



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial

**DISEÑO TRIBOLÓGICO Y ANÁLISIS DE COSTO DE UN SISTEMA DE
PURIFICACIÓN DE LUBRICANTE SAE PARA MOTORES GENERAL
ELECTRIC DE 3,5 MW**

Miguel Alexander Cuellar Cutzal

Asesorado por el Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez

Guatemala, julio de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO TRIBOLÓGICO Y ANÁLISIS DE COSTO DE UN SISTEMA DE
PURIFICACIÓN DE LUBRICANTE SAE PARA MOTORES GENERAL
ELECTRIC DE 3,5 MW**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MIGUEL ALEXANDER CUELLAR CUTZAL

ASESORADO POR EL ING. CARLOS HUMBERTO PEREZ RODRIGUEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL

GUATEMALA, JULIO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz Gonzales
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Cesar Ernesto Urquizú Rodas
EXAMINADOR	Ing. Carlos Humberto Pérez
EXAMINADOR	Ing. Edgar Álvarez Coti
EXAMINADOR	Ing. Nora García Tobar
SECRETARIA	Inga. Mildred Guzmán

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO TRIBOLÓGICO Y ANÁLISIS DE COSTO DE UN SISTEMA DE PURIFICACIÓN DE LUBRICANTE SAE PARA MOTORES GENERAL ELECTRIC DE 3,5 MW

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, con fecha 24 de agosto del 2021.

Miguel Alexander Cuellar Cutzal

Guatemala, 21 de septiembre de 2021

Ingeniero César Ernesto Urquizú Rodas
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial
Facultad de Ingeniería
U.S.A.C.
Presente

Estimado Ingeniero Urquizú:

Por este medio hago constar que yo, el Ingeniero Carlos Humberto Pérez Rodríguez, con colegiado número tres mil setenta y uno (3071) doy como visto bueno el desarrollo del trabajo de investigación final de graduación del alumno Miguel Alexander Cuellar Cutzal, identificado con CUI 2551049950101, alumno a quien he podido apoyar como asesor de su protocolo de tesis.

Dando por concluido el desarrollo de la misma investigación y planteando las soluciones inmediatas y efectivas para el beneficio de la institución donde se desarrolló la misma.

Doy por concluido de forma eficiente ante mi persona el desarrollo de su trabajo de investigación, como tema DISEÑO TRIBOLÓGICO Y ANÁLISIS DE COSTO DE UN SISTEMA DE PURIFICACIÓN DE LUBRICANTE SAE PARA MOTORES GENERAL ELECTRIC DE 3,5 MW.

Línea de investigación: Administración / Mecánica

Área: Economía y finanzas / Control de procesos

Aprovecho la oportunidad para expresarle mi consideración

Atentamente.



Carlos Humberto Pérez Rodríguez
INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL
Colegiado 3071

Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Colegiado No. 3071



ESCUELA DE
INGENIERÍA MECÁNICA INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

REF.REV.EMI.011.022

Como Catedrático Revisor del Trabajo de Graduación titulado **DISEÑO TRIBOLÓGICO Y ANÁLISIS DE COSTO DE UN SISTEMA DE PURIFICACIÓN DE LUBRICANTE SAE PARA MOTORES GENERAL ELECTRIC DE 3,5MW**, presentado por el estudiante universitario **Miguel Alexander Cuellar Cutzal**, apruebo el presente trabajo y recomiendo la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Ing. Danilo González Trejo
INGENIERO INDUSTRIAL
COLEGIADO ACTIVO 6182

Ing. Erwin Danilo González Trejo
Catedrático Revisor de Trabajos de Graduación
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial

Guatemala, febrero de 2022.

/mgp



ESCUELA DE
INGENIERÍA MECÁNICA INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

LNG.DIRECTOR.153.EMI.2022

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de área y la aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **DISEÑO TRIBOLÓGICO Y ANÁLISIS DE COSTO DE UN SISTEMA DE PURIFICACIÓN DE LUBRICANTE SAE PARA MOTORES GENERAL ELECTRIC DE 3,5 MW**, presentado por: **Miguel Alexander Cuellar Cutzal**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



Firmada digitalmente por Cesar Ernesto Urquizu Rodas
Motivo: Ingeniero Industrial
Ubicación: Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería
Mecánica Industrial, U.SAC
Colegiado 4.272
Periodo: Junio a septiembre año 2022

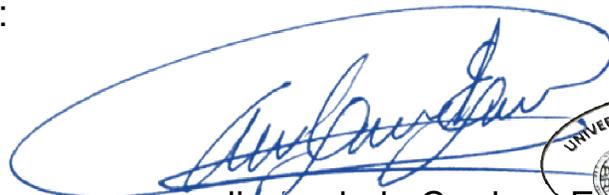
Ing. César Ernesto Urquizú Rodas
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial

Guatemala, julio de 2022.

LNG.DECANATO.OI.519.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO TRIBOLÓGICO Y ANÁLISIS DE COSTO DE UN SISTEMA DE PURIFICACIÓN DE LUBRICANTE SAE PARA MOTORES GENERAL ELECTRIC DE 3,5 MW**, presentado por: **Miguel Alexander Cuellar Cutzal**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, julio de 2022

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por permitirme llegar con salud hasta este año y cumplir mi sueño de ser un profesional universitario.
Mis padres	Ericka Cutzal y Miguel Cuellar por brindarme su amor y apoyo incondicional.
Mi hermano	Kevin Cuellar por su amor y apoyo en cada etapa de mi vida personal y profesional.
Mi abuela	Blanca Granillo por sus palabras de motivación, apoyo y amor incondicional.
Mis tíos	Eddy, Rodolfo, Henry y Gerardo Cutzal; Carlos y Edgar Cuellar por su apoyo en todo este proceso.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser una casa de estudios superior que me brindó todo el material para mi aprendizaje y mi crecimiento profesional.

Facultad de Ingeniería

Por brindarme todo el conocimiento necesario para llevar a cabo un completo crecimiento personal y profesional.

Mis amigos de la Facultad

Milton Fuentes, Jorge Aldana, Kevin Salazar, Kevin Cruz, Oscar Alvizurez y Roger Zelada, por todos los recuerdos y aprendizajes en el transcurso de nuestra estadía en la facultad.

Ing. Carlos Pérez

Por su apoyo profesional en todo el proceso de la tesis.

Ing. Alejandro Girón

Por sus consejos y apoyo profesional en el proceso de aprendizaje para mi trabajo de graduación.

Ing. Marco Caal

Por su apoyo profesional en cada una de las etapas de mi trabajo de graduación.

Mis compañeros del trabajo

Por el aporte de sus conocimientos en todo el proceso de mi trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XI
GLOSARIO.....	XIII
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS	XIX
INTRODUCCIÓN.....	XXI
1. ANTECEDENTES GENERALES.....	1
1.1. Descripción del giro de la empresa.....	1
1.2. Inicios de la empresa en Guatemala.....	1
1.3. Información general.....	1
1.3.1. Ubicación geográfica.....	2
1.3.2. Misión de la empresa	2
1.3.3. Visión de la empresa.....	2
1.4. Tipo de organización	2
1.4.1. Organigrama de la empresa.....	3
1.5. Descripción del área de generación <i>Power Plant</i>	3
1.5.1. Área de tanques de combustible	5
1.5.2. Área de motores o generación	6
1.5.2.1. Motores General Electric de 3,5 MW	7
1.5.3. Cuarto de control <i>Power Plant</i>	9
1.5.4. Área de transformación.....	11
1.5.5. Área de distribución 13,8 kV	12

2.	MANTENIMIENTO ACTUAL Y DESCRIPCIÓN DEL LUBRICANTE UTILIZADO	13
2.1.	Aceite lubricante.....	13
2.1.1.	Definición y objetivo del lubricante.....	13
2.1.2.	Tipos de aceite lubricante.....	14
2.1.2.1.	Monogrado	14
2.1.2.2.	Multigrados	15
2.1.3.	Propiedades técnicas del aceite lubricante.....	15
2.1.3.1.	Viscosidad y tipos de viscosidad.....	15
2.1.3.2.	Índice de viscosidad	17
2.1.3.3.	Densidad	18
2.1.3.4.	Temperatura de inflamación	19
2.1.3.5.	Temperatura de escurrimiento	19
2.1.3.6.	Índice de basicidad TBN	20
2.2.	Aceite lubricante utilizado PUMA 30 SAE 40.....	21
2.3.	Análisis del desempeño del lubricante	22
2.3.1.	Muestreo utilizado actualmente	23
2.3.2.	Parámetros de medida en el análisis	23
2.3.3.	Registro e historia estadístico de las muestras	24
2.4.	Mantenimiento preventivo de 750 horas y 1 000 horas	27
2.4.1.	Descripción del mantenimiento.....	27
2.4.2.	Actividades del mantenimiento	28
2.4.3.	Diagrama de flujo	29
2.4.4.	Diagrama de recorrido	30
2.5.	Costo anual por mantenimiento.....	31
2.5.1.	Costo de mano de obra	31
2.5.2.	Costo de repuestos y materiales	31

3.	CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE PURIFICACIÓN DE LUBRICANTE SAE PARA MOTORES GENERAL ELECTRIC DE 3,5MW.....	33
3.1.	Propiedades técnicas y equipo auxiliar del sistema de purificación de lubricante SAE	33
3.1.1.	Principio de sedimentación	33
3.1.2.	Interface y discos de gravedad	35
3.1.3.	Análisis técnico ingeniería.....	36
3.1.4.	Panel de control	36
3.1.5.	Parámetros eléctricos	37
3.1.6.	Bombas de sistema de lodos	38
3.1.6.1.	Análisis de costo de instalación, como propiedades eléctricas-mecánicas y técnico	38
3.1.7.	Bombas del sistema de agua	39
3.1.7.1.	Análisis mecánico	40
3.1.8.	Sistema de tubería de agua	40
3.1.8.1.	Características técnicas	40
3.1.8.2.	Análisis de costo de instalación.....	41
3.1.9.	Compresor de aire	42
3.1.9.1.	Cálculos físico-mecánicos	42
3.1.9.2.	Análisis de costo de instalación.....	43
3.1.10.	Sistema de tubería de aire	44
3.1.10.1.	Características técnicas del material	44
3.1.10.2.	Análisis de costo de instalación.....	45
3.1.11.	Análisis y evaluación del sistema de purificación de lubricante	46
3.1.12.	Costo total de instalación	46
3.1.12.1.	Del equipo industrial.....	46

3.1.12.2.	Montaje y conexión del equipo industrial	47
3.1.12.3.	Recurso humano o técnico	48
3.1.13.	Mantenimiento del sistema de purificación	48
3.1.13.1.	Mantenimiento preventivo	48
3.1.13.2.	Cada 500 horas	48
3.1.13.3.	Limpieza de Strainer	49
3.1.13.4.	Cada 1 000 horas	49
3.1.13.4.1.	Limpieza a <i>bowl</i>	49
3.1.13.4.2.	Cambio de lubricante	49
3.1.13.4.3.	Mantenimiento a electroválvulas	50
3.1.13.5.	Cada 5 000 horas	50
3.1.13.5.1.	Revisión de <i>clutch</i> centrífugo.....	50
3.1.13.6.	Cada 1 2000 horas	51
3.1.13.6.1.	Cambio de cojinetes a motores eléctricos.....	51
4.	ACCIONES EN EL PROCESO DE IMPLEMENTACIÓN	53
4.1.	Plan de acción.....	53
4.1.1.	Entidades responsables	53
4.1.1.1.	Gerencia General	53
4.1.1.2.	Generación <i>Power Plant</i>	54
4.1.1.3.	Departamento de seguridad industrial (QSHE).....	54
4.1.1.4.	Departamento de proyectos.....	55
4.1.1.5.	Servicios externos	55
4.2.	Ubicación del sistema de purificación en las instalaciones.....	55

4.2.1.	Diagrama de recorrido	56
4.2.2.	Diagrama de flujo	57
4.3.	Mantenimiento preventivo	59
4.3.1.	Plan de mantenimiento	59
4.3.2.	Ruta crítica del mantenimiento preventivo.....	59
4.3.2.1.	Costos por mantenimiento preventivo	60
4.3.2.2.	Costos por mano de obra	60
4.3.2.3.	Costos de repuestos y materiales	61
4.4.	Análisis tribológico	61
4.4.1.	Técnica de muestreo de lubricante	61
4.4.2.	Equipo de campo digital Easyship	62
4.4.2.1.	Características técnicas	62
4.4.3.	Herramientas de control de análisis	63
4.4.3.1.	Registro interno.....	63
4.4.3.1.1.	Muestreo cada 100 horas de trabajo	64
4.4.3.1.2.	Formato de control	64
4.4.3.2.	Registro externo.....	64
4.4.3.2.1.	Tercerización o subcontratación para análisis de muestra	65
4.4.3.2.2.	Horizon (análisis de muestra).....	65
5.	ANÁLISIS DE SEGUIMIENTO Y MEJORA CONTINUA	67
5.1.	Resultados obtenidos	67
5.1.1.	Interpretación	68
5.1.2.	Aplicación	68

5.1.3.	Ventajas y beneficios.....	68
5.1.3.1.	Ventajas competitivas	69
5.1.4.	Disminución de mantenimientos anuales.....	69
5.1.5.	Mejora en resultados de estudio de aceite	70
5.1.6.	Mejoras de eficiencia anual	70
5.2.	Eficiencia energética	70
5.2.1.	Costos operativos.....	71
5.2.2.	Beneficios.....	71
5.2.3.	Alargamiento de la vida útil del lubricante.....	72
5.2.4.	Mejora de la eficiencia de uso del equipo	72
5.2.5.	Ahorro anual en gastos de mantenimiento	73
5.2.6.	Evitar paros en producción de energía	75
5.2.7.	Acciones correctivas.....	75
5.2.8.	Retiro de servicio de tercerización.....	75
5.2.9.	Maximizar tiempos de evaluación para reducir gastos operativos	76
CONCLUSIONES		77
RECOMENDACIONES		79
BIBLIOGRAFÍA		81
APÉNDICE.....		87

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Organigrama Perenco Guatemala Limited, campamento Xan.....	3
2.	Área de generación <i>Power Plant</i>	4
3.	Área de tanques de combustible <i>Power Plant</i>	5
4.	Área de motores <i>Power Plant</i>	6
5.	Motor General Electric de 3,5 MW	9
6.	Cuarto de control <i>Power Plant</i>	10
7.	Área de transformación <i>Power Plant</i>	11
8.	Cuarto de distribución 13,8 kV <i>Power Plant</i>	12
9.	Representación de viscosidad en un esfuerzo cortante aplicado en mecanismos.....	16
10.	Curva de índice de viscosidad comunes	17
11.	Variación de viscosidad de diferentes aceites por su índice de viscosidad	18
12.	TBN según porcentaje de azufre en motores de combustión interna ...	21
13.	Muestras enviadas para análisis a empresa externa.....	25
14.	Registro de parámetros internos <i>Power Plant</i>	25
15.	Análisis de características técnicas del proceso de combustión del motor.....	26
16.	Control llevado por fuentes externas según muestras enviadas.....	26
17.	Diagrama de flujo en mantenimiento preventivo de 750 horas y 1 000 horas de motores GE	29
18.	Diagrama de recorrido en mantenimiento preventivo de 750 horas y 1 000 horas de motores GE	30

19.	Principio de sedimentación en el <i>bowl</i> de la purificadora	34
20.	Discos de gravedad	35
21.	Panel de control de purificadoras de aceite	37
22.	Tabla de diámetros normalizados para tuberías de PVC	41
23.	Diagrama de recorrido ubicación de sistema de purificación	56
24.	Diagrama de flujo del proceso del sistema de purificación en ubicación establecida	58
25.	Equipo de campo digital Easyship	63

TABLAS

I.	Propiedades específicas del aceite PUMA 30 SAE40.....	22
II.	Actividades llevadas a cabo en el mantenimiento de 750 horas y 1 000 horas.....	28
III.	Descripción del diagrama de recorrido en mantenimiento de 750 horas y 1 000 horas a motores GE	30
IV.	Costo de mano de obra en mantenimiento para las 750 horas y 1 000 horas de los motores GE	31
V.	Costo de repuestos utilizados en el mantenimiento de 750 horas y 1 000 horas de los motores GE	32
VI.	Características eléctricas del motor eléctrico del sistema de purificación de aceite	38
VII.	Características técnicas de bomba del sistema de lodos de un sistema de purificación de aceite	39
VIII.	Análisis de costo de un compresor de aire de 2,5 MMSCFD	43
IX.	Análisis de costo de un compresor de aire de 5 MMSCFD	44
X.	Costo de accesorios estándar para un sistema de purificación de aceite SAE.....	46

XI.	Descripción de diagrama de recorrido ubicación de sistema de purificación.....	57
XII.	Ahorro de costo anual con purificadora, prolongando la vida del lubricante a 3 000 horas.....	73
XIII.	Ahorro de costo anual con purificadora, prolongando la vida del lubricante a 4 500 horas.....	74
XIV.	Ahorro de costo anual con purificadora, prolongando la vida del lubricante a 6 000 horas.....	74

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
m	Metro
mm	Milímetro
nm	Nanómetro

GLOSARIO

Análisis espectro químico	Determina la cantidad de partículas metálicas presentes en el aceite, es la cantidad de desgaste metálico que se encuentra en el motor.
Análisis tribológico	Es el estudio que supone las superficies interactivas conforme a la fricción, lubricación y desgaste.
Combustión	Combinación del oxígeno con un material combustible.
Densidad	Es la propiedad característica de las sustancias de magnitud escalar referida a la cantidad de masa de cualquier sustancia u objeto sólido en un determinado volumen.
Electroválvulas	Es una válvula electromecánica, para controlar el paso del fluido por un conducto o tubería, está controlada por una bobina solenoide.
ETU	Engine terminal unit.

