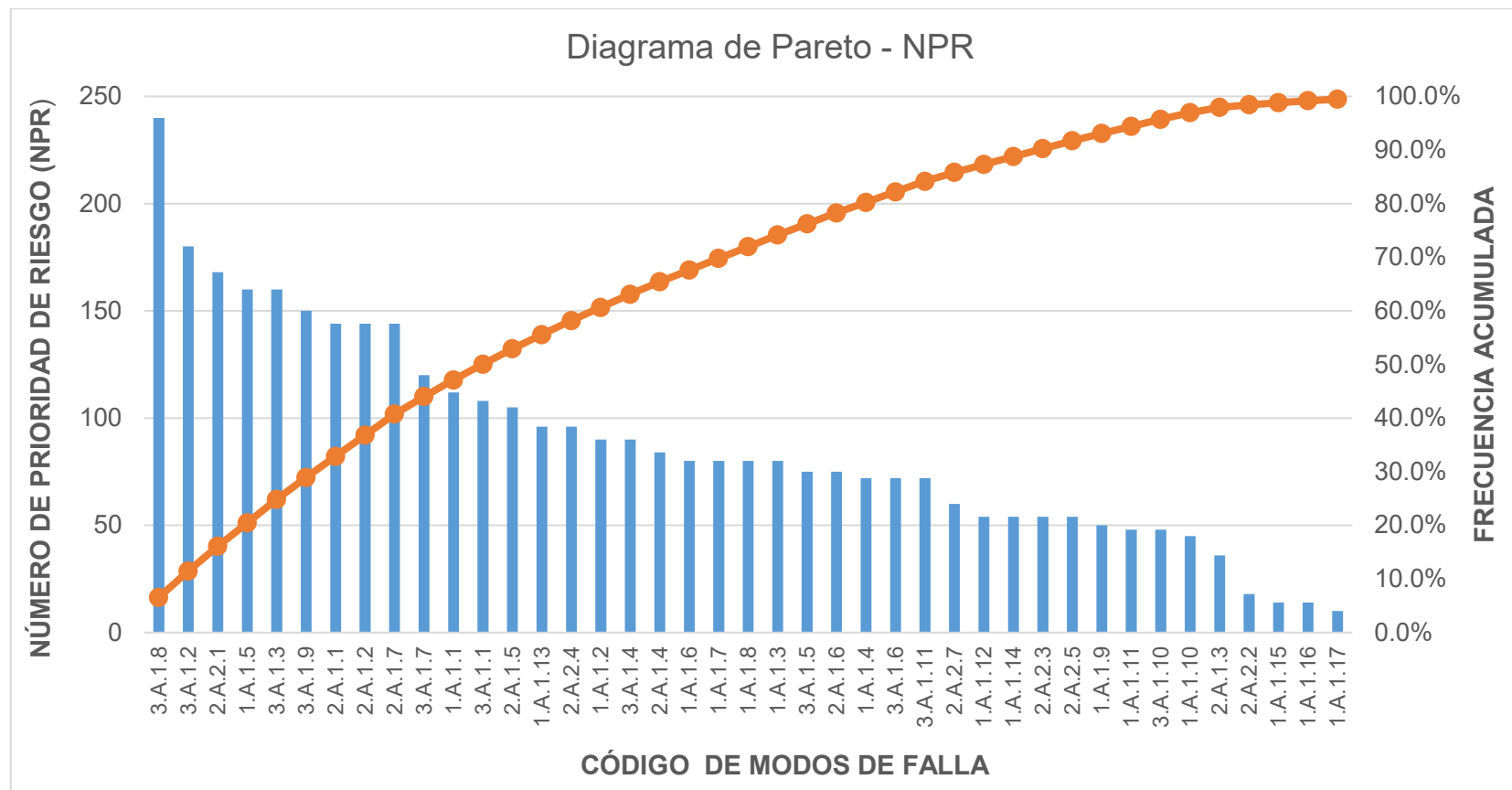
Código	NPR	Frecuencia Relativa (%)	Frecuencia Acumulada (%)
3.A.1.8	240	6.6%	6.6%
3.A.1.2	180	4.9%	11.5%
2.A.2.1	168	4.6%	16.1%
1.A.1.5	160	4.4%	20.5%
3.A.1.3	160	4.4%	24.8%
3.A.1.9	150	4.1%	28.9%
2.A.1.1	144	3.9%	32.9%
2.A.1.2	144	3.9%	36.8%
2.A.1.7	144	3.9%	40.8%
3.A.1.7	120	3.3%	44.0%
1.A.1.1	112	3.1%	47.1%
3.A.1.1	108	3.0%	50.1%
2.A.1.5	105	2.9%	52.9%
1.A.1.13	96	2.6%	55.6%
2.A.2.4	96	2.6%	58.2%
1.A.1.2	90	2.5%	60.7%
3.A.1.4	90	2.5%	63.1%
2.A.1.4	84	2.3%	65.4%
1.A.1.6	80	2.2%	67.6%

1.A.1.7	80	2.2%	69.8%
1.A.1.8	80	2.2%	72.0%
1.A.1.3	80	2.2%	74.2%
3.A.1.5	75	2.1%	76.2%
2.A.1.6	75	2.1%	78.3%
1.A.1.4	72	2.0%	80.2%
3.A.1.6	72	2.0%	82.2%
3.A.1.11	72	2.0%	84.2%
2.A.2.7	60	1.6%	85.8%
1.A.1.12	54	1.5%	87.3%
1.A.1.14	54	1.5%	88.8%
2.A.2.3	54	1.5%	90.3%
2.A.2.5	54	1.5%	91.7%
1.A.1.9	50	1.4%	93.1%
1.A.1.11	48	1.3%	94.4%
3.A.1.10	48	1.3%	95.7%
1.A.1.10	45	1.2%	97.0%
2.A.1.3	36	1.0%	97.9%
2.A.2.2	18	0.5%	98.4%
1.A.1.15	14	0.4%	98.8%
1.A.1.16	14	0.4%	99.2%
1.A.1.17	10	0.3%	99.5%
2.A.2.6	10	0.3%	99.8%
2.A.1.8	9	0.2%	100.0%

Nota. La tabla muestra los resultados de la frecuencia acumulada de los modos de falla.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 30

Diagrama de Pareto de NPR y frecuencia acumulada de modos de falla de subsistemas críticos de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6



Nota. La gráfica muestra la distribución y ordenamiento de los modos de falla según el NPR. Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

4.1. Análisis de resultados

En la presente investigación se llevó a cabo la elaboración de una Propuesta de Plan de Mantenimiento basado en la Metodología FMEA a las bombas de mayor criticidad de un lote petrolero considerando la evaluación de riesgos asociados a la ocurrencia de falla en los equipos, ello para evitar la ocurrencia y/o minimizar el riesgo asociado a las fallas. El tipo de estudio ha sido aplicado, utilizando niveles descriptivos y enfoque cualitativo para diseñar una propuesta de solución práctica que podría beneficiar la operación y mantenimiento de los equipos de un lote petrolero.

En base a ello, en la presente investigación se logró identificar a las bombas de mayor criticidad del lote petrolero. Se analizaron un total de 40 equipos de bombeo (bombas) de los procesos de producción de un lote petrolero. El proceso de evaluación determinó 7 equipos de alta criticidad, 16 equipos de media criticidad y 17 equipos de baja criticidad. Así mismo, los equipos más críticos resultaron ser las bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 del sistema de reinyección de agua producida, los cuales obtuvieron un valor de criticidad de 21. Por otra parte, los equipos que presentaron el menor nivel de criticidad fueron las bombas P-82 y P-83, ambos con un valor numérico mínimo de 5.4.