Filtración	Es la separación de partículas sólidas entre un medio líquido es decir sólido líquido, en la retención de partículas en un medio filtrante.
Lubricación	Proceso u operación que tiene como fin anular o disminuir la resistencia debido al rozamiento que existe entre dos superficies que se encuentran en contacto continuo.
Mantenimiento	Es un procedimiento que consiste en revisar los mecanismos, accesorios y partes en un sistema mecánico, eléctrico y electrónico, prediciendo fallos y corrigiéndolos para conservarlos en un buen estado.
ONAF	Oil natural air forced.
Parámetros eléctricos	Estos son definidos por medio del sistema de potencia del motor eléctrico y los equipos auxiliares.
PPM	Partes por millón.
QSHE	Quality Health Safety and Environment.
SAE	Society of automotive engineers.
Sedimentación	Cuando se trata de una separación líquido-líquido o bien líquido-líquido-sólido, se basa en la diferencia que existe entre densidades.

Sensor inductivo	Se usa para medir la velocidad de giro del motor eléctrico de la purificadora.
<i>Strainer</i>	Es un elemento filtrante de partículas, que puede ser lavado, como también cambiado si fuera necesario.
TBN	Total base number.
Transformadores	Es un elemento eléctrico que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, algunos como los de tipo ONAF, la circulación de aceite es de forma natural conocido como termosifón y su enfriamiento por aire de forma forzada utilizando ventiladores.
Temperatura de inflamación	Se define como la temperatura a la cual la evaporación del aceite lubricante debido a proceso químicos-termodinámicos origina una mezcla inflamable de vapores y aire.
Viscosidad	Es un parámetro que consiste generalmente a la resistencia de fluir durante los esfuerzos cortantes que se presentan cuando el lubricante se encuentra entre ambas partes que quieren entrar en contacto.

RESUMEN

El trabajo de graduación presenta un análisis y al mismo tiempo una propuesta de mejora que se basa en prolongar la vida útil de lubricante en un motor de combustión interna con el fin de mejorar la eficiencia del motor y con ello de la planta.

El funcionamiento de todo motor requiere que todos sus mecanismos internos funcionen de forma eficiente y en conjunto, para ello se deben revisar los parámetros técnicos del equipo, estos pueden verse en la carta régimen, para definir que un equipo opera de forma correcta. El valor de estos parámetros debe mantenerse dentro de los rangos permitidos y así puedan operar de forma que no interfieran en la operación del equipo.

Los motores están compuestos de sistemas internos que deben operar de forma correcta para mantener en buenas condiciones la integridad, entre los más importantes se tiene un sistema de lubricación de motor, el cual tiene como objetivo distribuir el aceite en todas las partes móviles internas que entran en rodamiento continuo, uno de los principales problemas hoy en día es el uso correcto, elección y análisis de lubricante en los motores de combustión interna.

El estudio de detección de fallas en los equipos se centra muchas veces en el análisis correcto del lubricante utilizado, ya que, a partir de ello, se logran detectar fallas internas que pueden afectar de forma periódica el uso del equipo.

Para que un equipo mantenga su temperatura en condiciones adecuadas es importante que exista una buena lubricación interna, con esto también se contrarrestan los daños por fricción en los mecanismos de rodamiento.

Los motores reciben un mantenimiento cada cierto lapso de tiempo, uno de los mantenimientos que rige el tiempo de funcionamiento del equipo es el preventivo y su centro de control se basa en el tiempo de uso del lubricante, para alargar el tiempo de uso del lubricante y así mantener sus propiedades aditivas es necesario que exista un proceso eficiente de filtración del lubricante, ya que a partir de ello se logran eliminar sedimentos, agua e impurezas que puedan contaminar el aceite y así dañar los mecanismos internos.

Para aumentar el tiempo de trabajo del aceite y con ello del motor estacionario se realiza un análisis utilizando las herramientas de ingeniería industrial y mecánica, determinando una solución que conlleva la aplicación de un sistema de purificación de lubricante.

Con la implementación de un sistema de purificación de aceite SAE en un motor se mejoraría la eficiencia anual y con ello el de la compañía, se obtendrían mejores resultados financieros, evitando paros anuales del motor por reparaciones en temas de mantenimiento correctivo, con base a contaminantes en el lubricante y costos por cambio de aceite en lapsos muy cortos, eliminando cantidades altas de sedimentos según análisis en el lubricante como también disminución en los costos de mantenimiento, ya que mantendría en mejor estado los mecanismos internos del motor y prolongaría el uso del aceite como del motor estacionario.

OBJETIVOS

General

Diseñar y analizar los conceptos y componentes básicos de un sistema de purificación de lubricante para un motor General Electric de 3,5 MW.

Específicos

1. Aumentar el tiempo de vida útil de lubricante SAE en un motor General Electric.
2. Delimitar las características y componentes básicos de un sistema de purificación que opere de forma adecuada con un motor estacionario General Electric.
3. Disminuir la cantidad de sedimentos, agua y ppm de metales encontrados en las muestras de aceite obtenidas durante la operación de un motor General Electric.
4. Disminuir los costos anuales en cambio de aceite lubricante SAE de un motor General Electric.
5. Definir las características y rutas de mantenimientos aplicados a un sistema de purificación de aceite.

INTRODUCCIÓN

Perenco Guatemala Limited, campamento Xan, es una empresa que se dedica a la extracción de petróleo por medio de bombas electro sumergibles que son alimentadas por medio de energía eléctrica transferida desde el Departamento de Generación. La planta localizada en el municipio de San Andrés departamento de Petén, cuenta con departamentos específicos para el control y manejo de motores móviles ubicados en pozos petroleros y estacionarios en el Departamento de Generación, también cuenta con una planta de proceso para el manejo y tratamiento de crudo y de gas, posteriormente el producto se envía a la refinería.

Perenco Guatemala Limited cuenta con una planta generadora de energía eléctrica conocida en el campo como Power Plant, esta planta, a través de motores estacionarios de diferentes marcas produce energía mecánica que es transformada en energía eléctrica por medio del concepto de la conservación de la energía y la aplicación de la ley de Faraday, estos motores operan las 24 horas del día, su mantenimiento preventivo depende mucho de las propiedades del lubricante y el tiempo en que se mantiene en buenas condiciones.

El lubricante utilizado presenta ciertas características que son tomadas en cuenta para la toma de decisiones, como lo puede ser su viscosidad, TBN, nitración, entre otras, sin embargo, a través del análisis se ha observado que el aceite presenta una gran cantidad de ppm de metales en sus muestras y muchas de las fallas, según el historial, muestran que en los componentes internos estas partículas que circulan en el aceite se van adhiriendo, dañando la integridad mecánica de los mecanismos.

El actual trabajo de graduación se enfoca en la investigación de un sistema de purificación de aceite para un motor estacionario de la marca General Electric, con el fin de mantener el aceite lubricante en condiciones adecuadas que puedan incrementar su vida útil de operación, para reducir los costos por mantenimiento preventivo, logrando así aumentar la eficiencia del motor como de la empresa y con ello reducir la cantidad de aceite utilizado en el motor para beneficio del medio ambiente.

Utilizar un sistema de purificación de aceite mantiene en mejores condiciones las propiedades técnicas del lubricante y con ello reduce los movimientos operativos realizados para compensar su carga en los pozos petroleros.

1. ANTECEDENTES GENERALES

1.1. Descripción del giro de la empresa

“La filial de la compañía anglo-francesa de petróleo y gas Perenco PLC, compañía de exploración y producción petrolera con operaciones costa adentro y afuera en 13 países a lo largo del norte de Europa, Asia, África y América Latina (Colombia, Guatemala, Perú y Venezuela)”.¹

1.2. Inicios de la empresa en Guatemala

La compañía Perenco opera en el país desde 2001 produciendo crudo del campo Xan, en la región de Petén.

La firma con sede en ciudad de Guatemala opera la red nacional de infraestructura de ductos de 477 km interconectados a los campos de Xan y Rubelsanto con el terminal de Piedras Negras en la costa atlántica. Asimismo, la compañía opera una refinería que produce combustóleo para el uso de Xan y asfalto para el mercado Centroamericano de infraestructura vial.

1.3. Información general

A continuación, se presenta información importante acerca de la empresa Perenco Guatemala Limited.

¹ Perenco Guatemala Limited, campamento Xan. <https://www.perenco.com/subsidiaries/guatemala>. Consulta: 25 de abril de 2020.

1.3.1. Ubicación geográfica

Geográficamente la empresa Perenco Guatemala Limited se encuentra en el municipio de San Andrés, departamento de Petén. Con geolocalización en grados decimales en latitud 17,5392815 y longitud de -90,7771153 o bien en ángulo GMS de latitud 17°32'21.413" y longitud de 90°46'37,615".

1.3.2. Misión de la empresa

Producir de manera responsable el recurso petrolero de Guatemala en beneficio y armonía con los empleados, el Estado y el medio ambiente.²

1.3.3. Visión de la empresa

Nos comprometemos a ser una empresa que desarrolla sus operaciones y reservas, eficientemente sin derrames y accidentes.³

1.4. Tipo de organización

La empresa Perenco Guatemala Limited se define como una organización formal debido a la jerarquía para la toma de decisiones que establece en su política con normas, directrices y reglamentos de tipo organizacional que incluye los procedimientos y rutinas para llevar a cabo los objetivos que conllevan a la meta general de la empresa.

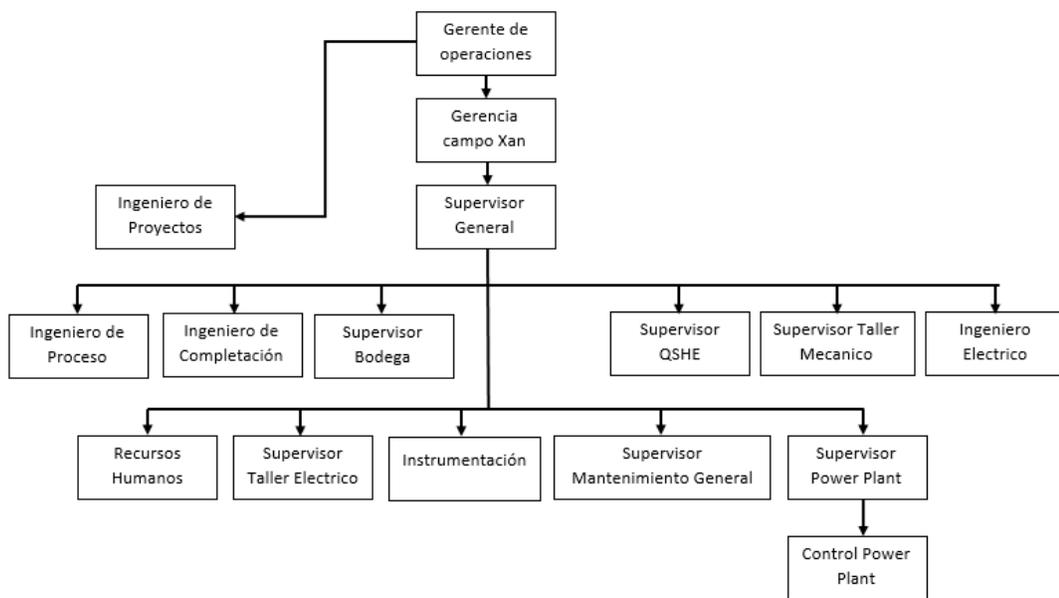
² Perenco Guatemala Limited, campamento Xan.
<https://www.perenco.com/subsidiaries/guatemala>. Consulta: 25 de abril de 2020.

³ *Ibíd.*

1.4.1. Organigrama de la empresa

A continuación, se presenta el organigrama de la empresa Perenco Guatemala Limited, campamento Xan.

Figura 1. Organigrama Perenco Guatemala Limited, campamento Xan



Fuente: elaboración propia, con información proporcionada de Perenco Guatemala Limited, campamento Xan.

1.5. Descripción del área de generación *Power Plant*

Es el departamento de la empresa que está encargado de la producción, distribución y control de la energía que generan los motores estacionarios ubicados en los diferentes puntos del área, dividido en área de generadores de batería A y batería B, área de sincronización o cuarto de control ETU, área de tanques de combustible, área de transformación y área de distribución o cuarto

13,8, supervisado constantemente por personal calificado que cumple con las normas de seguridad establecida por el departamento QSHE o seguridad industrial.

Es importante mencionar que el Departamento de Generación *Power Plant* es una zona restringida en la empresa, debido a los altos voltajes y procesos internos que se manejan para llevar a cabo la sincronización de los motores a la barra que distribuye la carga a los equipos ubicados en los pozos petroleros.

Figura 2. **Área de generación *Power Plant***



Fuente: elaboración propia, Perenco Guatemala Limited, campamento Xan, municipio de San Andrés, departamento de Petén.

1.5.1. Área de tanques de combustible

Se describe como el área que está contemplada para el almacenado del combustible utilizado en la empresa, está destinado para los motores que se encuentran en la *Power Plant*, generación, los cuales están constituidos por 3 tanques con una capacidad de 82 000 galones aproximadamente cada uno, que contienen por separado hidrocarburo tipo diésel purificado como es el tanque 2000-9, *fuel oil* #2 sin purificar contenido en el tanque 2000-7 y *fuel oil* #2 purificado en el tanque 2000-8, este combustible está destinado para dos clases de motores, los motores de la marca Hyundai que utilizan hidrocarburo tipo *fuel oil* #2 purificado y los motores General Electric que utilizan combustible tipo diésel, conectados por medio de tubería y bombas de alimentación que transfieren combustible y lo ingresan al proceso del motor para culminar en el proceso de combustión interna de estos equipos.

Figura 3. Área de tanques de combustible *Power Plant*



Fuente: elaboración propia, Perenco Guatemala Limited, campamento Xan, municipio de San Andrés, departamento de Petén.

1.5.2. Área de motores o generación

Se define como el área del Departamento de Generación que está destinado para los motores que producen carga y la distribuyen a las bombas electros sumergibles que extraen petróleo, estos motores están separados por el tipo de combustible que utilizan, el hidrocarburo puede ser gas, *fuel oil* o diésel *mix* dependiendo del motor que se desea alimentar. En este espacio se cuenta con motores de la marca Hyundai, Waukesha y General Electric que operan a diferente frecuencia y por ende generan diferente carga, controlados en el cuarto de control de la *Power Plant* por un controlador mecánico que se encarga de distribuir la energía a los diferentes pozos ubicados alrededor del campamento, las bombas utilizadas para inyectar agua ácida a los pozos y a todos los equipos que son necesarios en el proceso de extracción. El área de generación de la *Power Plant* es la parte más importante de la empresa debido a que es el centro de distribución de energía y a partir de aquí se genera la carga necesaria para distribuirla al campamento Xan Perenco.

Figura 4. **Área de motores *Power Plant***



Fuente: elaboración propia, Perenco Guatemala Limited, campamento Xan, municipio de San Andrés, departamento de Petén.

1.5.2.1. Motores General Electric de 3,5 MW

La compañía GE ha desarrollado el motor conocido como V250SDA, este tipo de motor para manejo en aplicaciones de energía estacionaria es utilizado en las instalaciones de Perenco Guatemala Limited, campamento Xan.

Su diseño y la calificación se basan en extensas pruebas de laboratorio respaldadas por millones de horas de experiencia de campo con muchos motores. Estos equipos trabajan con el proceso termodinámico conocido como ciclo diésel de cuatro tiempos, con un sistema de inyección electrónico que es controlado por computadora, conocido en campo como computadora de inyección electrónica de combustible, la cual tiene como objetivo controlar de forma electrónica la cantidad de combustible, por medio de bombas de inyección, necesaria para iniciar el proceso de combustión de forma eficiente bajo cargas variables.

El proceso inicia con el bombeo que realizan las bombas de refuerzo ubicadas externamente, que son accionadas mecánicamente, este inicia un recorrido pasando por filtros para disminuir la cantidad de impurezas que puede contener el hidrocarburo utilizado, diésel *mix* en el caso de los motores GE, hasta llegar a las bombas de inyección de combustible del motor, como todo proceso mecánico existe un porcentaje de combustible que no es utilizado en el proceso, el cual utiliza un sistema de retorno abierto por una válvula reguladora de presión.

Para operar de forma eficiente, el motor cuenta con diferentes sistemas de enfriamiento, los cuales están constituidos por un circuito de enfriamiento de baja y uno de alta. El circuito de enfriamiento de alta conocido como HT consiste en la refrigeración por medio de agua en la cubierta del motor, mientras que el circuito de enfriamiento de baja conocido en campo como LT utiliza

intercambiadores de temperatura, que su objetivo es enfriar el calor que pasa por el turbocompresor.

Los motores cuentan con un sistema de lubricación operado a través del motor por una bomba de lubricación, como todos los motores, accionada por medio de mecanismos tipo engranes, este sistema posee un enfriador de aceite que utiliza agua para su refrigeración con el fin de eliminar el calor que el lubricante acumula durante el recorrido por los pistones y otros rincones del motor, tiene varios tipos de filtros ubicados en diferentes partes del motor con el fin de mantener el lubricante en condiciones idóneas y poder alargar la vida útil de este.

Todos los parámetros de este tipo de motor son controlados por un sistema automatizado, panel de control; que monitorea y controla continuamente los parámetros esenciales del motor como puede ser: presión, temperatura, amperaje, frecuencia, entre otros. Todo esto con el fin de observar su comportamiento y poder proyectar de alguna forma los mantenimientos preventivos necesarios para evitar daños al equipo.

Figura 5. **Motor General Electric de 3,5 MW**



Fuente: elaboración propia, Perenco Guatemala Limited, campamento Xan, municipio de San Andrés, departamento de Petén.

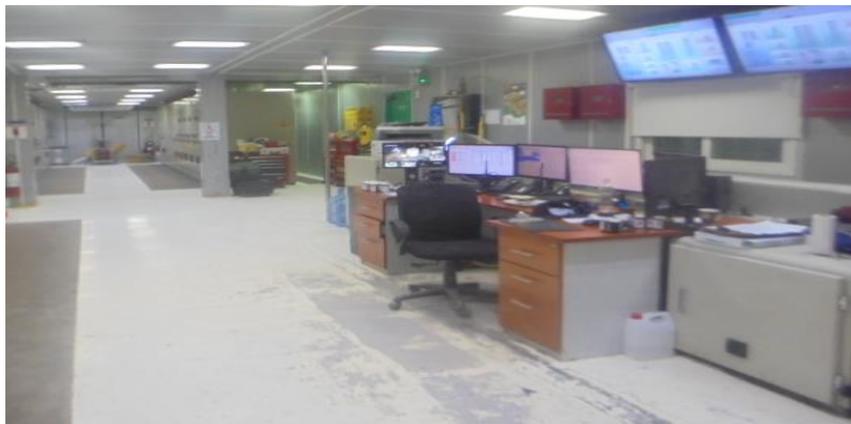
1.5.3. Cuarto de control *Power Plant*

Es la parte del Departamento de Generación la que se encarga de controlar parámetros internos determinados por indicadores; como lo son sensores en cuanto a presión, temperatura, voltaje, frecuencia, entre otros, de todos los motores estacionarios que generan carga para las bombas electro sumergibles que extraen petróleo. En esta área se realizan las actividades de sincronización de motores a la red por medio de paneles conectados directamente a los motores, operado por un controlador que se encarga de realizar los reportes, llevar control del mantenimiento y de las diferentes actividades que son de importancia para mantener en óptimas condiciones los motores y el buen funcionamiento de los equipos auxiliares en la *Power Plant*.

Este espacio es una de las partes más importantes de la empresa, debido a que en esta zona se lleva el control de la cantidad de energía suministrada a cada punto dentro y fuera del campamento Xan, como los pozos petroleros y de todos los equipos que utilizan energía eléctrica, teniendo el 90 % de la carga utilizada en toda la empresa.

Dentro de las actividades que se realizan tienen como objetivo primordial llevar un control e información en cuanto a manuales y estadísticas para analizar las fallas de los equipos por medio de tendencias presentadas en todos los análisis y reportes que se llevan a cabo durante las rutinas diarias, semanales y mensuales a los motores estacionarios, para poder observar las diferentes cualidades internas y comportamientos a través del tiempo, detectar puntos de fallas y aplicar los diferentes mantenimientos preventivos, correctivos y predictivos que logren mantener en buen funcionamiento todos los equipos de la empresa, evitando paros de motores y al mismo tiempo se realizan los reportes que se presentan con el objetivo de observar la eficiencia de cada uno de los equipos que se encuentran dentro de las instalaciones.

Figura 6. **Cuarto de control *Power Plant***



Fuente: elaboración propia, Perenco Guatemala Limited, campamento Xan, municipio de San Andrés, departamento de Petén.

1.5.4. Área de transformación

Se define como el área dentro de la *Power Plant* en donde están ubicados los transformadores que tienen como objetivo aumentar o elevar el voltaje generado por los motores estacionarios ubicados en la *Power Plant* hasta el valor que entregan los motores General Electric, es decir realizar la relación de transformación para que todos los motores puedan alimentar la barra principal ubicada en el cuarto de distribución y así distribuir de forma proporcional a toda la red eléctrica subterránea y llegar a los equipos electro sumergibles, bombas de inyección de agua ácida y servicios auxiliares.

Los transformadores ubicados en este sitio son de tipo ONAF, eso quiere decir que su circulación de aceite es de forma natural conocido como termosifón y su enfriamiento por aire de forma forzada utilizando ventiladores.

Figura 7. Área de transformación *Power Plant*



Fuente: elaboración propia, Perenco Guatemala Limited, campamento Xan, municipio de San Andrés, departamento de Petén.

1.5.5. Área de distribución 13,8 kV

Es la parte del Departamento de Generación que distribuye la carga producida por los motores de generación a las bombas electro sumergibles a un voltaje de 13 800 voltios, por lo que se puede definir como un circuito de distribución por ramales, es decir, que está constituido por conductores que parten de tableros de distribución, llamados en campo como Switchgear, hasta el punto de distribución, contenido entre esto la protección de balance de fase necesaria para mantener en condiciones adecuadas los circuitos eléctricos que responden ante parámetros eléctricos establecidos, como fallas eléctricas que pueden dañar al equipo mecánico. Es constituido por un cuarto llamado 13,8 kV debido a que su voltaje de barra es de 13 800 voltios, en el cual están constituidas las entradas de generación por motores y salidas de distribución de carga eléctrica.

Figura 8. **Cuarto de distribución 13,8 kV *Power Plant***



Fuente: elaboración propia, Perenco Guatemala Limited, campamento Xan, municipio de San Andrés, departamento de Petén.

2. MANTENIMIENTO ACTUAL Y DESCRIPCIÓN DEL LUBRICANTE UTILIZADO

2.1. Aceite lubricante

A continuación, se definen las principales funciones del aceite lubricante en los mecanismos del motor, así como sus diferentes tipos.

2.1.1. Definición y objetivo del lubricante

Se define como el medio de separación que se integra entre dos piezas mecánicas que están sometidas a movimientos, rozamientos o bien fricción entre estos mecanismos. Su objetivo principal es impedir el contacto directo y evitar el desgaste entre ellas. Muchas veces los lubricantes incluyen aditivos que componen del 15 % al 25 % de su total, que son definidas como sustancias activas que se añaden para mejorar las propiedades del lubricante, como pueden ser sus propiedades físicas, entre las que pueden mencionarse la disminución del punto de solidificación mejorando con ello el punto de viscosidad y temperatura, también existen los aditivos que tienen como fin la mejora de las propiedades químicas del producto, como pueden ser químicos que ayudan a prevenir la oxidación o la corrosión. Las funciones principales del lubricante pueden definirse como:

- Lubricar las partes móviles que entran en contacto para reducir el esfuerzo de corte entre ellas y reducir el desgaste que provoca este proceso.
- Reducir la pérdida de potencia debido al rozamiento.

- Absorber el calor en las diferentes partes del motor por donde circula, actuando como refrigerante del proceso, como lo puede ser en el proceso de combustión interna.
- Servir de cierre hermético entre segmentos que hay entre el pistón y las paredes de los cilindros.
- Limpieza del circuito de lubricación.

2.1.2. Tipos de aceite lubricante

Los aceites tienen diferentes clasificaciones, sin embargo, la mayoría de los proveedores y consumidores los catalogan por los dos más importantes que son: monogrado y multigrado, para elegir el uso técnico al cual será destinado dependiendo de características ambientales y propias del motor.

2.1.2.1. Monogrado

Es el tipo de lubricante que logra mantener su viscosidad en condiciones limitadas de temperatura ambiente, es decir, solo tiene un grado de viscosidad, teniendo en cuenta también la temperatura que el motor produce durante su arranque y proceso de combustión. Para ello existen diferentes características que demuestran este tipo de comportamiento con la temperatura, como lo son aquellos que en sus especificaciones técnicas señalan una letra *W* (*Winter*, que significa invierno) que indica tener un comportamiento aceptable a bajas temperaturas o bien en el momento de arranque, sin embargo, también se pueden encontrar aquellos que no contiene la letra *W* que son destinados para temperaturas de ambiente elevadas. Es importante mencionar que, antes de que

existieran los aceites multigrados, los motores utilizaban la gradación SAE de 0W a 25 W durante el invierno y en verano la gradación de SAE 20 a 60.

2.1.2.2. Multigrados

Este tipo de lubricante tiene como base un aceite de gradación SAE W, al cual se le agregan químicos, representados normalmente como mejoradores o aditivos, con el fin de mejorar su valor de viscosidad y su comportamiento en frío, si el motor llegara a aumentar la temperatura interna este lubricante funciona como un aceite de verano, es decir que a lo largo del tiempo y de temperaturas variables este pueda mantener constante su valor de viscosidad.

2.1.3. Propiedades técnicas del aceite lubricante

Se define como las características principales y esenciales que contiene el lubricante para trabajar bajo condiciones especiales de los motores, son de importancia para evitar los desgastes internos o mejorar condiciones internas entre mecanismos.

2.1.3.1. Viscosidad y tipos de viscosidad

Este parámetro es el más importante de las cualidades de los lubricantes debido a que consiste generalmente en la resistencia de fluir durante los esfuerzos cortantes que se presentan cuando el lubricante se encuentra entre ambas partes que quieren entrar en contacto, o bien puede definirse como la propiedad de un aceite lubricante que ofrece resistencia al movimiento relativo de las moléculas que lo componen, teniendo en cuenta que la energía pérdida de dos mecanismos que entran en fricción por su contacto directo debido a la viscosidad del lubricante.

Existen diferentes tipos de viscosidad, los cuales son:

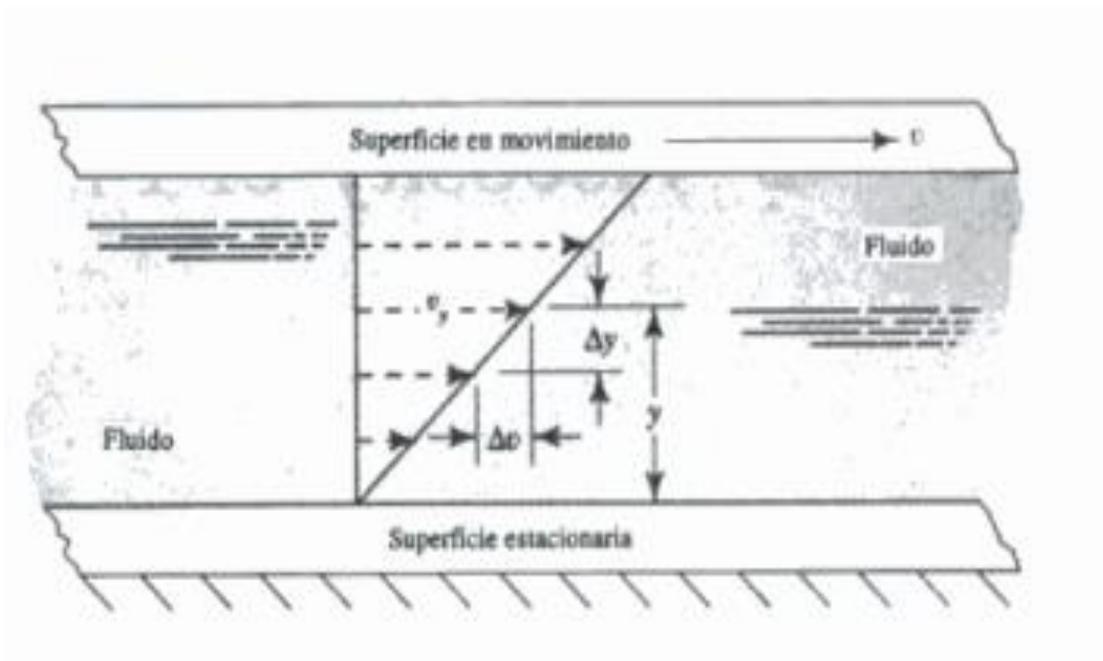
- Viscosidad dinámica

Representa el esfuerzo cortante frente a la deformación que presenta el material, matemáticamente considerado como la pendiente de la curva que representa este comportamiento, su unidad de medida es el centistokes la cual denotada significa cm^2/s .

- Viscosidad cinemática

La cual se define como la relación que existe entre la viscosidad dinámica con la densidad que posee el fluido utilizado, utilizando los centistokes (cst) como unidad de medida al igual que la viscosidad dinámica.

Figura 9. **Representación de viscosidad en un esfuerzo cortante aplicado en mecanismos**

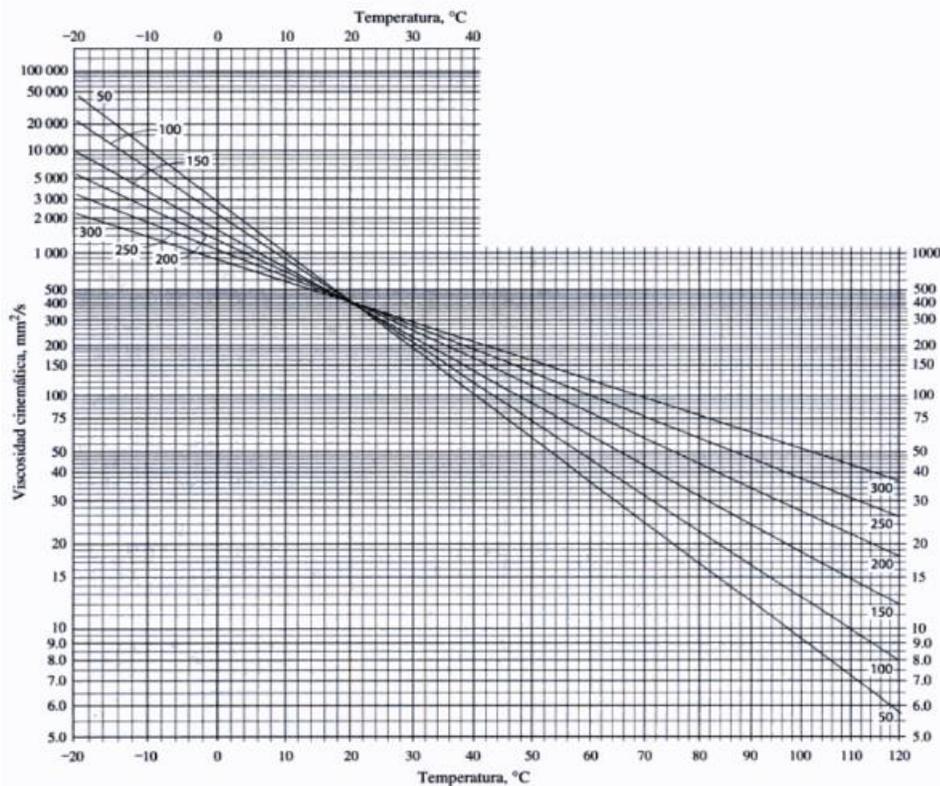


Fuente: MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos*. p. 85.

2.1.3.2. Índice de viscosidad

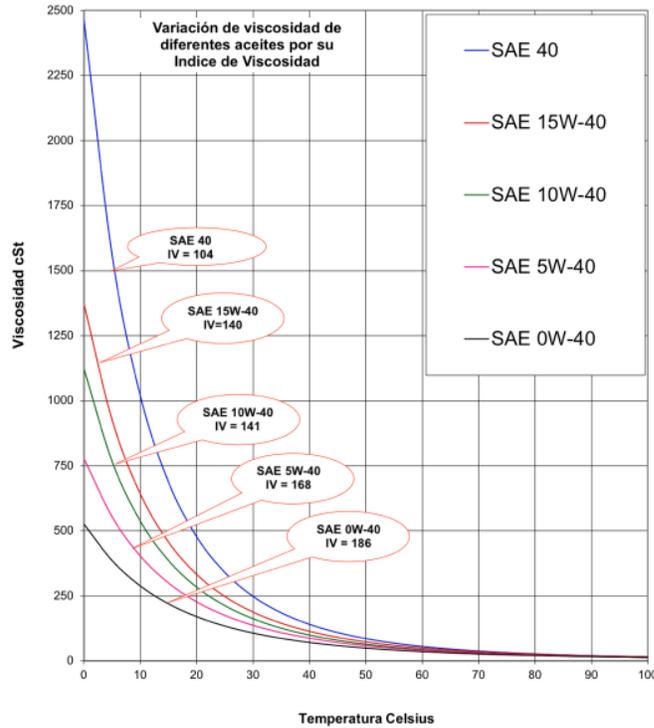
Es la representación de los cambios de la viscosidad con la temperatura, según estudios se determina que cuando el aceite está frío este es más espeso o denso y fluye más despacio que cuando está caliente, este índice es importante analizarlo cuando se trabaja con aceites lubricantes que deben operar bajo variaciones amplias de temperatura, este número empírico fue determinado a partir de las viscosidades cinemáticas a 40 °C y 100 °C, el cálculo llevado a cabo para determinar este parámetro se describe en la norma ASTM D 2270. Los científicos han desarrollado aditivos que ayudan a mejorar esta parte del lubricante para los arranques tanto en frío como en caliente.

Figura 10. Curva de índice de viscosidad comunes



Fuente: MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos*. p. 89.

Figura 11. **Variación de viscosidad de diferentes aceites por su índice de viscosidad**



Fuente: MALPA. *La importancia del índice de viscosidad (IV) de un aceite.*

www.malpa.mx/2019/08/25/la-importancia-del-indice-viscosidad-iv-aceite. Consulta: 10 de mayo de 2020.

2.1.3.3. Densidad

Es la propiedad característica de las sustancias de magnitud escalar referida a la cantidad de masa de cualquier sustancia u objeto sólido en un determinado volumen. Matemáticamente se conoce como el cociente de la masa (kg) entre el volumen (m^3).

La densidad de la mayoría de los aceites lubricantes varía entre los 700 a 950 (kg/m^3).