Además, en base al FMEA se logró identificar 43 modos de falla más críticos de las bombas horizontales multietapas, mediante el valor del Número de Prioridad de Riesgo (NPR), respectivamente, los cuales son detallados en Tabla 34. La Tabla 34 muestra información detallada de la evaluación de cada uno de los modos de falla y su respectivo nivel de NPR (de

acuerdo al cuadro de ponderación correspondiente) en orden descendente desde la parte superior. Además, la Tabla 34 también muestra, la calificación de la ocurrencia (O), severidad (S) y detección (D).

Finalmente, de acuerdo a dichos análisis mencionados, se ha propuesto un Plan de Mantenimiento en que se detallan actividades estratégicas que permitirán evitar o minimizar los impactos de los modos de falla más críticos. La Tabla 35 muestra todos los detalles de información del Plan de Mantenimiento propuesto para las bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 del sistema de reinyección de agua producida de un lote petrolero.

Tabla 34

Nivel de NPR de modos de fallas de subsistemas críticos de bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6

Código	(O)	(S)	(D)	NPR	Frecuencia Relativa (%)	Frecuencia Acumulada (%)	Característica de falla	Acumulado (%)
3.A.1.8	6	8	5	240	6.6%	6.6%	I	44.0%
3.A.1.2	5	6	6	180	4.9%	11.5%	I	
2.A.2.1	7	6	4	168	4.6%	16.1%	I	
1.A.1.5	4	5	8	160	4.4%	20.5%	I	
3.A.1.3	4	8	5	160	4.4%	24.8%	I	
3.A.1.9	5	5	6	150	4.1%	28.9%	I	
2.A.1.1	4	6	6	144	3.9%	32.9%	I	
2.A.1.2	4	6	6	144	3.9%	36.8%	I	
2.A.1.7	4	6	6	144	3.9%	40.8%	I	
3.A.1.7	4	6	5	120	3.3%	44.0%	I	34.3%
1.A.1.1	2	8	7	112	3.1%	47.1%	M	
3.A.1.1	2	9	6	108	3.0%	50.1%	M	
2.A.1.5	5	7	3	105	2.9%	52.9%	M	
1.A.1.13	2	8	6	96	2.6%	55.6%	M	

2.A.2.4	2	8	6	96	2.6%	58.2%	M	
1.A.1.2	5	6	3	90	2.5%	60.7%	M	
3.A.1.4	2	9	5	90	2.5%	63.1%	M	
2.A.1.4	7	2	6	84	2.3%	65.4%	M	
1.A.1.6	4	5	4	80	2.2%	67.6%	M	
1.A.1.7	2	8	5	80	2.2%	69.8%	M	
1.A.1.8	2	8	5	80	2.2%	72.0%	M	
1.A.1.3	4	4	5	80	2.2%	74.2%	M	
3.A.1.5	3	5	5	75	2.1%	76.2%	M	
2.A.1.6	5	3	5	75	2.1%	78.3%	M	
1.A.1.4	2	9	4	72	2.0%	80.2%	A	21.7%
3.A.1.6	4	6	3	72	2.0%	82.2%	A	
3.A.1.11	3	6	4	72	2.0%	84.2%	A	
2.A.2.7	3	4	5	60	1.6%	85.8%	A	
1.A.1.12	3	6	3	54	1.5%	87.3%	A	
1.A.1.14	6	3	3	54	1.5%	88.8%	A	
2.A.2.3	3	3	6	54	1.5%	90.3%	A	
2.A.2.5	3	3	6	54	1.5%	91.7%	A	
1.A.1.9	2	5	5	50	1.4%	93.1%	A	
1.A.1.11	2	6	4	48	1.3%	94.4%	A	
3.A.1.10	3	8	2	48	1.3%	95.7%	A	
1.A.1.10	5	3	3	45	1.2%	97.0%	A	
2.A.1.3	3	3	4	36	1.0%	97.9%	A	
2.A.2.2	2	3	3	18	0.5%	98.4%	A	
1.A.1.15	2	1	7	14	0.4%	98.8%	A	
1.A.1.16	2	1	7	14	0.4%	99.2%	A	
1.A.1.17	2	1	5	10	0.3%	99.5%	A	
2.A.2.6	2	1	5	10	0.3%	99.8%	A	
2.A.1.8	1	3	3	9	0.2%	100.0%	A	

Nota. La tabla muestra el ordenamiento de los NPR. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 35

Propuesta de Plan de Mantenimiento de bombas horizontales multietapas

HOJA DE DECISIÓN RCM				SISTEMA: Bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 FER										Facilitador:		Fecha:		Hoja N.º 01	
														Auditor:		Fecha:			
REFERENCIA DE INFORMACIÓN FMEA				EVALUACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS				ARBOL LÓGICO DE DECISIÓN						ESTRATEGIAS					
								H1	H2	H3	Actividades a falta de			Tipo. Mantto.	Tarea	Frec.	Mano de obra	Durac. Tarea	
								S1	S2	S3									
								O1	O2	O3	H4	H5	S4						
F	FF	MF	NPR	H	S	E	O	N1	N2	N3									
1.A	1.A.1	1.A.1.1	112	S	N	N	S	S							Predictivo	Realizar medición y análisis de vibraciones en los puntos vertical, axial y radial del lado anterior y posterior del motor eléctrico (no requiere parar el equipo), si se encuentra valores superiores a 4 mm/s, requiere alineamiento. Ajustar pernos de anclaje.	3 meses	01 técnico HPS + 01 técnico mecánico	2 h
1.A	1.A.1	1.A.1.2	90	S	S			S							Preventivo	Revisar parámetros de funcionamiento eléctrico de voltaje, corriente, y factor de potencia en relé REF 615 en celda de alimentación de motor eléctrico. No requiere parar el equipo.	Diario	01 técnico HPS	0.5 h
1.A	1.A.1	1.A.1.3	80	S	N	N	S	S							Preventivo	Desmontar el transmisor de temperatura (PIT) para calibrar y contrastar en taller. Si el transmisor falla, realizar el cambio inmediato. No requiere parar el equipo.	1 año	01 técnico instrumentista	4 h
1.A	1.A.1	1.A.1.5	160	S	N	N	S	S							Preventivo	Revisar cantidad de grasa en grasero automático, si presenta baja cantidad, realizar la recarga hasta el nivel lleno. Se debe revisar el correcto funcionamiento del lubricador automático. No requiere parar el equipo.	3 meses	01 técnico HPS	0.5 h
1.A	1.A.1	1.A.1.6	80	S	N	N	S	S							Predictivo	Realizar medición y análisis de vibraciones en los puntos vertical, axial y radial del lado anterior y posterior del motor eléctrico (no requiere parar el equipo), si se encuentra valores superiores a 4	3 meses	01 técnico HPS + 01 técnico mecánico	2 h

																mm/s, quiere alineamiento.			
1.A	1.A.1	1.A.1.7	80	S	N	N	S	S								Predictivo Revisar la caja de borneras de conexión del motor eléctrico mediante cámara termográfica, si se encuentran puntos calientes y conexiones flojas realizar el ajuste inmediato. Para el ajuste de conexiones requiere parar el equipo.	3 meses	02 técnicos electricistas	2 h
1.A	1.A.1	1.A.1.8	80	S	S		S									Predictivo Realizar medición de aislamiento entre bobinados línea-línea y bobinados línea-tierra del motor eléctrico. Las lecturas deben ser superiores a 10 MΩ. Requiere parar el equipo para la evaluación.	6 meses	02 técnicos electricistas	2h
1.A	1.A.1	1.A.1.13	96	S	S		S									Predictivo Realizar medición de aislamiento del cable de alimentación desde la salida de celda de media tensión y la llegada en caja de borneras de motor eléctrico (destapar caja de conexión). Las lecturas deben registrar mayor a 10 MΩ. Requiere parar el equipo.	6 meses	02 técnicos electricistas	2h
1.A	1.A.1	2.A.1.1	144	S	N	N	S	S								Preventivo Revisar nivel de aceite en cámara de empuje. Si este cuenta con bajo nivel, agregar aceite refrigerante Centríf CL-4 hasta obtener un buen nivel. No requiere parar el equipo.	3 meses	01 técnico HPS	0.5 h
2.A	2.A.1	2.A.1.2	144	S	N	N	S	S								Basado en condición Revisar integridad de acople. De presentar fisuras y daño mecánico debe cambiar inmediatamente. Run life de acople 05 años para sustitución cíclica.	5 años	01 técnico HPS + 02 técnicos mecánicos	4 h
2.A	2.A.1	2.A.1.4	84	S	N	N	S	S								Predictivo Verificar color de deshumecedor (si torna de color naranja debe cambiarse). Realizar retiro de muestra de aceite para análisis en laboratorio. Si el estudio muestra presencia de contaminación y	3 meses	01 técnico HPS + 01 técnico mecánico	1 h