2.1.3.4. Temperatura de inflamación

Se define como la temperatura en la cual la evaporación del aceite lubricante origina una mezcla inflamable de vapores y aire, a causa de los procesos químicos-termodinámicos, esto debido a que el vapor del lubricante es inflamable. “Este parámetro es determinado según normas DIN, en el cual asegura que esta “niebla” de lubricante lograría inflamarse al contacto con una llama desnuda o abierta”.⁴ Este cálculo químico es importante para las empresas que almacenan el lubricante, ya que deben clasificar su riesgo según la NFPA 704 que explica el “diamante de materiales peligrosos”.⁵ Según los estudios de la norma DIN se encuentra el punto de inflamación por encima de los 100 °C.

2.1.3.5. Temperatura de escurrimiento

Por definición, se conoce como la temperatura a la cual el aceite aún fluiría, es decir en términos físicos, según pruebas, se localiza 3 °C arriba de la temperatura de congelación del lubricante, por eso, es de vital importancia valorar la temperatura ambiente y temperatura de trabajo del equipo donde se desea utilizar el lubricante antes de la elección del aceite. Este parámetro depende mucho de la viscosidad, debido a que de ello depende la fluidez dentro del motor.

⁴ LIBRARY. *Viscosímetro Saybolt*. <https://1library.co/article/viscos%C3%ADmetro-saybolt-clasificaci%C3%B3n-del-aceite-medio-par%C3%A1metros-determinados.zke7lp1z>. Consulta: 15 de mayo de 2020.

⁵ R. SPELLMAN, Frank. *Environmental Engineering Dictionary*. <https://books.google.com.gt/books?id=k-1DDwAAQBAJ&pg=PA426&dq=NFPA+704&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwj5i14sr4AhULTDABHRotBGgQ6AF6BAGHEAI#v=onepage&q=NFPA%20704&f=false>. Consulta: 15 de mayo de 2020.

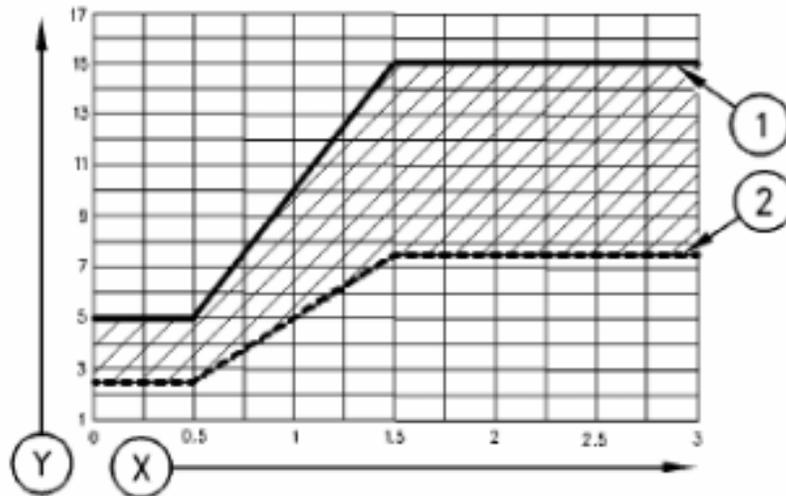
2.1.3.6. Índice de basicidad TBN

“Se conoce como la reserva alcalina o básica de los aceites lubricantes que sirven para neutralizar los ácidos que provienen del proceso de combustión realizado por el motor y al mismo tiempo de la oxidación procedente de las temperaturas contenidas dentro del motor”.⁶ Este parámetro es muy importante para los motores que trabajan con diésel, debido al porcentaje de azufre que este contiene y durante la combustión desprenden el ácido sulfúrico (H_2SO_4) formado por el gasóleo y puede dañar las paredes del motor, por tal razón, entre más porcentaje de azufre contiene el hidrocarburo utilizado debe ser mucho mayor el TBN que se necesita dentro del lubricante para evitar daños íntegros al motor y así maximizar la vida útil del aceite y alargar el mantenimiento.

En la figura 12 se puede observar la relación entre el porcentaje de azufre y el valor del TBN que debe contener el lubricante a utilizar.

⁶ TORMOS, Bernardo. *Diesel mediante el análisis del aceite usado*. https://books.google.com.gt/books?id=DqJuqL_UzjkC&pg=PA153&dq=que+es+tnb&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwje8o_548r4AhXMZDABHa2iCEYQ6AF6BAgFEAI#v=onepage&q=que%20es%20tnb&f=false. Consulta: 20 de mayo de 2020.

Figura 12. **TBN según porcentaje de azufre en motores de combustión interna**



Fuente: Manual Caterpillar, 1998. p.3.

2.2. Aceite lubricante utilizado PUMA 30 SAE 40

El aceite lubricante Puma 30 API CF (serie III) es un aceite de motor destinado a utilizarse en motores de cuatro tiempo que funcionan con un hidrocarburo que contiene alto contenido de azufre,⁷ para lo cual es necesario contar con un alto grado de TBN, también es importante mencionar que este tipo de lubricante fue diseñado para los motores que frecuentan bajas temperaturas en el área del revestimiento del pistón, este aceite es utilizado en los motores General Electric de 3,5MW ubicados en las instalaciones de Perenco, campamento Xan. El grado de viscosidad del aceite lubricante Puma 30 es de 40, por tal razón en las especificaciones es mencionado como aceite puma 30 SAE40.

⁷ VALENZUELA MUÑOZ, Víctor Gustavo. *Optimización del sistema de separación centrífuga entre separadoras de marcas Alfa Laval y Westfalia utilizadas en la purificación del aceite lubricante*. <https://cupdf.com/document/universidad-de-san-carlos-de-guatemala-escuela-de-5-sedimentacion-en-el.html?page=16>. Consulta: 30 de mayo de 2020.

A continuación, se presentan las propiedades técnicas del producto, las cuales fueron aportadas por el proveedor.

Tabla I. **Propiedades específicas del aceite PUMA 30 SAE40**

Propiedad	Temperatura	Unidades	Normas	SAE-40
Grado de viscosidad				40
Viscosidad Cinemática	40° C	Cst	ASTM-D445	160
Viscosidad Cinemática	100° C	Cst	ASTM-D445	15,7
Índice de viscosidad			ASTM-D4292	100
Densidad	15° C	kg/m ³	ASTM-D4052	0,92
TBN		mgKOH/g	ASTM-D2896	30

Fuente: PUMA LUBRICANTS. *Puma Marine TBN 30 SAE 40*.

<https://pumaenergypng.datasheetdownloads.com/type/lubricants>. Consulta: 25 de mayo de 2020.

2.3. **Análisis del desempeño del lubricante**

Actualmente se lleva un control de la vida útil del lubricante en el cuarto de control de la *Power Plant*, en donde se llevan a cabo observaciones directas y toma de parámetros para verificar y comparar los valores presentados con los valores proyectados y al mismo tiempo con la carta régimen presentada por el proveedor del equipo, todo esto con el fin de proyectar los mantenimientos y observar la vida útil del lubricante, esto mediante estudios internos y de tercerización a cargo de una empresa externa a la que se les mandan las muestras en lapsos determinados y se encarga de mandar los resultados para llevar el control de su funcionalidad interna y estado mecánico en el proceso de combustión interna.

2.3.1. Muestreo utilizado actualmente

Para este proceso es llevado a cabo una serie de pasos que son:

- Se toma una muestra del aceite cada cierto lapso de tiempo a los motores General Electric.
- Se determina su viscosidad por medio de un análisis interno para garantizar su funcionalidad, comparado en un recorrido con un aceite que no ha sido utilizado.
- Por medio de un equipo especializado se determina el valor del TBN para llevar un control interno y garantizar su reserva alcalina.
- Se envía la muestra a una empresa externa que realiza pruebas químicas y especializadas.
- Se reciben las muestras y a partir de esto se comparan con las internas.

Se ingresa el registro recibido para observar las tendencias de los parámetros importantes y determinantes para mantener en condiciones adecuadas los motores.

2.3.2. Parámetros de medida en el análisis

Son las características importantes para observar las tendencias presentadas en un lapso de tiempo, que son de importancia para tomar decisiones con respecto al mantenimiento preventivo aplicado a los motores, las cuales son:

- Presión de línea Diésel *Mix*
- Presión de aceite
- Admisión de aceite
- TBN
- Horómetro
- Viscosidad
- Nitración
- Oxidación

Metales de desgaste como: el hierro, cromo, níquel, aluminio, cobre, plomo y estaño.

2.3.3. Registro e historia estadístico de las muestras

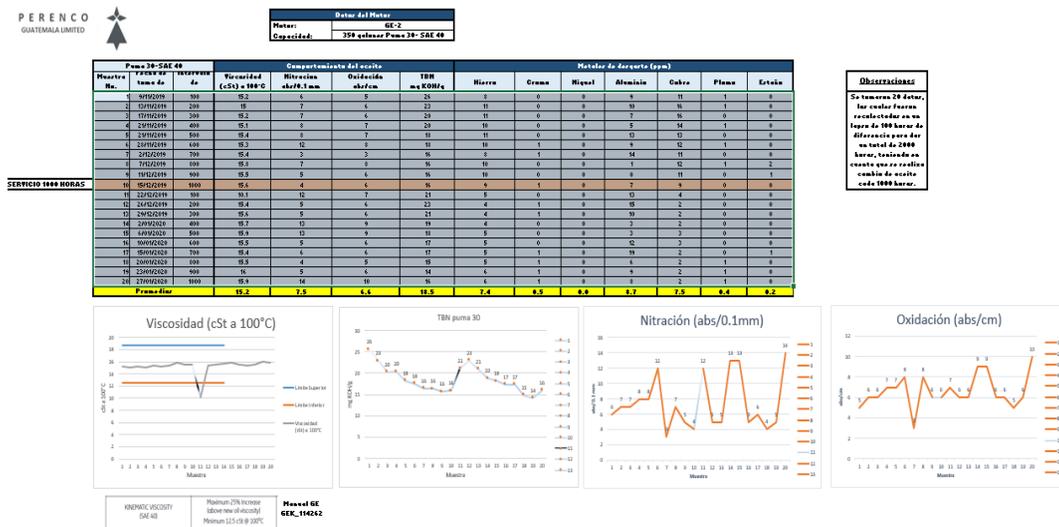
Este registro es llevado a cabo por el operador del cuarto de control en cada lapso de tiempo, es de vital importancia ya que a través de este se realizan los estudios y análisis del estado interno del motor y del lubricante para realizar los mantenimientos preventivos y evitar los mantenimientos correctivos, es importante mencionar que estos motores representan el 35 % de la carga de la empresa y tienen el 70 % de los pozos petroleros en su red, por lo que son estudiados con mucha frecuencia durante los turnos de trabajo.

Figura 13. Muestras enviadas para análisis a empresa externa



Fuente: elaboración propia, bodega Perenco Guatemala Limited, campamento Xan, municipio de San Andrés, departamento de Petén.

Figura 14. Registro de parámetros internos Power Plant



Fuente: Perenco Guatemala Limited, campamento Xan, municipio de San Andrés, departamento de Petén.

2.4. Mantenimiento preventivo de 750 horas y 1 000 horas

El mantenimiento preventivo realizado a equipos de esta índole se basa directamente en una ruta crítica definida por el proveedor, esta serie de actividades conlleva cierto criterio de análisis técnico para evaluar fallas que pueden afectar a largo plazo el funcionamiento del equipo.

2.4.1. Descripción del mantenimiento

El mantenimiento preventivo se define como las actividades programadas que se realizan al equipo para evitar fallas mecánicas y mantener las condiciones adecuadas de los motores, estos son realizados de 750 horas y 1 000 horas de trabajo del motor, conlleva una serie de actividades en las cuales se pueden tardar de 10 a 24 horas, dependiendo de los hallazgos en los estudios realizados, según muestras tomadas en el registro y evidencias que podrían presentar actividades que mejoren la integridad de estos o bien que los estudios hayan encontrado partes de metal, y por lo tanto, es indispensable alargar estos para evitar paros no programados.

Estos mantenimientos son los más importantes del motor debido a que según registros presentados a lo largo del tiempo representa el uso máximo de la vida útil del lubricante, por lo que puede realizar sus funciones de lubricación, y lo más importante, el tiempo máximo que puede soportar el valor de TBN, según manual presentado, el TBN puede reducirse hasta el 50 % de su valor inicial para mantener el equipo en buenas condiciones operando y evitar desgastes internos entre mecanismos que pueden dañar todo el sistema de enfriamiento, inyección de combustible, aire de carga, entre otros. Para conservar el valor de su viscosidad a las altas temperaturas que mantiene el motor.

2.4.2. Actividades del mantenimiento

En la tabla II se detallan las actividades de mantenimiento para 750 horas y 1 000 horas.

Tabla II. **Actividades llevadas a cabo en el mantenimiento de 750 horas y 1 000 horas**

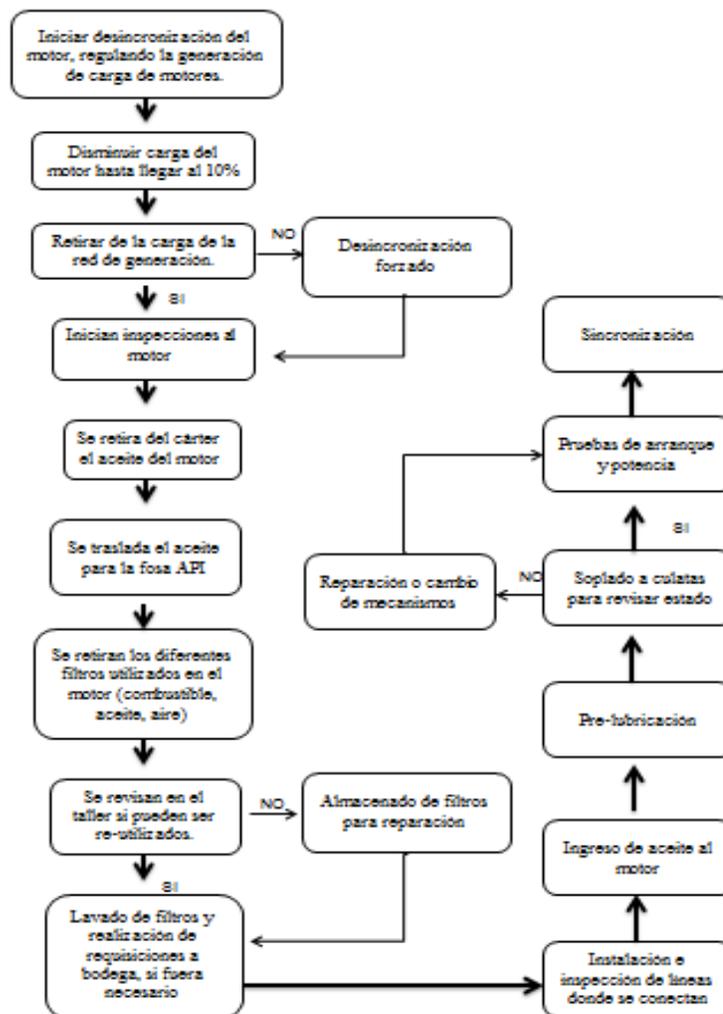
Mantenimiento de 750 horas		
Cambio de aceite	Muestreo de aceite previo al cambio para análisis en laboratorio.	GEK_114275 GEK_114262
Limpieza de filtros de aceite	Limpieza de filtros de aceite, limpieza de vasija y filtro Strainer principal	GEK_114275
Revisión filtros de aire	Verificar estado de filtros, reemplazar	GEK_114275
Limpieza de filtro Coalescente	Desmontaje de filtro coalescente, limpieza de base y filtro; asegurarse que se encuentre completamente seco antes de su instalación.	
Mantenimiento filtros dúplex	Desmontaje y limpieza de filtros Strainer, verificar estado de orines	
Cambio de filtros de sistema combustible	Verificar fecha y comportamiento de presión de combustible; reemplazar de ser necesario filtros de vasija (HHI), filtros Parker y Racor (dependiendo operación)	
Revisión de borneras panel eléctrico	Revisión de apriete de tornillería en borneras de paneles eléctricos, trabajos a realizar por electricista	
Limpieza de generador	Limpieza general de generador	

Fuente: elaboración propia.

2.4.3. Diagrama de flujo

Representa las acciones llevadas a cabo en la operación de mantenimiento de 750 horas a 1 000 horas y las posibles acciones si se presentara algún inconveniente.

Figura 17. Diagrama de flujo en mantenimiento preventivo de 750 horas y 1 000 horas de motores GE

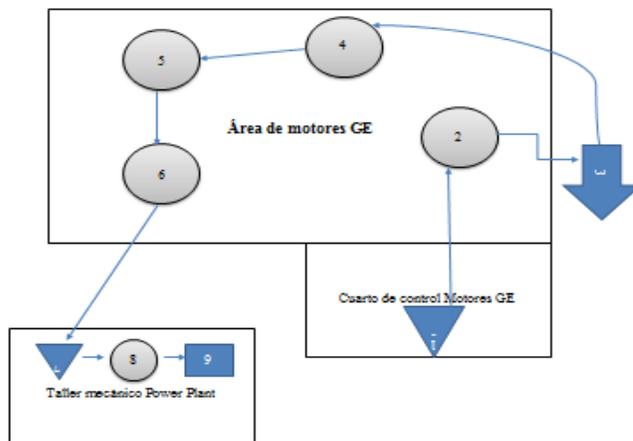


Fuente: elaboración propia, empleando Word.

2.4.4. Diagrama de recorrido

Representa el recorrido de los mecánicos durante el mantenimiento de 750 horas a 1 000 horas de los motores GE.

Figura 18. **Diagrama de recorrido en mantenimiento preventivo de 750 horas y 1 000 horas de motores GE**



Fuente: elaboración propia, empleando Word.

Tabla III. **Descripción del diagrama de recorrido en mantenimiento de 750 horas y 1 000 horas a motores GE**

Número	Símbolo	Descripción
1	Inspección	Se inspeccionan los parámetros del motor para poder retirarlo de la red sin ningún problema.
2	Operación	Se retira de operación y se ingresa manguera de extracción de aceite.
3	Transporte	Se retira por medio de cisterna el aceite que se sacó del motor.
4	Operación	Se desmontan los filtros de aceite.
5	Operación	Se desmontan los filtros de diésel.
6	Operación	Se desmontan los filtros de aire.
7	Inspección	Se inspeccionan los filtros de aire, combustible y aceite, para analizar si pueden ser reutilizados.
8	Operación	Se limpian los filtros que se pueden reutilizar.
9	Almacenado	Los filtros que no son re-utilizados son almacenados para su reconstrucción.

Fuente: elaboración propia.

2.5. Costo anual por mantenimiento

Este costo se divide en la mano de obra, es decir, los mecánicos que llevan a cabo los trabajos del mantenimiento y los repuestos utilizados en el proceso del mantenimiento de 750 horas y 1 000 horas de los motores GE.

2.5.1. Costo de mano de obra

En la tabla IV se detalla el costo de la mano de obra para el mantenimiento de las 750 horas y 1 000 horas.

Tabla IV. **Costo de mano de obra en mantenimiento para las 750 horas y 1 000 horas de los motores GE**

MANTENIMIENTO DE 750K HORAS GE				
Actividad	Cantidad	Salario por hora (USD)	Horas de	Costo total
Mecanicos	4	7	24.00	672
			Costo por mantenimiento	\$672.00
			Costo anual (7 veces al año)	\$4,704.00

Fuente: Departamento de Contabilidad, Perenco Guatemala Limited, campamento Xan, municipio de San Andrés, departamento de Petén.

2.5.2. Costo de repuestos y materiales

A continuación, en la tabla V se detalla el costo de los repuestos utilizados en el mantenimiento preventivo de 750 horas y 1 000 horas de los motores GE.

Tabla V. Costo de repuestos utilizados en el mantenimiento de 750 horas y 1 000 horas de los motores GE

MANTENIMIENTO DE 750K HORAS GE				
Actividad	Cantidad	Repuesto	Costo unidad USD	Costo total USD
Cambio de aceite	6	Aceite Puma 30	364.00	2184
Cambio de filtros de aceite (candelas)	78	Eng Lub Oil Filter Elemt	172.00	172
Cambio de filtros de aire (bolsas de fibra de vidrio)	6	AIR FILTER ELEMENT3 84A204576P2	117.59	705.54
Cambio de difusores	8	AIR FILTER, PRE FILTER 41E901373G2	67.83	542.64
Limpieza de filtro coalescente				0
Limpieza de filtro duplex de combustible. (eléctrico y				0
Revisión y limpieza de vasijas de sistema de filtración de combustible	3	WATER SEP FUEL FILTER KIT	312.00	936
	3	FILTER ELEM. RACOR 2020PMOR 30	16.43	49.29
	3	Filtros Hyundai reconstruidos		0
Engrase de cojinetes del generador.	1	Grasa Mobil unirex	24.00	24
			Costo por mantenimiento	\$4,613.47
			Costo anual (7 veces al año)	\$32,294.29

Fuente: Bodega Perenco Guatemala Limited, campamento Xan, municipio de San Andrés, departamento de Petén.

3. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE PURIFICACIÓN DE LUBRICANTE SAE PARA MOTORES GENERAL ELECTRIC DE 3,5MW

3.1. Propiedades técnicas y equipo auxiliar del sistema de purificación de lubricante SAE

Se refiere a los equipos auxiliares necesarios que forman un sistema de purificación y con ello los parámetros técnicos que estos deben cumplir para un buen funcionamiento. Estos principios técnicos, equipos auxiliares y sistemas deben cumplir con características que puedan conjuntamente crear un sistema de purificación ideal que se acople a los motores General Electric de 3,5MW.

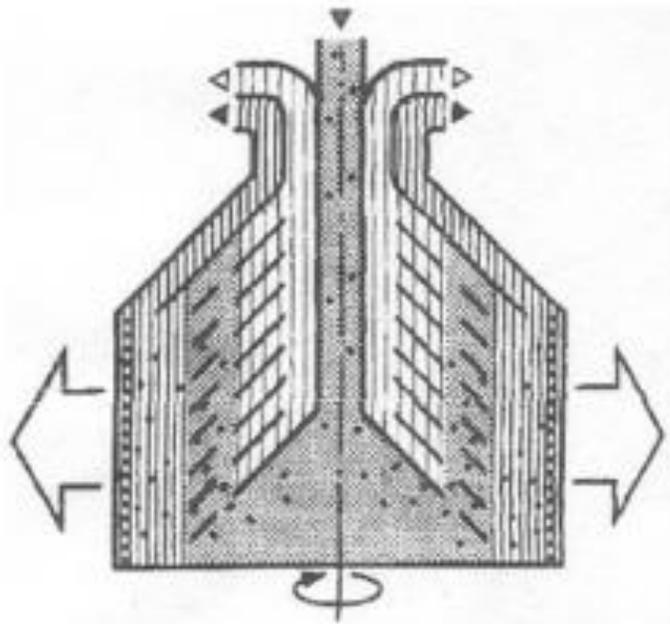
3.1.1. Principio de sedimentación

Existen procesos técnicos que tienen como objetivo la separación de partículas sólidas entre un medio líquido, es decir sólido-líquido, la cual se basa en la retención de partículas en un medio filtrante, a este proceso se le denomina filtración, en dicho proceso no es necesario que exista una diferencia entre densidades del líquido y sólido, por lo tanto es un proceso simple, sin embargo, cuando se trata de una separación líquido-líquido o bien líquido-líquido-sólido, como puede ser el caso de un sistema de purificación de aceite, solamente puede basarse en la diferencia que existe entre densidades, con ello el sólido presente, a este proceso de separación se denomina sedimentación, este proceso utiliza la fuerza centrífuga para la separación de las fases, simplemente con ello acelerar el proceso de decantación, sustituyendo la fuerza que produce la

gravedad con la fuerza que experimentaría el sistema expuesto a una fuerza centrífuga.

La sedimentación es utilizada en diferentes procesos dentro de la industria, tal como puede ser durante procesos médicos o mecánicos. Dentro de los procesos mecánicos más importantes se puede mencionar el utilizado en un sistema de purificación de aceite. Un sistema purificador de aceite utiliza el principio de sedimentación centrífuga, en los sistemas de purificación que utiliza discos de gravedad para su funcionamiento, este proceso se define como la rotación de una muestra por medio de fuerza centrífuga, con el fin de acelerar la sedimentación de sus fases.

Figura 19. **Principio de sedimentación en el *bowl* de la purificadora**



Fuente: Centrifuga ALFA LAVAL. *Principios básicos de separación.*

<https://es.scribd.com/document/436534811/Centrifuga-ALFA-LAVAL-pdf>.

Consulta: 30 de abril de 2020. p. 6.

3.1.2. Interfaz y discos de gravedad

En las industrias, la utilización de discos de gravedad (diafragmas o anillos separadores) en un sistema de purificación es común y muy eficiente, debido a que ajustado al movimiento centrífugo que provoca el rotor dentro del tazón, *bowl* o bien conocido como bol, los discos posicionados en forma de cono truncado separados a una distancia entre ellos, generan un aumento de área, con uno o más agujeros coincidentes, los cuales forman vías por donde fluye la corriente de alimentación, creando canales que mejoran la eficiencia en el proceso de retención de sólidos.

La localización de la interfaz se fija solamente en un sistema que utilice discos de gravedad para su funcionamiento, estos de diferentes diámetros colocados en la fase de la descarga de la fase pesada, en este caso en la descarga del agua separada, con el fin de aumentar o disminuir el radio de dicha descarga, logrando retener más volumen de una fase líquida u otra en el rotor.

Figura 20. **Discos de gravedad**



Fuente: elaboración propia, purificadora de aceite, Perenco Guatemala Limited, campamento Xan, municipio de San Andrés, departamento de Petén.

3.1.3. Análisis técnico ingeniería

La posición de los discos de gravedad es importante para que la retención de sólidos sea eficiente, debido a que colocados horizontalmente pueden obstruirse los canales con el sedimento, lo cual, para prever este inconveniente, se colocan las placas de forma inclinada, para que el sedimento deslice sobre ellas debido al efecto que provoca la gravedad y se colecten en el fondo del sedimentador. No obstante, es importante destacar que la distancia de separación entre discos de gravedad debe ser mayor al diámetro de la partícula a separar, que serviría de muestra para el cálculo de estos.

3.1.4. Panel de control

El panel de control representado por una pantalla táctil que puede definirse como el centro de control de instrumentos utilizados para el control de seguridad, maniobra, protección, señalización y distribución en una red eléctrica que conjuntamente forman una instalación eléctrica, descrito en abreviaturas HMI (Human Machine Interfaz) la cual, como su nombre lo explica, es el medio de interfaz entre la máquina y el humano, por lo que en un conjunto de equipos mecánicos este sistema es utilizado para el control de sus componentes o mecanismos, y con ello de su funcionamiento.

En el panel de control se puede observar los parámetros técnicos con los que trabaja la purificadora, con ello se puede modificar el proceso interno de la misma, como lo pueden ser los tiempos de lavado, los cuales son activados por electroválvulas que se encargan de permitir o restringir el paso de agua, también se controla el calentamiento del aceite, este es controlado por un PLC (controlador lógico programable) desde el panel de control.

Figura 21. **Panel de control de purificadoras de aceite**



Fuente: elaboración propia, purificadora de aceite, Perenco Guatemala Limited, campamento Xan, municipio de San Andrés, departamento de Petén.

3.1.5. Parámetros eléctricos

Los parámetros eléctricos serán definidos por medio del sistema de potencia del motor eléctrico y los equipos auxiliares que serán utilizados para el funcionamiento completo del sistema, como lo son: bombas del sistema de lodos, bombas del sistema de agua y compresor de aire, las cuales conjuntamente forman los componentes que serán controlados y visualizados por el panel de

control, para este caso en particular es necesario utilizar un motor eléctrico con las siguientes características técnicas:

Tabla VI. **Características eléctricas del motor eléctrico del sistema de purificación de aceite**

Parámetro eléctrico	Magnitud
Voltaje	480 V
Frecuencia	60 Hz
Fases	3
Grado de protección	IP55
Revoluciones	1770 RMP

Fuente: elaboración propia.

3.1.6. Bombas de sistema de lodos

Se refiere a la bomba centrífuga que será de utilidad para transportar el flujo de sedimentos, agua y contaminación que fue retirado del aceite durante el proceso de purificación.

3.1.6.1. Análisis de costo de instalación, como propiedades eléctrico-mecánicas y técnicas

Para su debida instalación es importante tomar en cuenta los parámetros mecánicos y eléctricos que generan su funcionamiento, es decir, las características necesarias para iniciar su funcionamiento, teniendo como principal parámetro el volumen dentro del depósito de lodos y sedimentos, el cual a una medida específica manda una señal al panel de control mediante un sensor de nivel alto, para iniciar el proceso de succión de lodos y así enviarlos hacia la fosa de desechos el sistema de succión se detiene automáticamente por medio

de un sensor de volumen bajo. El costo de la instalación y los accesorios se basan directamente en el volumen que contiene el depósito, los sensores instalados y en general la capacidad de la bomba incluyendo el motor.

Esta bomba debe cumplir con requerimientos técnicos para operar de forma eficiente, estas características mecánicas y eléctricas son:

Tabla VII. **Características técnicas de bomba del sistema de lodos de un sistema de purificación de aceite**

Tipo	<i>Mono-screw Type</i>
Líquido por tratar	Agua, lodo y aceite
Flujo	1 000 L/h
Motor	480V, 60Hz, 3 Fases

Fuente: elaboración propia.

3.1.7. Bombas del sistema de agua

Es el encargado de suministrar el agua requerida para hermetizar el tazón de *bowl*, es decir elevar el tazón internamente con el fin de sellar e iniciar el proceso necesario para el lavado del tazón o bien el proceso interno de purificación de aceite.

3.1.7.1. Análisis mecánico

En situaciones, las bombas tienen un desgaste mecánico, obtenido en el análisis de las partículas sólidas, algunos de los elementos en la muestra pueden ser: sodio, azufre y magnesio, quedándose impregnados, agregándose el silicio que se encuentra en la tierra o el polvo, son contaminantes sólidos, que puede ocurrir por mal montaje de la bomba o daños que conlleva el uso sin un control de mantenimiento puntual. Estos pueden provenir de los rodamientos y ejes que pueden estar en mala posición o desalineado por la vibración que provoca el proceso.

3.1.8. Sistema de tubería de agua

Se debe realizar un diagrama de recorrido y con el desglose de todo el sistema de tuberías registrándolo en tablas para los diferentes diámetros con los que cuenta el sistema de tuberías de agua.

Esto se puede realizar con un programa de Excel, debido a su forma práctica y sencilla de trabajar con tablas y cálculos para tener un registro de toda la información necesaria para calcular las pérdidas del sistema (área de tubería, caudal, velocidad, factor de fricción, diámetro interno y todos los accesorios).

3.1.8.1. Características técnicas

El sistema es cerrado, por lo tanto, las cargas de altura son iguales y se cancelan, se puede aplicar la ecuación general de la energía.

$$h_A = h_L + \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}$$

Realizado el despeje y h_A que significa la energía que le agrega al fluido mediante un equipo mecánico (en caso de una bomba; considerando que las velocidades de ingreso como de retorno son iguales para tuberías del mismo diámetro. se simplifica la ecuación:

$$h_A = h_L + \frac{P_2 - P_1}{\gamma}$$

3.1.8.2. Análisis de costo de instalación

El análisis de costo se basa directamente en las tablas normalizadas para tuberías de PVC según la presión necesaria y distancia, ya que de ahí se puede realizar un estudio concreto del costo total.

Figura 22. **Tabla de diámetros normalizados para tuberías de PVC**

DIÁMETROS NORMALIZADOS (NOMINAL E INTERIOR) PARA TUBERÍAS DE PVC				
DN (mm)	DI (mm)			
	4 atm	6 atm	10 atm	16 atm
16	-	-	-	13,6
20	-	17,5	-	17
25	22,6	22,6	22	21,2
32	29,6	29,2	28,4	27,2
40	37,2	36,4	36	34
50	47,2	46,4	45,2	42,6
63	59,4	59,2	57	53,6
75	71,4	70,6	67,8	63,8
90	86,4	84,6	81,4	76,6
110	105,6	103,6	99,4	93,6
125	120	117,6	113	106,4
140	134,4	131,8	126,6	119,2
160	153,6	150,6	144,6	136,2
180	172,8	169,4	162,8	153,2
200	192	188,2	180,8	170,4
225	216	211,8	203,4	191,4
250	240,2	235,4	226,2	213
280	269	263,6	253,2	238,4
315	302,6	296,6	285	268,2
355	341	334,2	321,2	302,4
400	384,2	376,6	361,8	340,6
450	432,4	423,8	407	383,2
500	480,4	470,8	452,2	425,8

Fuente: AGROLOGICA. *Tabla diámetros normalizados (interior y exterior) para tuberías de PVC.* <http://blog.agrologica.es/tabla-diametros-normalizados-interior-y-exterior-para-tuberias-de-pvc-segun-la-presion-riego/>. Consulta: 3 de abril de 2021.

Los diámetros nominales de las tuberías, es la distancia en línea recta medida entre dos puntos extremos, la cual pasa por el centro de una tubería, su diámetro exterior.

3.1.9. Compresor de aire

Considerando la ecuación de los gases ideales ($PV=nRT$), se deduce que si se aumenta la presión de un gas en mayor proporción a la que disminuye su volumen, como ocurre en la cámara de un compresor de aire, la temperatura de ese gas aumenta. Se utilizan las leyes de: Boyle-Mariotte; Gay-Lussac; Charles.

Por eso, a la salida de un compresor el aire está más caliente. La capacidad del aire para contener agua depende de la temperatura, aumentando cuando esta aumenta. Así, cuando un aire se enfría su capacidad para retener la humedad se hace menor produciéndose condensaciones de agua.

Estas máquinas aspiran el aire ambiente (presión atmosférica), comprimiendo hasta lograr que la presión necesaria de consumo o de algún uso sea la necesaria para lo que se destine. Existen dos divisiones de compresores de aire, los cuales son: desplazamiento positivo y los dinámicos o turbocompresores.

3.1.9.1. Cálculos físico-mecánicos

Para el cálculo del Volumen (V) del depósito de acumulación se emplea la siguiente expresión:

$$t = \frac{V \cdot (P1 - P2)}{C \cdot Patm}$$

Siendo t el tiempo (min) que transcurre entre arranques consecutivos del compresor, es decir, que pasa de la presión máxima (P1) a la mínima (P2) y C el consumo de aire en condiciones normales de la instalación.

3.1.9.2. Análisis de costo de instalación

Para el análisis de costo es importante el estudio de propuestas que puedan acoplarse de forma eficiente al sistema, para este en particular, puede utilizarse un compresor con capacidad de 2,5-5 MMSCFD por lo que a partir de ello se puede analizar el costo de ambos como máximo y mínimo.