															humedad, debe cambiarse el aceite y filtros por completo.			
2.A	2.A.1	2.A.1.5	105	S	N	N	S	S							Predictivo Realizar medición y análisis de vibraciones en los puntos vertical, axial y radial del lado anterior y posterior de la cámara de empuje, si se encuentra valores superiores a 4 mm/s, requiere alineamiento.	3 meses	01 técnico HPS	2 h
2.A	2.A.1	2.A.1.6	75	S	N	N	S	S							Preventivo Desmontar el transmisor de temperatura (PIT) para calibrar y contrastar en taller. Si el transmisor falla, realizar el cambio inmediato. No requiere parar el equipo.	1 año	01 técnico instrumentista	4 h
2.A	2.A.1	2.A.1.7	144	S	N	N	S	S							Predictivo Realizar medición y análisis de vibraciones en los puntos vertical, axial y radial en entre la cámara de empuje y la bomba, si se encuentra valores superiores a 4 mm/s, requiere alineamiento. Para el alineamiento requiere parar el equipo.	3 meses	01 técnico HPS	2 h
2.A	2.A.1	2.A.2.1	168	S	N	N	S	S							Preventivo Cambiar filtro de aceite refrigerante. Usar filtro Donaldson y verificar presión de descarga. No requiere parar la cámara de empuje, pero si la bomba de refrigeración.	3 meses	01 técnico HPS	1 h
2.A	2.A.2	2.A.2.4	96	S	N	N	S	S							Preventivo Realizar megado del motor eléctrico de bomba de refrigeración y revisar conexiones con cámara termográfica.	6 meses	02 técnicos electricistas	2 h
3.A	3.A.1	3.A.1.1	108	S	S			S							Predictivo Liberar tensiones en soporte de bomba (skid).	3 meses	01 técnico HPS	1 h
3.A	3.A.1	3.A.1.2	180	S	N	N	S	S							Basado en condición Revisar integridad de sello mecánico. De presentarse sobrepresiones y presencia de cristalizaciones cambiar inmediatamente. Run life de sello mecánico cada	3 años	01 técnico HPS + 02 técnicos mecánicos	4 h

															03 años para sustitución cíclica.			
3.A	3.A.1	3.A.1.3	160	S	N	N	S	S							Predictivo Realizar medición y análisis de vibraciones en los puntos vertical, axial y radial del lado anterior y posterior de la bomba, si se encuentra valores superiores a 4 mm/s, requiere alineamiento.	3 meses	01 técnico HPS	2 h
3.A	3.A.1	3.A.1.4	90	S	N	N	S	S							Preventivo Limpiar filtro de succión al ingreso de bomba. Revisar integridad de filtro para cambiar, según se requiera. Requiere parar el equipo.	15 días	02 técnicos mecánicos + 01 ayudante	3h
3.A	3.A.1	3.A.1.5	75	S	N	N	S	S							Predictivo Realizar medición y análisis de vibraciones en los puntos vertical, axial y radial de lados de la bomba.	3 meses	01 técnico HPS	2 h
3.A	3.A.1	3.A.1.7	120	N				S							Preventivo Desmontar la válvula de alivio de presión para calibrar, contrastar y mantenimiento en taller. No requiere parar el equipo. Realizar prueba de apertura a 150 psi.	1 año	01 técnico instrumentista	4 h
3.A	3.A.1	3.A.1.8	240	S	N	N	S	S							Preventivo Limpiar filtro de succión al ingreso de bomba. Revisar integridad de filtro para cambiar, según se requiera. Requiere parar el equipo.	15 días	02 técnicos mecánicos + 01 ayudante	3h
3.A	3.A.1	3.A.1.9	150	S	S	S		S							Preventivo Desmontaje de transmisor de presión de descargar para contrastación en taller. Contrastación de manómetros y termómetro. Prueba de disparo de switch de baja presión de succión y sobre presión de descarga. No requiere parar el equipo.	1 año	01 técnico instrumentista	6 horas

Nota. La tabla muestra la propuesta del Plan de Mantenimiento, en ella se detalla los tipos de mantenimiento, las actividades y los recursos.

Fuente: Elaboración propia

4.2. Contrastación de Hipótesis

En base a los resultados obtenidos en la presente investigación y, de acuerdo a la metodología de investigación desarrollado, a continuación, se procede a realizar la contrastación de las Hipótesis General y Específicas de la presente investigación:

Contrastación de la Hipótesis General

“La aplicación de la Metodología de Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) considerando la evaluación de riesgos permitirá desarrollar la propuesta de un Plan de Mantenimiento a las bombas de mayor criticidad de un lote petrolero”

a) Identificación de bombas de mayor criticidad:

- Se analizaron 40 equipos de bombeo, identificando 7 equipos de alta criticidad.
- Las bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 del sistema de reinyección de agua producida resultaron ser las de mayor criticidad.

Dicha información valida la primera parte de la hipótesis, ya que se logró identificar las bombas de mayor criticidad de un lote petrolero.

b) Aplicación de la metodología FMEA:

- Se identificaron 3 subsistemas críticos de las bombas de mayor criticidad (Motor eléctrico, cámara de empuje y bomba).
- Se aplicó la Metodología FMEA a estos subsistemas, identificando 43 modos de falla significativos.
- Los modos de falla se clasificaron según su Número de Prioridad de Riesgo (NPR), los cuales son inaceptables (44%), medianamente aceptables (34.3%) y aceptables (21.7%).

Dicha información valida la aplicación exitosa de la metodología FMEA a las bombas de mayor criticidad, considerando la evaluación de riesgos.

c) Propuesta de Plan de Mantenimiento:

- Se logró proponer un Plan de Mantenimiento para las bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6.
- El plan incluye tareas y tipos de mantenimiento preventivos, predictivos y basados en condición.
- Se espera que el plan evite o reduzca el riesgo de la ocurrencia de una falla, así mismo, aumente la disponibilidad de los equipos, reduzca los gastos por mantenimiento y disminuya las paradas no programadas.

Dicha información, valida la última parte de la hipótesis, demostrando que la aplicación del FMEA permitió proponer un Plan de Mantenimiento específico para las bombas de mayor criticidad.

La información obtenida respalda y validan completamente la hipótesis planteada. Se logró identificar las bombas de mayor criticidad, aplicar la metodología FMEA considerando la evaluación de riesgos y, finalmente, se propuso un Plan de Mantenimiento basado en los resultados del análisis.

Contrastación de la Hipótesis Específica 1:

“La aplicación del análisis de criticidad permitirá jerarquizar e identificar a las bombas de mayor criticidad de un lote petrolero”

Análisis

1. Jerarquización e identificación de bombas de mayor criticidad

Se logró jerarquizar e identificar los 40 equipos de bombeo (bombas) del proceso de producción de un lote petrolero en tres niveles de criticidad: alta, media y baja. Esta categorización demuestra que se establecieron criterios efectivos para evaluar la criticidad de los equipos de bombeo del proceso de producción de un lote petrolero.