Un compresor reciprocante con capacidad de 2,5 MMSCFD tiene:

Tabla VIII. Análisis de costo de un compresor de aire de 2,5 MMSCFD

Accesorios	Material (USD)	Mano de obra (USD)	Horas hombre
Equipo	68 200	10 692	347
Tubería	18 899	8 679	288
Instrumentación	16 360	4 175	137
Aislamiento	2 097	2 583	113
Pintura	507	1 135	50
Subtotal	106 063	27 264	1 314

Fuente: elaboración propia.

Un compresor reciprocante de 5 MMSCFD tiene:

Tabla IX. **Análisis de costo de un compresor de aire de 5 MMSCFD**

Accesorios	Material (USD)	Mano de obra (USD)	Horas hombre
Equipo	50 000	5 216	493
Tubería	21 950	411	312
Instrumentación	12 000	4 175	137
Aislamiento	2 873	2 795	122
Pintura	552	1 246	55
Subtotal	87 375	13 843	1 609

Fuente: elaboración propia.

El inconveniente de la tecnología de compresores de tornillo son los múltiples problemas de mantenimiento. El gas húmedo afecta significativamente su operación.

3.1.10. Sistema de tubería de aire

A continuación, se describen las características técnicas y criterios importantes del sistema de tubería de aire.

3.1.10.1. Características técnicas del material

- De acuerdo con la construcción de las instalaciones, trazar la red de acuerdo al mejor esquema para la tubería principal.

- Procurar que las conducciones sean rectas, eligiendo las distancias cortas.
- Puede que las tuberías sean montadas de forma aérea para mejor inspección y mantenimiento.
- Las sujeciones pueden realizarse de forma que permitan variación de longitud cuando se produzcan cambios de temperatura, evitando las deformaciones ni tensiones.
- Se deben instalar purgadores al final de cada tramo, para recoger el agua condensada.
- Las tuberías de servicio no deben de realizarse en la parte inferior de la tubería, deben ser realizadas en la parte superior, para evitar que el agua condensada que circula por la gravedad en la tubería y llevarla a los distintos equipos neumáticos.
- Es recomendable que la pérdida de presión hasta el punto de que no sobrepase un máximo permitido.
- Tuberías utilizadas de acero, por medio roscado, utilizando estopa para mejorar el aislamiento.

3.1.10.2. Análisis de costo de instalación

Se debe conocer el consumo real de la instalación, añadir un 25 % por ampliaciones, pérdidas.

$$Q = \text{Consumo} * (\text{pérdidas en porcentaje}) = X \frac{\text{N.m}^3}{\text{min}}$$

El compresor debe suministrar la cantidad de X N m³ /min y a una presión de Y kg /cm².

3.1.11. Análisis y evaluación del sistema de purificación de lubricante

Mejorando los intervalos de cambio de aceite como el desempeño de las máquinas, esto debe generar una extensión de tiempo en los programas de mantenimiento del equipo y mostrar una disminución de metales en muestras de aceite. Se realiza mediante purificadoras y filtros, los residuos de combustión serán separados y extraídos en el proceso interno de la purificadora.

3.1.12. Costo total de instalación

El costo total se basa en los componentes o accesorios que serán de uso vital para el control y funcionamiento del sistema de purificación.

3.1.12.1. Del equipo industrial

El equipo industrial por utilizar para la instalación del sistema de purificación se basa en los accesorios que deben ser instalados para su correcto funcionamiento.

Tabla X. **Costo de accesorios estándar para un sistema de purificación de aceite SAE**

Accesorios	Características del equipo	Unidad
Bomba	HAUS-MBA 3162-30	50 000,00 USD
Indicador	COT	1 000 USD

Continuación de tabla X.

Pre calentador	COT	3 000 USD
Contador digital	Petroline	500 USD

Fuente: elaboración propia.

3.1.12.2. Montaje y conexión del equipo industrial

Se debe realizar un montaje y conexión de equipo auxiliar para su funcionamiento, que a continuación se desglosan:

- Electroválvulas (V14, V16 Y V17): una de ellas está destinada a llenar la bola de agua para realizar el sello, la segunda es con el agua que permite manejar la apertura y el cerrado de la bola, y la tercera se utiliza para el manejo del actuador neumático descrito a continuación:
- Actuador neumático: se usa para manejar la válvula de 3 vías que permite ingresar aceite hacia la purificadora.
- Transmisor de presión (PT1): ubicado en la salida de aceite purificado que permitirá detectar fugas de aceite, ya que si existen fugas la presión de salida de aceite cae.
- Transmisor de temperatura (TT1): se usa para medir la temperatura del aceite que ingresa hacia la purificadora.

3.1.12.3. Recurso humano o técnico

El costo del recurso humano para la instalación del sistema de purificación se basa directamente en todas las personas involucradas en el análisis e instalación del equipo, este puede ser con la empresa proveedora del equipo o bien del equipo técnico con el que cuenta la compañía.

3.1.13. Mantenimiento del sistema de purificación

Se refiere a todas las actividades de intervención del equipo que garantice su funcionamiento a lo largo del tiempo, realizado por equipo técnico especializado, el cual incluye actividades de tipo mecánico, eléctrico y administrativo.

3.1.13.1. Mantenimiento preventivo

Este tipo de mantenimiento se aplica al equipo como medio de prevención, con el fin de conservar su buen funcionamiento mediante la realización de actividades que regulen la vida útil del equipo y de esta forma evitar paros imprevistos y mal funcionamiento de los mecanismos internos.

3.1.13.2. Cada 500 horas

Es un procedimiento que puede ayudar a evitar averías en el equipo mecánico.

3.1.13.3. Limpieza de *strainer*

El *strainer* es un elemento filtrante de partículas, el cual es lavado, revisado y si fuera necesario se realiza su respectivo cambio cada 500 horas seguidas de operación, este proceso es muy importante ya que a partir de esto se logra observar la cantidad de sedimentos que pueden estar afectando el proceso, por lo general este elemento tiene una dimensión en sus poros de 20 a 30 micras.

3.1.13.4. Cada 1 000 horas

Después de la revisión y mantenimiento de 500 horas, incluyendo una serie de actividades y acciones para evitar fallas en los elementos y accesorios del equipo.

3.1.13.4.1. Limpieza a *bowl*

Se realiza con el fin de evitar contaminación en la parte superior e interna del tazón o *bowl* ya que durante el proceso específico de la purificadora de aceite las partículas pesadas del aceite se hunden hasta la parte inferior por el efecto de la gravedad, formando de esta manera una capa de suciedad en el fondo, que puede ser desechado en el proceso de limpieza o el purgado que realiza, sin embargo, el proceso no es 100 % eficiente y por tal razón es necesario realizar dicho mantenimiento.

3.1.13.4.2. Cambio de lubricante

Es el reemplazo de aceite que utiliza el equipo para su operación, este es uno de los procesos más importantes debido a que su operación depende mucho de las características que contiene este.

Por lo general es un proceso sencillo que se realiza cada 1 000 horas, con ello es necesario realizar mantenimiento de electroválvulas y la respectiva limpieza al *bowl*, esto con el fin de reducir los sedimentos que deja el aceite que es reemplazado.

3.1.13.4.3. Mantenimiento a electroválvulas

Se refiere al desarme y con ello la limpieza interna de orificios de las válvulas electromecánicas que controlan el paso de agua que utiliza la purificadora para su respectiva limpieza en el proceso interno, estas están controladas por un panel de control que actúa automáticamente cuando se realiza la operación del sistema.

3.1.13.5. Cada 5 000 horas

Es el mantenimiento que se refiere a las actividades que deben enfocarse en la revisión directa del sistema centrífugo del equipo.

3.1.13.5.1. Revisión del *clutch* centrífugo

El *clutch* centrífugo se puede definir como un sistema mecánico encargado de transmitir energía mecánica por medio de fuerza centrífuga, con el objetivo de mantener una rotación constante que permita que el equipo logre mantener la transmisión par necesaria para operar.

En este mantenimiento se realiza el desmontaje del motor eléctrico de la purificadora para realizar la revisión de fricciones que son las encargadas de darle la tracción mecánica al equipo para que este opere de forma correcta, si estas no se encontraran en buen estado se demoraría en alcanzar las

revoluciones al momento de su operación. Así también, el desgaste de alojamiento de fricciones y que el tambor no presente ovalaciones.

3.1.13.6. Cada 1 2000 horas

Se refiere al *overhaul* del equipo, tomando en cuenta el desgaste que han sufrido los mecanismos y rodamientos internos, dentro de las actividades que llevan a cabo este tipo de mantenimiento, se puede mencionar: cambio de cojinetes, cambio de retenedores de aceite, cambio de eje vertical y horizontal si fuera necesario, cambio de aceite, cambio de fricciones, revisión de parámetros eléctricos al motor, reparación de bomba de alimentación, revisión de dentadura del multiplicador de corona de eje vertical.

3.1.13.6.1. Cambio de cojinetes a motores eléctricos

Si las revoluciones no son suficientes; como en el caso del arranque, la fuerza hidrodinámica no es capaz de separar las superficies en contacto, lo que puede provocar una fricción que puede dañar el cojinete.

Por lo anterior, se necesita una prelubricación que trate de disminuir este problema, solo al aumentar de revoluciones se consigue reducir las fuerzas de fricción y así formar la película de lubricante permanente, que provoca una fricción fluida que hace que ambas superficies (cojinete y muñón) permanezcan separadas.

4. ACCIONES EN EL PROCESO DE IMPLEMENTACIÓN

4.1. Plan de acción

Se refiere a todas las acciones llevadas a cabo para cumplir con la instalación del equipo en el área destinada, tomando en cuenta factores empresariales como lo es el recurso humano, capital, bienes físicos (recursos naturales y maquinaria) las entidades y departamentos internos de la organización que intervienen en el proceso administrativo (planeación, organización, dirección y control), mecánico, civil y eléctrico para la ejecución de las actividades necesarias, teniendo en cuenta los lapsos de tiempo, la cantidad de trabajadores necesarios para cada actividad, los posibles riesgos y las debidas precauciones que se deben llevar a cabo en el proceso.

4.1.1. Entidades responsables

Son todos los departamentos internos involucrados en el proceso de instalación, verificación y control de los lineamientos necesarios para poner en marcha el equipo, con ello incluyen los permisos necesarios y las especificaciones técnicas de los equipos que sean necesarios para llevar a cabo las actividades.

4.1.1.1. Gerencia General

Es el responsable de revisar las propuestas presentadas, realizar un análisis económico para evaluar el gasto financiero y el retorno de los activos que serían utilizados para la adquisición del equipo, dirigir las actividades que se

llevarían a cabo para culminar de forma eficiente el montaje del equipo principal y la instalación de los equipos auxiliares.

4.1.1.2. Generación *Power Plant*

Se refiere al departamento encargado de presentar propuestas que se acoplen al sistema de lubricación del equipo o motor, que cumplan con las características técnicas necesarias para realizar de forma eficiente todo el proceso de lubricación sin que el motor presente paros imprevistos en el proceso productivo de la compañía.

El motor presenta ciertas características que son muy importantes para el acoplamiento de un sistema de purificación que deben ser tomadas en cuenta, con el equipo técnico dentro de las instalaciones, compuestos por mecánicos, eléctricos, operadores y el supervisor de la *Power Plant*.

4.1.1.3. Departamento de Seguridad Industrial (QSHE)

El Departamento de Seguridad Industrial es aquel que se encarga de analizar el área donde se llevarán a cabo las acciones pertinentes para la instalación y acoplamiento del sistema de purificación y de los equipos auxiliares para que este funcione de forma óptima.

Para este proceso es importante realizar ART (análisis de riesgo de trabajo), entre otros procedimientos importantes como planes de contingencia para evitar daños a los involucrados.

El Departamento de Seguridad Industrial tiene como función primordial mantener en observación cada proceso, actividad y constante supervisión a

todos los trabajadores para que utilicen el equipo de protección necesario para cada actividad.

4.1.1.4. Departamento de proyectos

Se encarga de la presentación de la propuesta, de la realización de un análisis financiero de retorno de activos, de un cronograma de actividades, constante supervisión de todas las acciones pertinentes, de la revisión y recepción de trabajos presentados por los departamentos involucrados y de realizar reportes que muestren un seguimiento continuo a los trabajos realizados durante el tiempo de instalación y acoplamiento.

4.1.1.5. Servicios externos

Se refiere directamente a la empresa proveedora del equipo que cumple con las especificaciones del sistema de purificación, estos servicios comprenden el traslado desde la ubicación raíz de la empresa hasta la planta, y, con ello, el departamento donde es instalado, la instalación no es tomada en cuenta como un servicio, debido a que es un acoplamiento con base en cálculos físico-matemáticos que son realizados por ingenieros y técnicos especializados en la empresa Perenco y no un equipo auxiliar que pueda ser acoplado por la empresa proveedora del motor.

4.2. Ubicación del sistema de purificación en las instalaciones

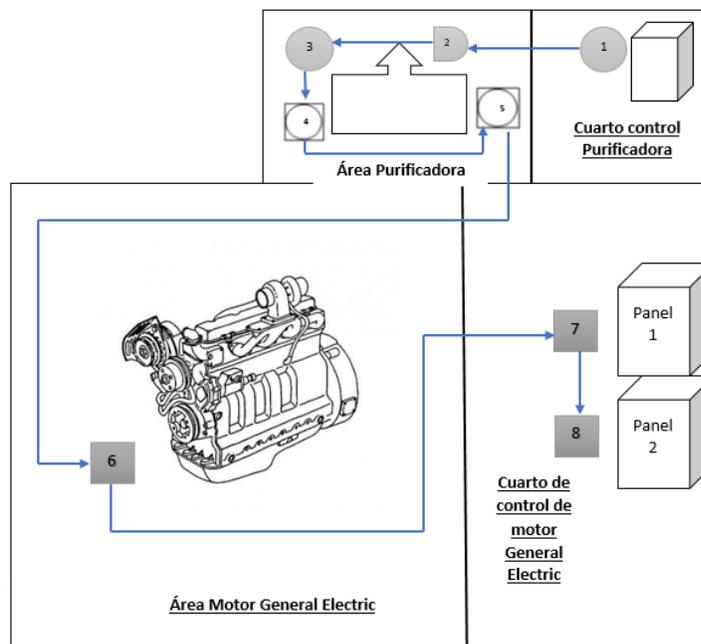
Se instalará en el área de Motores GE, utilizando un espacio sobre el cual estará agregado a la infraestructura de los equipos, los controles del sistema de purificación también estarán en el cuarto de control de los Motores GE. Lo

anterior para evitar ampliar o construir otro compartimiento, aprovechando las instalaciones construidas y acondicionadas de la planta.

4.2.1. Diagrama de recorrido

A continuación, se presenta la ubicación técnica del equipo de purificación y el panel de control del respectivo sistema.

Figura 23. Diagrama de recorrido ubicación de sistema de purificación



Fuente: elaboración propia, empleando Word.

Tabla XI. **Descripción de diagrama de recorrido ubicación de sistema de purificación**

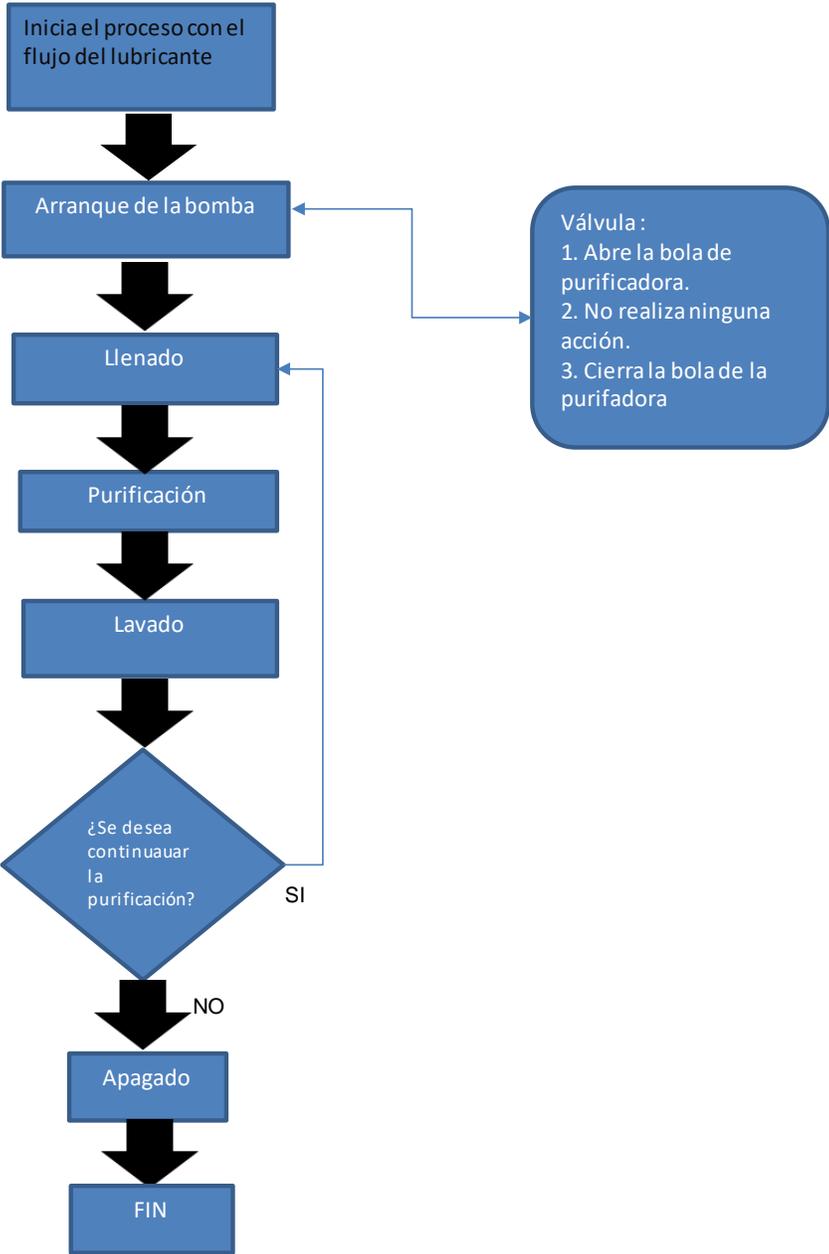
<u>Número</u>	<u>Símbolo</u>	<u>Descripción</u>
1	Operación	Encender purificadora.
2	Demora	Esperar el tiempo establecido para su respectivo lavado.
3	Operación	Regular el flujómetro.
4	Inspección/Operación	Revisar bomba de alimentación y abrir válvula de venteo.
5	Inspección/Operación	Revisar condiciones en purificadora y regular condiciones si fuera necesario.
6	Inspección	Observar condiciones en Carter de motor, válvula de entrada.
7	Inspección	Revisar condiciones mecánicas en motor (presión de aceite, nivel de Carter).
8	Inspección	Revisar condiciones eléctricas en motor.

Fuente: elaboración propia.

4.2.2. Diagrama de flujo

El diagrama de flujo que a continuación se presenta detalla las actividades que conlleva el proceso de arranque y ciclo que cumple el sistema de purificación.

Figura 24. Diagrama de flujo del proceso del sistema de purificación en ubicación establecida



Fuente: elaboración propia, empleando Word.

4.3. Mantenimiento preventivo

Las características requeridas para un mantenimiento en un sistema acoplado a un motor, es la estabilidad como capacidad, en estos casos no debe existir cambios significativos en el sistema del motor, ya que deben ser equipos independientes, el proceso de mantenimiento preventivo se realizará según las indicaciones del proveedor.

4.3.1. Plan de mantenimiento

Se realizan monitoreos para realizar sustituciones o programaciones en los mantenimientos. La mejora continua del plan de mantenimiento preventivo es la organización y ejecución, de acuerdo con eso se realiza un plan de mantenimiento que se ejecuta por técnicos especializados.

4.3.2. Ruta crítica del mantenimiento preventivo

Este procedimiento se estudiará por medio de análisis modal de fallas y efectos (AMFE), que utiliza el historial de fallas potenciales de un sistema en particular, ya que se cuenta con equipos parecidos en la compañía para la toma de decisiones con base en un plan estratégico, obteniendo muestras de aceite del equipo para analizar el comportamiento y mejora del sistema completo.

Este plan estratégico se basa en una serie de etapas que deben ser consideradas, las cuales son:

- Recolección de datos
- Detalles referentes al muestreo
- Observaciones generales de funcionamiento

- Normalización
- Identificación de las propiedades
- Condiciones iniciales del fabricante
- Establecimiento de valores límites
- Analizar los valores
- Conclusiones

4.3.2.1. Costos por mantenimiento preventivo

Tomando en cuenta que la ruta crítica de mantenimiento se mantiene, los costos por mantenimiento o ruta también deben ser constantes en un margen, con lapsos de operación estables que se mantienen a lo largo de la operación, tomando en cuenta la operación del motor, porque de ello depende la operación del sistema de purificación. Las características requeridas para un mantenimiento en un sistema de medición, es la estabilidad como capacidad, en estos casos no deben existir cambios en lo que se realiza en cada ruta crítica de mantenimiento.

4.3.2.2. Costos por mano de obra

El costo por mano de obra se determina con base al tipo de mantenimiento que necesita el equipo de purificación, teniendo en cuenta la ruta crítica de mantenimiento, porque de esto depende la cantidad de tiempo invertido y la cantidad de operadores a cargo de la actividad. “En algunas ocasiones si el equipo necesita de intervención externa se puede utilizar el Indicador de mano de obra externa”.⁸

$$\text{CMOE} = \frac{\text{(Totalidad) CMOC}}{\text{(Totalidad) (CMOC + CMOP)}}$$

⁸ BUELVAS DÍAZ, Camilo Ernesto y MARTINEZ FIGUEROA, Kevin Jair. *Elaboración de un plan de mantenimiento preventivo para la maquinaria pesada de la empresa I&I*. p. 30.

Dónde:

CMOE= Costo de Mano de Obra Externa

CMOC= Costo de Mano de Obra Contratada

CMOP= Costo de Mano de Obra Permanente (Contratada-Directa)

4.3.2.3. Costos de repuestos y materiales

Se basan directamente en el tipo de mantenimiento programado y el estado de los mecanismos a revisar, es importante analizar que muchas veces los mantenimientos no generan un costo por repuesto, como lo puede ser un mantenimiento de 500 horas en caso el filtro o *strainer* que es revisado no necesita un cambio sino solamente una limpieza.

4.4. Análisis tribológico

Esto constituye el estudio técnico de una muestra de aceite que supone la interacción de las superficies que son lubricadas en la parte interna del motor, conforme a la fricción y desgaste. Entre los ensayos más utilizados que se tienen se encuentran los siguientes:

- Análisis del estado del aceite, ferro gráfico, superficie.
- Control de la calidad del aceite, prueba de metales de desgaste.

4.4.1. Técnica de muestreo de lubricante

Cuando se realiza un muestreo se debe conocer específicamente los valores estándar máximo y mínimo para funcionamiento en condiciones normales, por lo que, para ello se utilizarán los manuales técnicos de los equipos, motor y purificadora.

Para dicha técnica de muestreo de lubricante se utilizará un equipo para extracción de muestras, en lapsos determinados para el análisis de sus propiedades, así como la importancia del análisis de TBN (total number base).

4.4.2. Equipo de campo digital Easyship

El equipo de campo cuenta con especificaciones técnicas para ser utilizado por el personal a cargo, este es de utilidad para la toma de decisiones y análisis de propiedades técnicas del lubricante.

4.4.2.1. Características técnicas

Es de utilidad para la recolección de la información como análisis de TBN y determinación de agua en aceites minerales.

Cuenta con productos específicos para ser solubles en una muestra de aceite, identificando valores técnicos en la pantalla táctil del estado del aceite, también, incluye un manual de operador e instrucciones claras para su uso.

Figura 25. **Equipo de campo digital Easyship**



Fuente: C.C. JENSEN. *Equipo de campo digital Easyship*.

[www.https://www.cjc.dk/es/productos/equipo-de-monitorizacion/equipo-de-campo-digital/](https://www.cjc.dk/es/productos/equipo-de-monitorizacion/equipo-de-campo-digital/).

Consulta: 12 de mayo de 2021.

4.4.3. Herramientas de control de análisis

Seleccionar un equipo a monitorear, incluye adecuadamente una selección de equipos y frecuencias de muestreo que son elementos importantes. Realizar un seguimiento de las muestras, es asegurar un control de los datos. La respuesta de los laboratorios es por medio de un proceso de análisis, pueden obtenerse respuesta después de 48 horas.

Debe existir un programa de análisis que sea completo y con un sistema donde se obtengan respuestas rápidas para lograr un mantenimiento efectivo.

4.4.3.1. Registro interno

Para lograr poner en práctica este programa de análisis de muestras de aceite usado, se les da una previa capacitación a las personas que van a ser directamente responsables en la extracción de muestras, manipulación, revisión y llenado de boleta, para el menor porcentaje de error o la contaminación de las muestras analizadas. Se pueden mencionar los beneficios reales de los análisis

de aceite usado. Es un método muy utilizado para predecir y prevenir ciertos problemas de mantenimiento en las unidades antes de que ocurra. También se asegura que el lubricante que se utilice llene las expectativas para lo cual se está utilizando.

4.4.3.1.1. Muestreo cada 100 horas de trabajo

La muestra debe ser tomada apropiadamente. En la boleta se incluye la identificación de la muestra, la mayor cantidad de información requerida asegura el éxito del manejo e inspección de la muestra.

Se debe tomar la muestra de análisis de aceite cuando el aceite específicamente aún se encuentre caliente, es decir, que, el equipo esté en operación.

4.4.3.1.2. Formato de control

Se realiza un formato confidencial de control interno que será utilizado por el operador a cargo del equipo de purificación, y con ello realizar el análisis utilizando el equipo técnico de campo para dar a conocer los parámetros para observar y comparar los resultados.

4.4.3.2. Registro externo

Servicio externo prestado por una compañía para el análisis de muestras de aceite, con ello un historial de los resultados.

4.4.3.2.1. Tercerización o subcontratación para análisis de muestra

Se basa en la toma de muestras de aceite del equipo cada lapso de tiempo, el cual se envía para su respectivo análisis en temas de contaminación y metales encontrados en la muestra, características técnicas como: viscosidad, oxidación, nitración, TBN, entre otros, que sirven de análisis para la toma de decisiones.

Este llevará una etiqueta en donde se incluye lo siguiente:

- Dónde fue tomada la muestra
- Maquinaria en operación
- Condiciones del ambiente
- Tomada después de detener el equipo
- Cómo fue tomada, puerto drenado por puerto o válvula de muestreo
- Tomada antes o después de filtros

4.4.3.2.2. Horizon (análisis de muestra)

Empresa externa que se encarga de enviar el resultado del análisis de aceite, incluye un formato específico y gráficas en donde se puede analizar el comportamiento a través del tiempo para observar algún cambio abrupto en los parámetros, considerando que este análisis es importante para la toma de decisiones a mediano o largo plazo, debido al tiempo que conlleva recibir los resultados.

5. ANÁLISIS DE SEGUIMIENTO Y MEJORA CONTINUA

Cuando los resultados se encuentran dentro de lo permitido y no tienen ninguna incidencia en el proceso de operación del equipo. Los análisis se realizan a partir de un reporte detallado de parámetros específicos para la toma de decisiones y que al mismo tiempo no tienen ninguna incidencia en el proceso de operación del equipo, incrementando los intervalos de aplicación de mantenimientos preventivos.

Es importante determinar la eficiencia en operación continua a partir del funcionamiento del sistema, como también en los resultados de intervenciones en temas de procedimientos de prevención, reparación y corrección.

5.1. Resultados obtenidos

Llevar un control sobre el monitoreo de los resultados, creando un historial de paros de equipo por mantenimientos correctivos en los que el lubricante sea el proyector de fallas internas por desgaste o fricción de mecanismos, lecturas individuales en lapsos de tiempo específicos, esto en función de la gráfica de control de medias y desviación estándar en los parámetros técnicos a evaluar.

Lo anterior con las mediciones del aceite en diferentes días y horas, puede utilizarse como una fuente de respaldo para obtener resultados y determinar con base en un análisis interno el resultado de la eficiencia en el rendimiento del sistema de purificación del aceite, con el objetivo de evaluar el retorno de capital invertido según proyecciones de aumento de eficiencia.

5.1.1. Interpretación

El aceite lubricante tiene una disminución en el valor técnico de sus propiedades conforme el tiempo de uso, esto se debe a la interacción constante con polvo metálico, piezas internas en constante rodamiento y temperatura del motor. Con el sistema de purificación se logra la constante recirculación del aceite, logrando aumentar la vida útil de este y al mismo tiempo observando una disminución de residuos, agua y sedimentos que afecten internamente el uso del motor estacionario.

5.1.2. Aplicación

Este método de filtración y limpieza del aceite tiene como objetivo principal la extracción de partículas en suspensión, impurezas como el agua en el aceite y prolongar la vida útil de los aditivos que contiene el lubricante.

Es importante llevar un control de muestras, datos estadísticos, características del lubricante (viscosidad, oxidación, nitración, entre otros.) para realizar cambios estratégicos en cuanto a temas de mantenimiento preventivo y predictivo.

5.1.3. Ventajas y beneficios

Mantener en lapsos mayores las propiedades del lubricante como la viscosidad, esto con el fin de mejorar la eficiencia de los componentes y alargar la vida útil de los mecanismos; mejorar el índice de viscosidad debido a la recirculación del aceite en el sistema.

Es una sustancia que se puede volver a refinar y reutilizar varias veces, en ocasiones se utiliza con el fin de mantener una temperatura estable debido a que resiste la oxidación.

Los residuos pueden ser utilizados en otras actividades como en la materia prima para fabricar asfalto o bien puede entregarse a recicladoras o siderúrgicas para evitar la contaminación atmosférica, estar cambiando los aceites cada cierto tiempo y no darle el uso adecuado, puede provocar daños irreparables al ambiente.

5.1.3.1. Ventajas competitivas

Generando una rentabilidad económica con la inversión de todos los equipos y accesorios que conforman un sistema de purificación, mantener una estabilidad en la operación continua del motor. El reacondicionamiento del lubricante conduce a una reducción en la conductividad térmica, evitando el desgaste que provoca la tensión térmica al enfriar las piezas internas del motor, preservar la limpieza de las piezas mecánicas del motor es vital para el alargamiento de la vida útil.

5.1.4. Disminución de mantenimientos anuales

Se logra una disminución en la aplicación de mantenimientos preventivos a partir del aumento de las horas de operación del aceite, siendo este el factor principal tomado en cuenta para la aplicación de un mantenimiento preventivo de 750 a 1 000 horas, evitando así, el reemplazo de mecanismos internos en mantenimiento correctivos que puedan darse en temas de sobrecalentamiento, fricción y al mismo tiempo prevenir la contaminación por hollín que puede provocar daños en la bomba de lubricación.

5.1.5. Mejora en resultados de estudio de aceite

Se basa directamente en el análisis y manejo de los resultados al final de la toma de muestras de aceite, con un historial que logre observar una mejora en los resultados, existe la posibilidad que se observen restos de hollín, partículas de metales y otros contaminantes que se encuentran en el lubricante, sin embargo, teniendo el historial del motor se puede observar diferencia en los parámetros técnicos y con ello se realizan comparaciones en cantidad de metales (ppm) encontrados en cada análisis.

Prolongar el valor de TBN (*Total Base Number*) manteniendo en mejor estado las condiciones físicas y técnicas del aceite alargando la vida útil de este y con ello los lapsos de intervención por mantenimiento.

5.1.6. Mejoras de eficiencia anual

Mejora en la eficiencia térmica, es decir en el enfriamiento de las piezas internas del motor, con ello prolongar la degradación térmica que sufren los mecanismos en el proceso de combustión, los datos pueden mostrar un comportamiento diferente a los que se evidenciaban sin tener el sistema.

Prolongar la vida útil del aceite alarga las horas de operación del motor estacionario, es decir, que conlleva una cantidad menor de intervenciones por mantenimiento preventivo aumentando la eficiencia de operación en los reportes presentados anualmente en kW.h/galon.

5.2. Eficiencia energética

Al aumentar el tiempo de vida útil del aceite se ahorra 250 litros de aceite por cada mantenimiento prolongado, ahorro en costos de generación,

manteniendo la calidad del lubricante se mantienen en mejores condiciones los mecanismos internos que se puede evaluar para su reutilización en un medio *over-hall*.

La generación del motor es mayor en un lapso determinado, lo que aumenta la eficiencia energética total de la planta, ya que se evita la colocación de motores móviles en pozos; estos móviles consumen una cantidad mayor de combustible, otro tipo de combustible, el cual tiene un precio más elevado afectando directamente los costos operativos.

5.2.1. Costos operativos

El sistema posibilita la supervisión por la facilidad de obtener resultados, también permite un acceso rápido a la información de las fallas, considerando la automatización que permite controlar el sistema y llevar un registro estadístico, donde no es necesario el constante control y supervisión del sistema de purificación por el operador, esto debido a que a partir del panel de control será simple obtener los datos del funcionamiento del equipo y configurar su operación, además, es importante mencionar que el motor estacionario será independiente del sistema de purificación para cualquier falla que deba corregirse, a partir de los cálculos realizados se logra independizar en cualquier momento de operación.

5.2.2. Beneficios

Se obtiene un impacto financiero que disminuye los costos de mantenimiento, hasta obtener el retorno de capital, mejorando al mismo tiempo la operación continúa. Alargar la vida útil del lubricante, aumentando el desempeño, lapsos de mantenimiento más largos, minimizando el consumo de

aceite a partir de las nivelaciones diarias para evitar la adición del aceite, ya que, en cada nivelación de aceite nuevo, este pierde sus propiedades al mezclarse con el aceite usado.

5.2.3. Alargamiento de la vida útil del lubricante

Al lograr un reacondicionamiento del aceite se consigue que la contaminación de este sea menor, al obtener resultados en análisis de partículas indican el desgaste de los elementos internos que conforman el motor, para analizar si su viscosidad no tiene una disminución, ya que a partir de eso se puede observar una mejora en la condición del aceite. También se logra que la reserva alcalina o básica (TBN), continúe neutralizando los ácidos que provienen del proceso de combustión interna.

Con este efecto se puede realizar acciones eficaces en lo que respecta a la programación de prevención, corrección o predicción de mantenimientos, evitando desgastes acelerados en los mecanismos que conforman el motor.

5.2.4. Mejora de la eficiencia de uso del equipo

Se logra que la operación del motor se prolongue y no se detenga por fallas recurrentes en temas de lubricación, entonces influye en la posibilidad de una programación y proyección certera en los pedidos de *stock* para cambios de mecanismos internos. Actualmente la generación de un motor estacionario de esta línea representa aproximadamente el 16 % de la generación total de la planta, por lo que, aumentado sus horas de trabajo evita el uso de motores móviles para sustituir su operación y con ello todo el proceso administrativo, operativo y de transporte que este obliga a realizar con cada una de las intervenciones.