2.Focalización de esfuerzos

La identificación de las bombas de mayor criticidad (bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6) permite una clara focalización y direccionamiento de los esfuerzos de mantenimiento hacia dichos equipos. El hecho de que estas bombas (bombas horizontales multietapas) representen menos del 20% del total de equipos sugiere una priorización efectiva.

3. Impacto en la operatividad:

Las bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 del sistema de reinyección de agua producida, con el valor de criticidad más alto (21), se destacan como los que potencialmente más impactan en la operatividad de la planta. La gran diferencia entre el valor de criticidad más alto (21) y el más bajo (5.4) indica una clara distinción entre los equipos críticos y no críticos.

4.Establecimiento de criterios:

La capacidad de asignar criterios y ponderaciones para el análisis de criticidad para obtener valores numéricos de criticidad (con los cuales se obtuvieron resultados desde valores de 5.4 hasta 21) sugiere que se establecieron criterios óptimos para la evaluación, lo cual proporciona una base objetiva para la toma de decisiones.

Los resultados obtenidos respaldan la hipótesis específica número 1. La jerarquización e identificación de los equipos de bombeo según su criticidad, particularmente la identificación de los equipos de mayor criticidad, es decir, las bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 del sistema de reinyección de agua producida, ha permitido una focalización y direccionamiento claro de los esfuerzos de mantenimiento hacia dichos equipos. El establecimiento de criterios (de acuerdo al análisis de criticidad) que resultaron en la obtención de valores de criticidad desde 5.4 hasta 21, proporcionó una base sólida para priorizar los equipos que más impactan en la operatividad de la planta. La distinción clara entre equipos de alta, media y baja criticidad, así como la identificación específica de las bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 como los más críticos, demuestra que el proceso de evaluación y selección mediante el análisis de criticidades efectivo para dirigir la atención hacia los equipos más importantes para la operación de la planta. La evidencia cualitativa obtenida a través de este análisis respalda la hipótesis específica número 1. La jerarquización e identificación de las bombas de mayor criticidad, basada en el análisis de criticidad, efectivamente permiten focalizar los esfuerzos y direccionamiento de mantenimiento en los equipos que más impactan en la operatividad de un lote petrolero. Este enfoque proporciona una base sólida para la optimización de las estrategias de mantenimiento y la asignación eficiente de recursos.

Contrastación de la Hipótesis Específica 2:

"La aplicación del Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) a las bombas de mayor criticidad facilitará una evaluación exhaustiva de los riesgos asociados y una priorización efectiva de los modos de falla más relevantes."

Análisis

1.Evaluación exhaustiva de riesgos

La identificación de 43 modos de falla significativos en los 3 subsistemas críticos (motor eléctrico, cámara de empuje y bomba) de las bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 del sistema de reinyección de agua producida demuestra una evaluación detallada y exhaustiva de los riesgos. El análisis ha abarcado múltiples subsistemas, lo que sugiere un enfoque integral en la evaluación de riesgos.

2. Priorización efectiva:

La clasificación de los modos de falla en tres categorías (inaceptable, medianamente aceptable y aceptable) basada en los números de prioridad de riesgo (NPR) indica una priorización clara y efectiva. La distribución de los modos de falla (44% inaceptables, 21.7 % medianamente aceptables, 34.3% aceptables) proporciona una base sólida para la toma de decisiones en cuanto a la asignación de recursos y esfuerzos de mantenimiento.

3.Identificación de modos de falla relevantes:

La identificación de 10 modos de falla inaceptables (44%) permite una focalización inmediata en los riesgos más críticos. La categorización de 14 modos de falla como medianamente aceptables (34.3%) ofrece una perspectiva clara sobre áreas que requieren atención, aunque no sean de máxima prioridad.

4.Aplicación efectiva del FMEA:

El uso del FMEA permitió no solo identificar los modos de falla, sino también evaluarlos y priorizarlos de manera sistemática. La capacidad de asignar niveles de aceptabilidad a cada modo de falla demuestra la eficacia del FMEA en la evaluación de riesgos.

Interpretación:

Los resultados obtenidos respaldan fuertemente la hipótesis específica número 2. La aplicación del FMEA a las bombas de mayor criticidad (en este caso las bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC) ha facilitado una evaluación exhaustiva de los riesgos asociados, como lo demuestra la identificación detallada de 43 modos de falla significativos en 3 subsistemas críticos (motor eléctrico, cámara de empuje y bomba). La priorización efectiva de los modos de falla más relevantes se evidencia claramente en la clasificación jerárquica basada en los riesgos mediante el número de prioridad de riesgo (NPR). Esta clasificación no solo ha identificado los modos de falla más críticos (44% inaceptables), sino que también ha proporcionado una visión clara de los riesgos de nivel medio y bajo, permitiendo una gestión de mantenimiento más estratégica y enfocada. La evidencia cualitativa obtenida a través de este análisis respalda firmemente la hipótesis específica número 2. La aplicación del FMEA a las bombas de mayor criticidad ha demostrado ser una herramienta efectiva para realizar una evaluación exhaustiva de los riesgos asociados y para priorizar de manera efectiva los modos de falla más relevantes. Este enfoque proporciona una base sólida para la toma de decisiones en la gestión de mantenimiento, permitiendo una asignación más eficiente de recursos y una focalización clara en los riesgos más críticos. Además, la categorización detallada de los modos de falla ofrece una visión integral de los riesgos asociados a las bombas de mayor criticidad.

Contrastación de la Hipótesis Específica 3:

“La determinación de tareas y tipos de mantenimiento específicos, basados en los resultados del FMEA, permitirá la elaboración de un Plan de Mantenimiento para las bombas de mayor criticidad”

Análisis

1. Integralidad del Plan de Mantenimiento

El Plan de Mantenimiento propuesto incluye una combinación de tipos de mantenimientos preventivos, predictivos y basados en condición, lo cual demuestra un enfoque integral que abarca diferentes estrategias de mantenimiento. Esta diversidad de tipos de mantenimiento sugiere que el plan está diseñado para abordar una amplia gama de posibles modos de falla y condiciones de las bombas.

2. Adaptación a necesidades particulares

El Plan de Mantenimiento se desarrolló específicamente para las bombas horizontales multietapas, previamente identificados como críticos, lo que indica una adaptación a las necesidades particulares de estos equipos. La utilización de la Metodología FMEA como base para el plan sugiere que se han considerado los riesgos y modos de falla específicos de estas bombas.

3. Tareas y tipos de mantenimiento específicos

La inclusión de mantenimientos preventivos indica un enfoque proactivo para prevenir fallas antes de que ocurran. Los mantenimientos predictivos sugieren la implementación de técnicas de monitoreo y análisis para predecir posibles fallas. El

mantenimiento basado en condición demuestra un enfoque adaptativo que responde a las condiciones reales de los equipos.

4. Expectativas de mejora

La espera con la propuesta del Plan de Mantenimiento radicada en la minimización del impacto ante la ocurrencia de fallas sugiere que el plan incluye estrategias tanto preventivas como de mitigación. Así mismo, se espera un aumento en la disponibilidad de los equipos, lo cual es un indicador clave de la efectividad del plan de mantenimiento. La previsión de reducir los gastos por mantenimiento sugiere que el plan está diseñado para optimizar recursos. La expectativa de reducir las paradas no programadas indica que el plan aborda de manera efectiva los modos de falla críticos.

Interpretación:

Los resultados obtenidos respaldan fuertemente la hipótesis específica número 3. La combinación de mantenimientos preventivos, predictivos y basados en condición refleja un enfoque holístico que aborda diferentes aspectos y etapas del ciclo de vida de los equipos. Esta variedad de estrategias de mantenimiento sugiere que el plan está diseñado para ser flexible y responder a diferentes escenarios y condiciones de las bombas horizontales multietapas. El hecho de que el plan se base en los resultados del FMEA indica que se han considerado los modos de falla específicos y sus prioridades, lo que contribuye significativamente a su adaptación a las necesidades particulares de las bombas horizontales multietapas. La evidencia cualitativa obtenida a través de este análisis respalda sólidamente la hipótesis específica número 3. La determinación de tareas y tipos de mantenimiento específicos, basados en los resultados del FMEA, ha resultado en un Plan de Mantenimiento de las bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 de un lote petrolero. La inclusión de diversos tipos de mantenimiento

(preventivo, predictivo y basado en condición) demuestra la integralidad del plan, mientras que su desarrollo basado en el FMEA y su enfoque en las bombas horizontales multietapas evidencia su adaptación a las necesidades específicas de estos equipos críticos. Las expectativas de mejora en términos de disponibilidad, eficiencia de costos, reducción de paradas no programadas y minimización del impacto de fallas refuerzan la conclusión de que el plan propuesto está bien diseñado para abordar los desafíos de mantenimiento específicos de estos equipos críticos de un lote petrolero.

4.3. Discusión de resultados

En el contexto de la propuesta de Plan de Mantenimiento utilizando la metodología FMEA para los equipos más críticos de un lote petrolero, es relevante considerar su aplicación en otras industrias, como las refinerías de mineral. Un estudio significativo es el estudio realizado por **Torres (2022)** en la Refinería Nexa Resources, donde el autor implementó un Plan de Mantenimiento aplicando la metodología FMEA a equipos específicos, como los Electrofiltros Secos B2033-1/2. En su investigación, Torres identificó la necesidad de optimizar el Plan de Mantenimiento existente, subrayando la importancia de adoptar enfoques sistemáticos como el FMEA. La información recopilada reveló que la aplicación de FMEA no solo era crucial para identificar y priorizar fallas críticas, sino que también era fundamental para desarrollar estrategias efectivas que abordaran los riesgos asociados a los equipos. Al igual que en el estudio de Torres, la presente investigación se ha enfocado en la priorización de fallas críticas y en la elaboración de hojas de decisiones basadas en el análisis de riesgos. Estas prácticas son esenciales para optimizar el rendimiento operativo y mitigar las consecuencias de las fallas en equipos dentro de entornos industriales complejos. La metodología FMEA ofrece un marco estructurado que permite una evaluación detallada y proactiva de los riesgos, facilitando la implementación de estrategias de mantenimiento que mejoren la fiabilidad y eficiencia operativa. En resumen, tanto el estudio de Torres como la propuesta actual destacan la eficacia de la

metodología del FMEA para gestionar el mantenimiento de equipos críticos y optimizar el rendimiento en diversos contextos industriales.

La Metodología FMEA (Análisis de Modos y Efectos de Falla) es ampliamente valorada por su capacidad para identificar y mitigar riesgos en sistemas complejos. En este contexto, el estudio de **Flores (2022)** destaca cómo la aplicación sistemática de FMEA permitió una evaluación exhaustiva de los modos de falla potenciales, sus efectos y la severidad de dichos efectos. Este enfoque brindó una base sólida para el desarrollo de estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo, mejorando la capacidad para anticipar y gestionar las posibles ocurrencias de fallas. El estudio de Flores subraya la importancia de una evaluación detallada y proactiva de las fallas para establecer medidas preventivas y predictivas efectivas. Al identificar los posibles modos de falla y evaluar sus impactos, el FMEA permite diseñar estrategias de mantenimiento que no solo abordan los problemas antes de que ocurran, sino que también optimizan el rendimiento y la fiabilidad de los sistemas. En línea con estos principios, la presente investigación se alinea con los fundamentos propuestos por Flores. La propuesta en la presente investigación también se centra en la anticipación proactiva y la evaluación exhaustiva de fallas a través del análisis FMEA. Al adoptar un enfoque similar, se busca aplicar la metodología FMEA para desarrollar estrategias de mantenimiento que aborden de manera efectiva los riesgos y mejoren la fiabilidad operativa. Esto asegura que el mantenimiento se base en una comprensión profunda de las posibles fallas y sus consecuencias, alineándose con las mejores prácticas establecidas en el estudio de Flores para optimizar la gestión del mantenimiento en sistemas complejos.

En el estudio de **Cruzado (2020)**, el autor presentó una propuesta de Plan de Mantenimiento utilizando el Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA). Sin embargo, su investigación se centra en la propuesta teórica y en la estructura de la metodología FMEA,

sin proceder a la implementación directa del plan. Cruzado proporcionó una serie de recomendaciones y un marco metodológico que sirve de guía para el desarrollo del Plan de Mantenimiento, pero no llevó a cabo la aplicación práctica del mismo. De manera similar, en el presente estudio, la propuesta de Plan de Mantenimiento también se limita a la fase de propuesta y no incluye el estudio de la implementación directa en un lote petrolero. No obstante, se ha diseñado un marco flexible basado en las recomendaciones del análisis del FMEA, que puede adaptarse a las necesidades específicas y características de un lote petrolero en cuestión. Esta flexibilidad permite ajustar el plan propuesto a diferentes contextos operativos y requisitos particulares, asegurando que el marco pueda ser modificado conforme a las condiciones del entorno y el contexto operativo. En resumen, tanto el estudio de Cruzado como el presente estudio ofrecen propuestas teóricas para la mejora del mantenimiento mediante el uso de FMEA, pero se enfocan en la elaboración de marcos y recomendaciones en lugar de en la ejecución práctica. La principal diferencia radica en que el estudio actual incorpora un marco adaptable que se ajusta a las especificidades de un lote petrolero, proporcionando una base flexible para su aplicación futura.

Uno de los principales beneficios teóricos de la propuesta radica en su capacidad para priorizar actividades de mantenimiento preventivo en función del riesgo asociado a cada componente crítico. En este contexto, el estudio de **Mariñas (2019)** se centra en demostrar la efectividad del uso de la Metodología FMEA, aplicado a determinados activos. Este enfoque resultó en un incremento del 8.24% en la disponibilidad de los equipos. El estudio de Mariñas muestra que la implementación FMEA puede llevar a una reducción considerable en los costos operativos derivados de fallas no planificadas, además de una mejora significativa en la disponibilidad y eficiencia de los equipos industriales. La metodología empleada en su investigación no solo optimiza el rendimiento operativo, sino que también contribuye a una gestión más eficiente de los recursos y una mayor fiabilidad

en el funcionamiento de los equipos. En alineación con estos hallazgos, la propuesta de la presente investigación sugiere un enfoque estructurado que busca maximizar el rendimiento operativo a largo plazo en el lote petrolero. Al igual que en el estudio de Mariñas, la propuesta se centra en aplicar principios del FMEA para priorizar las actividades de mantenimiento y reducir los riesgos asociados a los componentes críticos. Esto tiene el potencial de mejorar la disponibilidad de los equipos y optimizar los costos operativos, apoyando así una gestión más eficiente y efectiva del mantenimiento industrial.

Finalmente, es importante reconocer las limitaciones inherentes a un estudio que no implementa directamente la propuesta del Plan de Mantenimiento. La falta de datos empíricos sobre la efectividad práctica del plan propuesto representa una limitación significativa. Para abordar esta deficiencia, futuras investigaciones podrían considerar la realización de estudios piloto o simulaciones que evalúen la aplicabilidad y efectividad de FMEA en condiciones operativas reales dentro del lote petrolero o en otras instalaciones similares. Además, sería beneficioso explorar cómo las tecnologías emergentes y el análisis de datos, podrían complementar y mejorar aún más el enfoque propuesto. En resumen, el presente estudio ofrece una propuesta fundamentada para un Plan de Mantenimiento bajo la metodología FMEA a las bombas horizontales multietapas del sistema de reinyección de agua producida de un lote petrolero. Aunque se presenta como una solución, no implementada directamente en el estudio, la propuesta proporciona un marco sólido para futuras investigaciones y desarrollos prácticos que podrían mejorar significativamente la gestión del mantenimiento preventivo y predictivo de un lote petrolero o en entornos industriales similares complejos. Al integrar la metodología, lecciones y recomendaciones de la información existente, se sientan las bases para iniciativas futuras investigaciones que podrían optimizar la confiabilidad operativa y la eficiencia de costos en el proceso de producción de petróleo.