5.2.5. Ahorro anual en gastos de mantenimiento

El ahorro se ve reflejado en la cantidad de mantenimientos realizados comparados con el historial de estos en años pasados y con ello los repuestos que presenten fallas en temas de lubricación, enfriamiento en mecanismos internos y daños directamente a la bomba de lubricación.

El ahorro anual puede ser proyectado dependiendo de los lapsos en que pueda ser prolongado el uso del aceite, a continuación, se puede observar el ahorro anual en diferentes escenarios según el tiempo en que pueda ser aplicado el cambio de lubricante en el motor.

Tabla XII. **Ahorro de costo anual con purificadora, prolongando la vida del lubricante a 3 000 horas**

<u>Diferencia de costos con purificadora y sin purificadora para motores General Electric de 3.5MW</u>								
<u>Condición</u>	<u>Razón</u>	<u>Número de Motores</u>	<u>Tiempo (horas)</u>	<u>Promedio de nivelación por día (Gal)</u>	<u>Costo aceite mantenimiento (\$)</u>	<u>Costo por nivelación (\$)</u>	<u>Costo total (\$)</u>	<u>Diferencia de costos (Ahorro) (\$)</u>
Con purificadora	2	1	3 000	8	2 359,00	5 985,12	8 344,12	2 359,00
Sin purificadora	1		3 000		4 718,00	5 985,12	10 703,12	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Ahorro de costo anual con purificadora, prolongando la vida del lubricante a 4 500 horas**

Diferencia de costos con purificadora y sin purificadora para motores General Electric de 3.5MW								
<u>Condición</u>	<u>Razón</u>	<u>Número de Motores</u>	<u>Tiempo (horas)</u>	<u>Promedio de nivelación por día (Gal)</u>	<u>Costo aceite mantenimiento (\$)</u>	<u>Costo por nivelación (\$)</u>	<u>Costo total (\$)</u>	<u>Diferencia de costos (Ahorro) (\$)</u>
Con purificadora	3	1	4 500	8	2 359,00	8 977,68	11 336,68	4 718,00
Sin purificadora	1		4 500		7 077,00	8 977,68	16 054,68	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Ahorro de costo anual con purificadora, prolongando la vida del lubricante a 6 000 horas**

Diferencia de costos con purificadora y sin purificadora para motores General Electric de 3.5MW								
<u>Condición</u>	<u>Razón</u>	<u>Número de Motores</u>	<u>Tiempo (horas)</u>	<u>Promedio de nivelación por día (Gal)</u>	<u>Costo aceite mantenimiento (\$)</u>	<u>Costo por nivelación (\$)</u>	<u>Costo total (\$)</u>	<u>Diferencia de costos (Ahorro) (\$)</u>
Con purificadora	4	1	6 000	8	2 359,00	11 970,24	14 329,24	7 077,00
Sin purificadora	1		6 000		9 436,00	11 970,24	21 406,24	

Fuente: elaboración propia.

5.2.6. Evitar paros en producción de energía

El principal objetivo del diseño de un equipo de purificación de aceite es evitar los paros de la producción de energía por parte del motor, la detención del motor estacionario puede estar relacionada a una falla imprevista en temas de calentamiento interno, presión baja de aceite, mala lubricación de mecanismos internos por falla en bomba de lubricación, estos problemas se sitúan directamente en fallas internas por deterioro de las propiedades del aceite o por contaminación del mismo por los restos de hollín en el proceso de combustión interna o ppm de metales de los mismos accesorios internos del motor, para corregir este tipo de fallas es importante mantener el lubricante en las mejores condiciones y así no contaminar el sistema interno del motor.

5.2.7. Acciones correctivas

Estas acciones desde el informe de diagnóstico, las órdenes de trabajo, los costos que se incurren al utilizar un servicio de terceros, pueden influir en los gastos administrativos y operativos. El tiempo que transcurre en diagnosticar, enviar las órdenes de trabajo, permisos de intervención, envío de muestras de aceite y recibir el informe del análisis puede incidir en un lapso de tiempo significativo para que ocurra desgaste, degradación térmica en mecanismos que con llevan a una reparación o aplicación de un mantenimiento correctivo de forma inmediata, ocasionando problemas en planeación, organización, dirección y control.

5.2.8. Retiro de servicio de tercerización

Se eliminarían los costos de servicios contratados, que ocasionarían el manejo de muestras, traslado y obtención de resultados, con bastante ocupación

de tiempo para la obtención de información que es necesaria para tomar decisiones en lo que concierne a mantenimientos, cambios y revisiones del equipo. Puesto que, con el equipo necesario obtener de forma inmediata la información justa y concisa justo antes de que el motor presente problemas más significativos.

5.2.9. Maximizar tiempos de evaluación para reducir gastos operativos

Considerando que el nuevo sistema de purificación de lubricante ampliará el rango de tiempo de uso del motor que actualmente oscila entre 750 a 1 000 horas. Un proceso de filtración eficiente logra prolongar la vida útil del lubricante y con ello de los aditivos.

El valor del TBN es el valor más importante para la toma de decisiones en temas de mantenimiento preventivo, según el historial del motor, por lo que, por medio de una filtración eficiente se logra prolongar el valor del número de base total y al mismo tiempo se disminuye el cambio de repuestos como de mano de obra en la realización de los mantenimientos correctivos y preventivos; con el equipo de campo digital se pueden obtener los resultados técnicos de las muestras y así analizar las mejoras, esto incrementaría la eficiencia de carga anual de los motores para mantener constante la extracción de petróleo, es importante mencionar que estos producen aproximadamente el 35 % de la carga en la empresa.

CONCLUSIONES

1. La instalación de un sistema de purificación permitirá incrementar la eficiencia en la operación, evitar daños por rodamiento en las piezas que componen los motores propios por su operación, por acción del rodamiento ejercido por mecanismos internos, temperatura y otros más.
2. Se logra aumentar la vida útil del lubricante y con ello el aumento de eficiencia anual en el uso de los motores, ya que, aproximadamente se realiza el paro del motor para el respectivo cambio de lubricante por cada 1 000 horas y según historial del motor se realiza aproximadamente de 4 a 6 veces por año, con un sistema de purificación se logra aumentar las horas de trabajo en una razón de 3 y las intervenciones anuales se limitan de 2 a 3 veces, mejorando las condiciones internas de los mecanismos, ya que no se observa una cantidad abrupta de sólidos en suspensión o partículas que contaminan y dañan internamente (metales, sedimentos y agua).
3. Prolongar la vida útil del lubricante representa un ahorro en consumo de aceite y un ahorro financiero, dependiendo de las horas a las cuales se realice el cambio de lubricante, si fuese reemplazado en 3 000 horas el ahorro anual de un motor representa una cantidad de \$2 359,00 y si fuese utilizada en dos motores representa una cantidad de \$4 718,00, si la vida útil de este recurso se logra prolongar hasta las 4 500 horas el ahorro anual se eleva a \$4 718,00 con un motor y con dos motores de \$9 436,00.

4. En el montaje del equipo como en la operación, los sistemas auxiliares eléctricos y mecánicos deben cumplir con las normativas de seguridad y acoplarse con el sistema hidráulico y eléctrico que se tiene en las instalaciones, estas especificaciones técnicas generales establecen los requisitos para el diseño, fabricación, pruebas, embalaje, transporte y almacenamiento de los equipos.

5. La ruta de mantenimiento definida para un sistema de purificación de aceite dependerá de las características básicas y técnicas del equipo, de los aditivos que este utiliza y del aceite que será tratado en todo el proceso, por lo general, el mantenimiento será definido en escalas que corresponden al uso que se le da y siguiendo las especificaciones del proveedor, correspondientes a 4 lapsos de tiempo que serán definidos, pero en donde las acciones son las mismas: limpieza de *strainer*, mantenimiento a equipo de purificación (limpieza de discos, mantenimiento a electroválvulas, cambio de aceite), mantenimiento a *clutch* centrífugo y luego del uso que corresponde, como todo equipo mecánico necesita un *top end* o conocido en campo como *overhaul*.

RECOMENDACIONES

1. Efectuar las pruebas necesarias para verificar y asegurar que todo el ensamblaje e instalación de los componentes originales se han realizado correctamente y que estén dentro de las tolerancias permitidas.
2. Realizar un cronograma de actividades, los permisos pertinentes para realizar pruebas.
3. Seguir un procedimiento por escrito cuando una instalación requiera ponerse en operación; así mismo, deber ser actualizado cuando se realicen modificaciones en las instalaciones.
4. Disponer de un sistema de control y protecciones eléctricas adecuadas, con niveles de voltaje apropiados, asegurando la continuidad y confiabilidad de la operación.
5. Cumplir con todas las normas de seguridad indicadas por los fabricantes de cada uno de los componentes, especialmente en cuanto a ubicación, presión, volumen de trabajo, sistemas contra sobrepresiones y protección de riesgos mecánicos.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALBUJA SÁNCHEZ, Byron Mauricio y SÁNCHEZ GÓMEZ, Elizabeth Verónica. *Diseño e implementación de un sistema de automatización y control para la purificadora de aceite de la unidad 3 de generación de la Central Termoeléctrica Guangopolo*. Trabajo de graduación de Ing. Electrónico, Automatización y Control. Departamento de Eléctrica y Electrónica, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, 2014. 107 p.
2. BUELVAS DÍAZ, Camilo Ernesto y MARTINEZ FIGUEROA, Kevin Jair. *Elaboración de un plan de mantenimiento preventivo para la maquinaria pesada de la empresa I&I*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Facultad de Ingenierías, Universidad Autónoma del Caribe, 2014. 72 p.
3. CASTELLÓ GÓMEZ, María Luisa; BARRERA PUIGDOLLERS, María Cristina; PÉREZ ESTEVE, Edgar y BETORET VALLS, Noelia. *Elementos básicos de las instalaciones de aire comprimido*. Artículo Docente. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural, Universidad Politécnica de Valencia, 2018. 11 p
4. Centrífuga, ALFA LAVAL. *Manual de instrucciones para los sistemas de separación LOPX 709*. [en línea]. <<https://es.climate-data.org/america-del-norte/guatemala-953/>>. [Consulta: febrero de 2020].

5. COSTALES CASTRO, Francisco. *Estudio técnico de lubricación y problemas en los cojinetes*. Trabajo de graduación de Ing. Marina. Escuela Técnica Superior de Náutica, Universidad de Cantabria, 2017. 87 p.
6. DE RUS, Gines. *Análisis Coste-Beneficio*. 3a ed. Barcelona, España: Ariel, S.A. 2008. 360 p.
7. GARCÍA GARRIDO, Santiago. *La contratación del mantenimiento industrial*. 1a ed. Madrid: Ediciones Díaz de Santos. 2010. 343 p.
8. GUILLÉN FERNÁNDEZ, Luis Fernando. *Procedimiento para el análisis de muestras de aceite usado en la agroindustria*. Trabajo de graduación de Maestría en Ing. de Mantenimiento. Escuela de estudios de postgrado, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2007. 43 p.
9. HELGUERO, Manuel y ARELLANA ORTIZ, Gabriel Alejandro. *Implantación de análisis de aceite en motores de combustión interna de ciclo diesel*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), 2016. 128 p.
10. LORENZO PÉREZ, Pedro Leonel. *Caracterización de las propiedades físico-químicas de los aceites lubricantes SAE 40 para vehículos con motores diesel y gasolina que se comercializan en el país*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2000. 86 p.

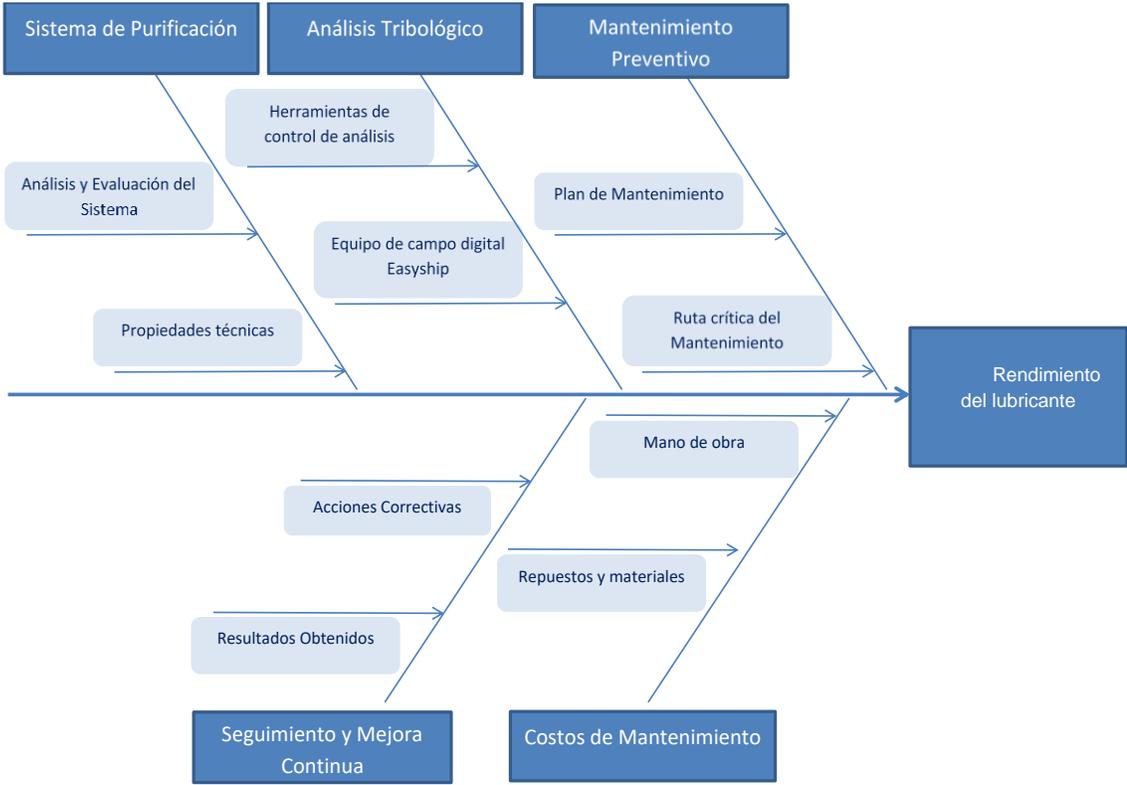
11. MAK/CATERPILLAR. *Owner's Manual*. [en línea]. <<https://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/CM20170314-49659-25043>>. [Consulta: marzo 2020].
12. MALDONADO DÍAZ, Cristian. *Diseño de un plan de mantenimiento preventivo de motores diesel basado en análisis de aceite*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Facultad de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional, 2010. 282 p.
13. MAUREIRA ARAVENA, Gabriel Alejandro. *Estudio de factibilidad técnica económica legal y ambiental de una planta de reciclaje de aceite lubricante usado en la Mina Chuquicamata Subterránea*. Trabajo de graduación de Ing. Civil en Minas. Facultad de Ingeniería, Universidad Andrés Bello, 2020. 138 p.
14. MORA GUTIÉRREZ, Luis Alberto. *Mantenimiento: planeación, ejecución y control*. 1a ed. México: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. 2009. 528 p.
15. MORÁN, Michael. *Fundamentos de termodinámica técnica*. 2a ed. Barcelona: Reverté, S.A. 2005. 896 p.
16. MORROW, Lester. Traduc. GARZA QUIROZ, Fernando. *Enciclopedia del mantenimiento industrial*. 1a ed. México: Compañía Editorial Continental.1986. 813 p.
17. MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos*. 6a ed. México: Pearson Educación, 2006. 644 p.

18. OLVERA BADILLO, Marco Tulio. *Diseño de configuración de un separador mecánico de líquidos con partículas sólidas*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2011. 45 p.
19. PAXTOR CASTRO, Edwin Maudiel. *Caracterización de las propiedades físico-químicas de los aceites lubricantes multigrado SAE 20W-50 para vehículos con motor de gasolina*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2005. 92 p.
20. PEREZ PARRA, David. *Lubricantes, su empleo y selección*. 4a ed. Barcelona: Ediciones CEAC, S.A. 1963. 238 p.
21. POLIMENI, Ralph S.; FABOZZI, Frank J. y Aldelberg Arthur H. *Contabilidad de costos*. 3a ed. Santa fé de Bogotá, Colombia: McGRAW-Hill Interamericana, S.A. 1997. 896 p.
22. RAMIRES NAVAS, Juan Sebastián. *Introducción a la Reología de los alimentos*. Revista ReCiTeIA, Vol. 6. Núm.1. Universidad del Valle Cali, Colombia. 2006. 47 p.
23. TERRADILLOS, Jesús; BILBOA Manuel y MÁLAGA Adolfo. *Lubricación y mantenimiento de motores a gas*. [en línea]. <https://lubrication-management.com/wp-content/uploads/sites/3/2014/07/Lubricaci%C3%B3n_motores_gas_ES.pdf>. [Consulta: marzo 2020].

24. TORMOS MARTÍNEZ, Bernardo. *Diagnóstico de motores diesel mediante el análisis de aceite usado*. 1a ed. Barcelona: Reverté, S.A. 2005. 388 p.
25. VALENZUELA MUÑOZ, Victor Gustavo. *Optimización del sistema de separación centrífuga entre separadoras de marca Alf Laval y Westfalia utilizadas en la purificación del aceite lubricante*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2004. 91 p.
26. VILLACINDA MALDONADO, Julio Francisco. *Evaluación de dos Métodos de regeneración en aceites lubricantes para motores de automóviles de gasolina*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1990. 75 p.

APÉNDICE

Apéndice 1. Flujograma



Fuente: elaboración propia, empleando Word.