CONCLUSIONES

1. Se analizaron un total de 40 equipos de bombeo (bombas) de los procesos de producción de un lote petrolero. El proceso de evaluación determinó 7 equipos de alta criticidad, 16 equipos de media criticidad y 17 equipos de baja criticidad. Así mismo, los equipos más críticos resultaron ser las bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 del sistema de reinyección de agua producida, los cuales obtuvieron un valor de criticidad de 21. Así mismo, los equipos que presentaron el menor nivel de criticidad fueron las bombas P-82 y P-83, ambos con un valor numérico mínimo de 5.4.
2. En base al desarrollo de la aplicación de la Metodología FMEA a los 3 subsistemas críticos de las bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 , se identificaron un total de 43 modos de falla significativos. La clasificación jerárquica de los modos de falla mediante los números de prioridad de riesgo (NPR) determinó un total de 10 modos de falla inaceptable (44%), 14 modos de fallas medianamente aceptable (34.3%) y 19 modos de falla aceptables (21.7%).
3. La propuesta del Plan de Mantenimiento ha permitido determinar las tareas y tipos de mantenimiento más adecuados de acuerdo a la integración de los resultados del FMEA y considerando la evaluación de riesgos, resultando en tareas específicas de tipo preventivo, predictivo y basadas en condición con determinadas frecuencias.
4. Finalmente, se logró proponer un Plan de Mantenimiento a las bombas horizontales multietapas HC 20000 ARC / HPHVMARC H6 de un lote petrolero de acuerdo a la aplicación de la Metodología FMEA y considerando la evaluación de los riesgos asociados a las fallas, los cuales consignan tareas y tipos de mantenimiento específicos. Con el Plan propuesto, se espera minimizar y/o evitar el impacto de los riesgos asociados ante la ocurrencia de fallas, aumentar la disponibilidad de los equipos, reducir los gastos por mantenimiento y reducir las paradas no programadas.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda extender la aplicación de la Metodología de Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) a otros equipos y sistemas de producción en el lote petrolero, ello para identificar y evitar uno o más modos de falla que pudiesen generar paradas no previstas. Así mismo, al impacto que podría generar en los diferentes aspectos medioambientales, lucro cesante, gastos, entre otros
2. Se recomienda contar con información actualizada de la arquitectura de activos, es decir, la estructura taxonómica de todos los equipos de la planta en el que se desarrolla el estudio. En caso no se cuente con dicha información, se recomienda usar como referencia la norma ISO 14224 para establecer una estructura jerárquica
3. Se recomienda establecer un plan para disponer y recolectar toda la información posible de los equipos en análisis, tales como el manual de partes, manuales de despiece, registro de ordenes de trabajo, entre otros.
4. Para el desarrollo del FMEA se recomienda involucrar a todas personas involucradas a los equipos, entre operadores y mantenedores. Además, se sugiere contactarse con los técnicos o ingenieros especialistas, en la medida que sea posible, representantes de la marca del equipo o quienes brinden el servicio especializado, de preferencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Alvarado-Betancourt EJ, Sabando-Piguabe LF. Sistema de gestión de mantenimiento basado en confiabilidad. Caso de estudio: Planta de tratamiento de agua empresa DIALILIFE. ING [Internet]. Disponible en: <https://journalingeniar.org/index.php/ingeniar/article/view/33>.
- [2] Amendola, L. (2017). Organización y gestión del mantenimiento. España: PMM Institute for Learning.
- [3] Baker Hugues Centrilift (2008). HPUMP Horizontal Surface pumping system, Installation, operation an manténganse manual. USA.
- [4] Barrios, J., & Molina, S. (2018). Análisis y diagnóstico de los tipos de mantenimiento en la pequeña y gran minería aurífera en la subregión del Bajo Cauca, Antioquia. Metalnova, 17-25.
- [5] Carpio, M. (2020). Análisis de criticidad: Una metodología de clasificación de equipos industriales y selección de modelos de mantenimiento - Gerencia Industrial Latinoamérica. Gerencia Industrial. <https://www.gerenciaindustrial.com/2020/08/analisis-de-criticidad-una-metodologia.html>
- [6] Castillo, A. (2017). Propuesta de mantenimiento centrado en la confiabilidad de las unidades de bombeo horizontal multietapas del sistema Power Oil de la estación Atacapi del B-57-LI de PetroAmazonas EP. Tesis de Maestría, Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Riobamba-Ecuador.
- [7] Cépeda, D. (2017). Diseño e implementación de un plan de mejoramiento basado en RCM para el mantenimiento de las bombas horizontales de inyección de agua de campo Jaguar-Masa Stork. Tesis de pregrado, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

- [8] Coronado, J. (2007). Análisis de modos y efectos de fallas a los equipos más críticos de la sierra Wagner KM-44 de Colada en C.V.G. Venalum. Tesis de posgrado, Universidad Sinón Bolívar, Venezuela.
- [9] Cruzado, R. (2020). Aplicación del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) a bombas de carga en una refinería. Tesis de pregrado, Universidad de Piura, Piura-Perú.
- [10] Da Costa, M. (2010). Aplicación del mantenimiento centrado en la confiabilidad a motores a gas de dos tiempos en pozos de alta producción. Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima-Perú-
- [11] Duffua, S., Raouf, A., & Campbell, J. D. (2000). Sistemas de Mantenimiento: Planeación y Control. Mexico: Limusa
- [12] Franco, I. (2010). Análisis de modos y efectos de falla (AMEF): Una alternativa para la gerencia de riesgos.
- [13] Garcia, O. (2012). Gestión Moderna del Mantenimiento Industrial. Colombia: Ediciones de la U.
- [14] García, S. (2012). Ingeniería de mantenimiento-Manual práctico para la gestión eficaz del mantenimiento industrial. Renovetec.
- [15] Gerencia de supervisión de contratos, PerúPetro (2023). Reporte de producción fiscalizada de hidrocarburos líquidos a nivel nacional (barriles) diciembre 2023.
- [16] Guerra, E., & Montes de Oca, A. (2019). Relación entre la productividad, el mantenimiento y el reemplazo del equipamiento minero en la gran minería. Boletín Ciencias de la Tierra (45), 14-21.
- [17] Guevara, E. (2016). Aplicación del mantenimiento centrado en la confiabilidad a los grupos electrógenos de la estación Tapir A del bloque 17 PetroOriental. Tesis de Maestría, Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Riobamba-Ecuador.

- [18] Hernández, S. & Pabón N. (2012). Diseño de un sistema de mantenimiento preventivo para la planta de mecanizado de industrias TANUZI S.A. basado en análisis de criticidad y análisis de modo y efecto de falla (FMEA). Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga-Colombia.
- [19] Huerta, R. (2000). El análisis de criticidad, una metodología para mejorar la confiabilidad operacional. Ingeniería Mecánica 4 (2000), 13-19.
- [20] ISO 14224:2016, Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural- Recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos. Estándar Internacional.
- [21] KOMATSU MITSUI, M. P. (2014). Gestión de Mantenimiento. Lima, Callao: KOMATSU MITSUI, MAQUINARIAS PERU.
- [22] Marcano, J. (2021). Derrame de petróleo: ¿cuáles son sus consecuencias y cómo podemos limpiarlo? BIOGUIA. https://www.bioguia.com/ambiente/derrame-de-petroleo-consecuencias-y-como-limpiarlo_90514735.html
- [23] Mariñas, D. (2022). Plan de mantenimiento basado en RCM para maximizar la disponibilidad de tráileres de 2 toneladas en una empresa de transportes de Lima. Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica del Perú, Lima-Perú.
- [24] Martínez Lugo, C. A. (2004). Implementación de un análisis de modo y efecto de falla en una línea manufactura para juguetes. Tesis de Maestría, Ciudad Universitaria
- [25] Martínez, K. (2010). Análisis de fallas aplicados a los equipos de carga tipo scoop de la mina Isidora-Valle norte pertenecientes a la empresa minera Venrus C.A., El Callao-Estado Bolívar. Tesis de pregrado, Universidad de Oriente Núcleo Bolívar, Bolívar-Venezuela.

- [26] Melendez, T. (2019). Propuesta de plan de mantenimiento centrado en confiabilidad para mejorar disponibilidad de electrofiltros secos tipo F3X7500X4500X4875 de refiniería Nexa Resources. Tesis de pregrado, Lima-Perú.
- [27] Ministerio de Energía y Minas (2023). Reporte mensual noviembre 2023 cifras preliminares. Revista estadística “En cifras” Hidrocarburos.
- [28] Molerio-León, L. (2014). Disposición final de aguas producidas tratadas de yacimientos gasopetrolíferos carbonatados en acuíferos cársicos litorales someros salinizados. Digital Commons, University of Florida.
- [29] Mora, L. (2011). Mantenimiento-Planeamiento, ejecución y control. (2da. Ed.). México, Alfa Omega.
- [30] Moubray, J. (2004). Mantenimiento centrado en la confiabilidad (E, Sueiro y Asociados, Trad. 2ª ed.). Reino unido: Aldon Ltd. (Original work published 1991).
- [31] Nava A., J. D. (2001). Aplicación práctica del mantenimiento. Mérida: Primera Edición. Universidad de los Andes.
- [32] Pérez, F. (2021). Conceptos generales en la gestión de mantenimiento industrial. Colombia: Ediciones USTA.
- [33] Pérez, F. (2021). Conceptos generales en la gestión del mantenimiento industrial. Universidad Santo Tomás. Recuperado de: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/33276/9789588477923.pdf?sequence=4&isAllowed=y>.
- [34] Pinzón, C. (s.f.). Tipos de Mantenimiento que pueden ser aplicados a cualquier organización. Tipos de Mantenimiento, CMMShere.
- [35] Rahulprasad, H. (2023). ISO 9001 Equipment Maintenance Plan. ISO DOCS. <https://iso-docs.com/blogs/iso-9001-qms/iso-9001-equipment-maintenance-plan>

- [36] Ranjan, N., Agrawal, H., & Kumar, A. (2019). Maintenance Schedules of Mining HEMM Using an Optimization Framework Model. *Journal Européen des Systèmes Automatisés (RS-JESA)*, 52(3), 235-242.
- [37] Real Academia Española. (s.f.). Diccionario de la lengua española, 23. a ed. Versión 23.7 en línea. Recuperado el 22/02/2024, de <<https://dle.rae.es>>
- [38] SAE JA1011 (1999). Criterios de evaluación para procesos de mantenimiento centrado en la confiabilidad. Estándar Internacional.
- [39] Sexto, L. (2014). Desarrollo de un plan de mantenimiento aplicando la metodología del mantenimiento basado en la confiabilidad (RCM) para el vehículo hidrocleaner vactor M654 de la empresa Etapa EP. Tesis de posgrado, Universidad Politécnica del Chimborazo, Riobamba-Ecuador.
- [40] Torres, A. (2017). Plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad para mejorar disponibilidad de la chancadora 60"x113" de minera Chinalco. Tesis de pregrado, Huancayo-Perú.
- [41] Flores, V. (2022). Plan de mantenimiento basado en la confiabilidad (RCM) para mejorar la disponibilidad del equipo de alta criticidad en la línea de deshidratado de la planta de alimentos Villa Andina S.A.C- Cajamarca. Tesis de pregrado, Universidad Pedro Ruiz Gallo, Cajamarca-Perú.
- [42] Velasco, E., Sánchez, M., & Peral, R. (2016). XXI Congreso de Ingeniería Mecánica. Alicante: Universidad Miguel Hernández.
- [43] WEG Motors (s.f.). Guía de especificación de motores eléctricos, Driving efficiency and sustainability.

ANEXOS

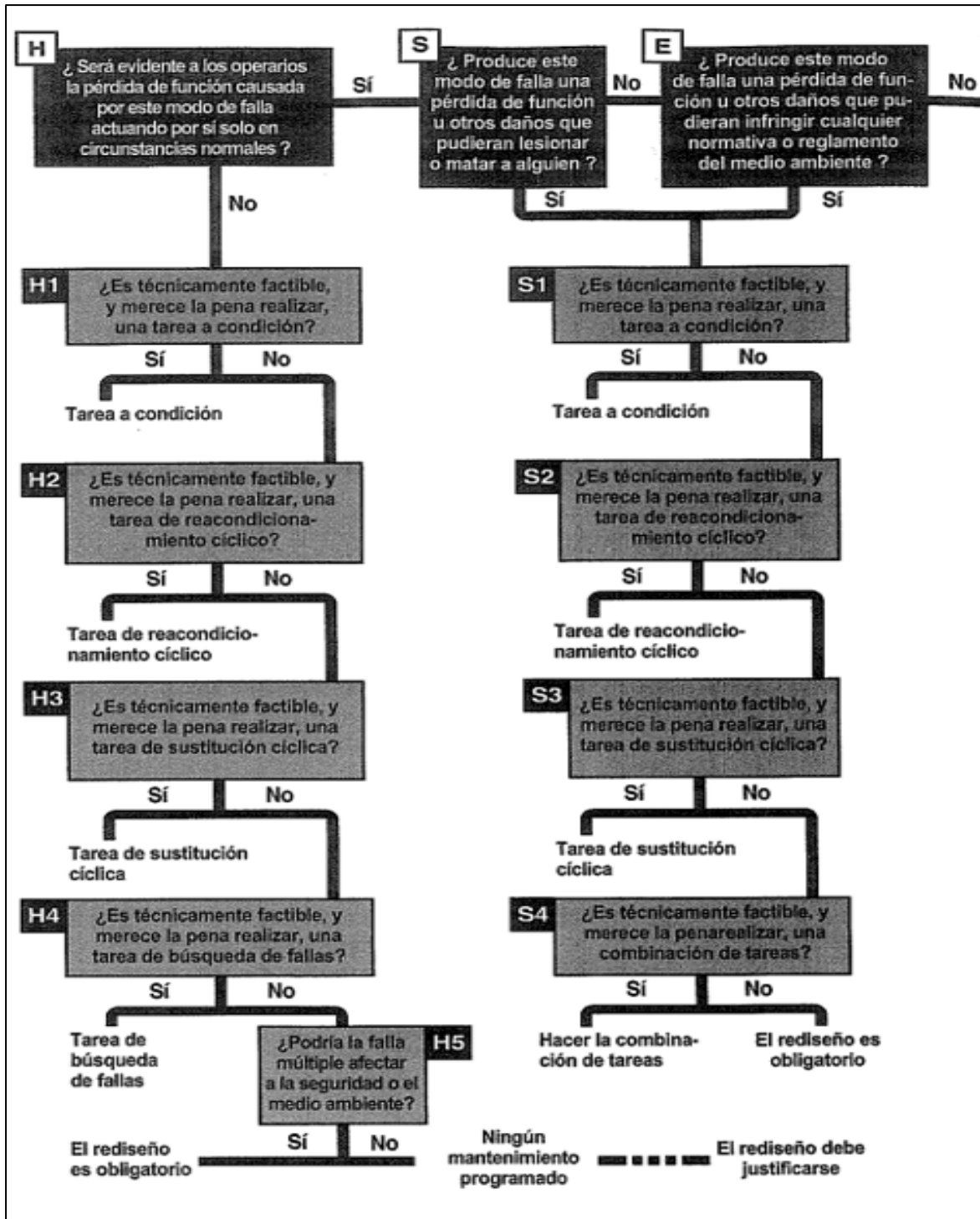
Anexo A Matriz de consistencia

TITULO: “PROPUESTA DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO BAJO LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLA (FMEA) A BOMBAS DE MAYOR CRITICIDAD DE UN LOTE PETROLERO”				
PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES Y DIMENSIONES	MÉTODOLOGÍA
PROBLEMA GENERAL ¿Cómo proponer un Plan de Mantenimiento bajo la Metodología de Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) a las bombas de mayor criticidad de un lote petrolero considerando la evaluación de riesgos?	OBJETIVO GENERAL Proponer un Plan de Mantenimiento bajo la Metodología de Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) a las bombas de mayor criticidad de un lote petrolero considerando la evaluación de riesgos.	HIPÓTESIS GENERAL La aplicación de la Metodología de Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) considerando la evaluación de riesgos permitirá desarrollar la propuesta de un Plan de Mantenimiento a las bombas de mayor criticidad de un lote petrolero.	VARIABLES INDEPENDIENTES Evaluación de riesgo *Dimensión -Severidad -Ocurrencia -Detección -Criticidad de equipo *Indicador Número de prioridad de riesgo (NPR) - Inaceptable (>120) - Medianamente aceptable (75-120) - Aceptable (1-74)	*Tipo de investigación Aplicada *Enfoque de investigación Cualitativo *Nivel de investigación Descriptivo *Diseño de investigación No experimental
PROBLEMAS ESPECÍFICOS 1. ¿Cómo jerarquizar e identificar a las bombas de mayor criticidad de un lote petrolero mediante el análisis de criticidad? 2. ¿Cómo aplicar el Análisis de Modos y Efectos de Falla para evaluar los riesgos asociados a las bombas de mayor criticidad y priorizar los modos de falla? 3. ¿Qué tareas y tipos de mantenimiento específicos se deben incluir en el Plan de Mantenimiento propuesto para las bombas de mayor criticidad considerando los resultados del análisis FMEA?	OBJETIVOS ESPECÍFICOS 1. Jerarquizar e identificar a las bombas de mayor criticidad de un lote petrolero mediante el análisis de criticidad. 2. Aplicar el Análisis de Modos y Efectos de Falla para evaluar los riesgos asociados a las bombas de mayor criticidad y priorizar los modos de falla relevantes. 3. Determinar las tareas y tipos de mantenimiento específicos del Plan de Mantenimiento propuesto para las bombas de mayor criticidad, considerando los resultados del FMEA.	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS 1. La aplicación del análisis de criticidad permitirá jerarquizar e identificar a las bombas de mayor criticidad de un lote petrolero. 2. La aplicación del Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) a las bombas de mayor criticidad facilitará una evaluación exhaustiva de los riesgos asociados y una priorización efectiva de los modos de falla más relevantes. 3. La determinación de tareas y tipos de mantenimiento específicos, basados en los resultados del FMEA, permitirá la elaboración de un Plan de Mantenimiento para las bombas de mayor criticidad.	Nivel de criticidad - Alta (>19) - Media (12-19) - Baja (1-11) VARIABLES DEPENDIENTE Plan de Mantenimiento bajo la Metodología de Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) *Dimensión -Fallas -Modos de Falla -Efectos de Falla -Tipos de Mantenimiento *Indicador -Característica de falla -Diversidad de modos de falla -Severidad de fallas -Variedad de tipos de mantenimiento	

Nota. La tabla muestra la matriz de consistencia de la presente investigación. Fuente: Elaboración propia

Anexo B

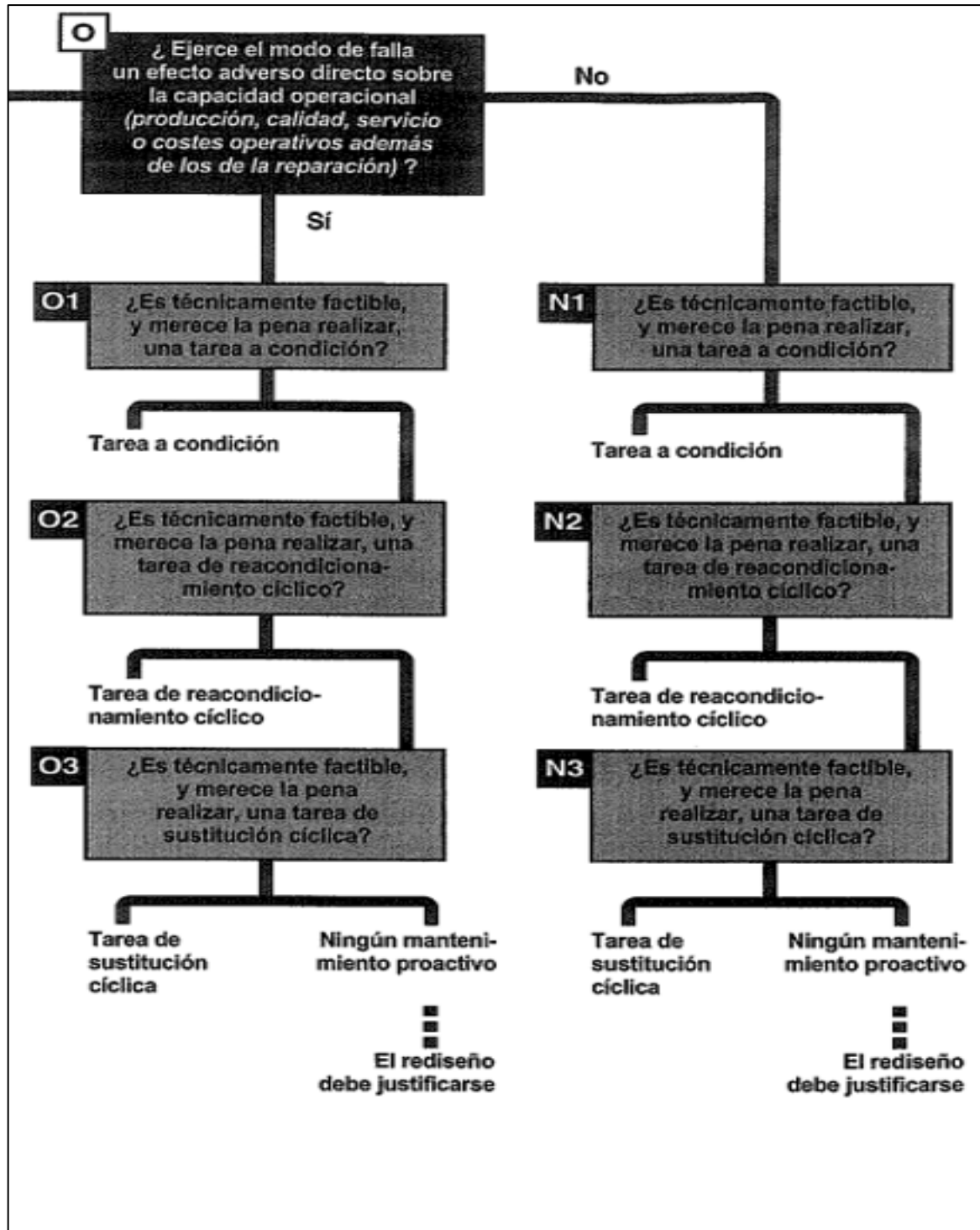
Diagrama de decisión RCM Parte 1 de 2



Nota. La gráfica muestra el diagrama de decisión RCM, Parte 1 de 2. Fuente: Moubray (2004).

Anexo C

Diagrama de decisión RCM Parte 2 de 2



Nota. La gráfica muestra el diagrama de decisión RCM, Parte 2 de 2. Fuente: Moubray (2004).