



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento

**DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO BASADO EN ANÁLISIS  
DE ACEITE CON APLICACIÓN DE LA NORMA ISO 4406:17 EN LA PLANTA DE  
PASTAS DE UNA MINA EXTRACTORA DE PLATA EN GUATEMALA**

**Ing. William Giovanni Colíndres Velasquez**

Asesorado por el Mtr. Ing. Luis Fernando Guillén Fernández

Guatemala, septiembre de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO BASADO EN ANÁLISIS  
DE ACEITE CON APLICACIÓN DE LA NORMA ISO 4406:17 EN LA PLANTA DE  
PASTAS DE UNA MINA EXTRACTORA DE PLATA EN GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**ING. WILLIAM GIOVANNI COLÍNDRES VELASQUEZ**  
ASESORADO POR EL MTR. ING. LUIS FERNANDO GUILLÉN FERNÁNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**MAESTRO EN ARTES EN INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2019

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. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

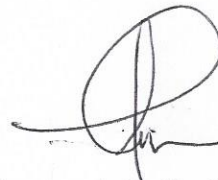
DECANA	Mtra. Inga. Aurelia Anabela Córdoba Estrada
EXAMINADOR	Mtr. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtr. Ing. Javier Fidelino García Tetzaguic
EXAMINADORA	Mtra. Inga. Sandra Ninett Ramírez Flores
SECRETARIO	Mtr. Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## 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 DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO BASADO EN ANÁLISIS DE ACEITE CON APLICACIÓN DE LA NORMA ISO 4406:17 EN LA PLANTA DE PASTAS DE UNA MINA EXTRACTORA DE PLATA EN GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 4 de agosto de 2018.



**Ing. William Giovanni Colíndres Velasquez**

**EPPFI-770-2019**

En mi calidad como 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 Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación de la Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento titulado: **“DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO BASADO EN ANÁLISIS DE ACEITE CON APLICACIÓN DE LA NORMA ISO 4406:17 EN LA PLANTA DE PASTAS DE UNA MINA EXTRACTORA DE PLATA EN GUATEMALA”** presentado por el Ingeniero Mecánico Industrial **William Giovanni Colindres Velasquez** quien se identifica con Carné **200112643**, procedo a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

*“Id y Enseñad a Todos”*


**Inga. Aurelia Anabela Córdoba Estrada**  
**Decana**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Universidad de San Carlos de Guatemala**

**Guatemala, septiembre de 2019**

**EPPFI-771-2019**

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado: **“DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO BASADO EN ANÁLISIS DE ACEITE CON APLICACIÓN DE LA NORMA ISO 4406:17 EN LA PLANTA DE PASTAS DE UNA MINA EXTRACTORA DE PLATA EN GUATEMALA”** presentado por el Ingeniero Mecánico Industrial **William Giovanni Colindres Velasquez** quien se identifica con Carné **200112643**, correspondiente al programa de Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

*“Id y Enseñad a Todos”*



**Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí**  
Director

**Escuela de Estudios de Postgrado**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Universidad de San Carlos de Guatemala**

**Guatemala, septiembre de 2019**


**EPPFI-772-2019**

Como Coordinador de la Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO BASADO EN ANÁLISIS DE ACEITE CON APLICACIÓN DE LA NORMA ISO 4406:17 EN LA PLANTA DE PASTAS DE UNA MINA EXTRACTORA DE PLATA EN GUATEMALA”** presentado por el Ingeniero Mecánico Industrial **William Giovanni Colindres Velasquez** quien se identifica con Carné **200112643**.

Atentamente,

*“Id y Enseñad a Todos”*



  
**Mtra. Inga. Sandra Ninett Ramírez Flores**  
**Coordinadora de Maestría**  
**Escuela de Estudios de Postgrado**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Universidad de San Carlos de Guatemala**

**Guatemala, septiembre de 2019**

**EEPFI-773-2019**

En mi calidad como Asesor del Ingeniero Mecánico Industrial **William Giovanni Colindres Velasquez** quien se identifica con Carné **200112643** procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO BASADO EN ANÁLISIS DE ACEITE CON APLICACIÓN DE LA NORMA ISO 4406:17 EN LA PLANTA DE PASTAS DE UNA MINA EXTRACTORA DE PLATA EN GUATEMALA”** quien se encuentra en el programa de Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

*“Id y Enseñad a Todos”*

Ing. Mec. Luis Fernando Guillén  
M.A. INGENIERIA DE MANTENIMIENTO  
COLEGIADO No. 6109

**Mtro. Ing. Luis Fernando Guillén Fernández**  
**Asesor**

**Guatemala, septiembre de 2019**



## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Jesucristo**

Por ser mi Señor y Salvador, por darme la vida, la sabiduría y la fuerza para culminar mi carrera, además de bendecirme con tantas cosas y personas maravillosas cada día.

### **Mi padre**

César Colíndres, por ser mi fuente de inspiración, ejemplo de superación y perseverancia. Gracias por heredarme tanta sabiduría.

### **Mi madre**

Dora Velásquez, por ser mi apoyo incondicional, por su amor y comprensión. Por confiar en mí y ser la luz que ilumina mi camino.

### **Mi esposa**

Lcda. Stacey Barillas, gracias por apoyarme en mi trabajo de graduación, por esas noches de desvelo a mi lado, sin ti esto no hubiera sido posible. Gracias por estar en mi vida en el momento preciso.

### **Mis hijos**

Michelle, Mateo y Sofía Colíndres, quienes son mis pilares, a quienes les dedico este pequeño logro de mi vida y que sea ejemplo para sus años futuros. Gracias por venir a alegrar mi vida.

**Mis hermanos**

Erick y Alfredo Colíndres, por ser mi compañía y por todos esos momentos que hemos compartido, sé que puedo confiar en ustedes. Gracias por su apoyo incondicional.

**Mis abuelos**

Augusto Colíndres y Felipe Velásquez (q.e.p.d), Rosalbina Morales y María Fermelisa Recinos, por su paciencia y amor.

**Mis tíos y primos**

Por su apoyo y cariño incondicional.

**Mis amigos**

Ábner Castellanos, Anael Argueta, Wuilmar Velásquez y Alexis Bardales, por compartir días de estudio y de desvelo, por ser parte de mi fortaleza y superación profesional.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Guatemala</b>	Mi querido país, que me ha visto crecer y convertirme en un profesional.
<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser la casa de estudios que me ha brindado la formación académica y profesional. Gracias gloriosa y tricentenaria universidad.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por proporcionarme los conocimientos necesarios en toda mi formación académica. Siempre pondré a mi Facultad en alto en cualquier parte del mundo.
<b>Escuela de Estudios de Postgrado</b>	Por dotarme de conocimientos para mi vida profesional.
<b>Mis amigos de la Facultad</b>	Con quienes viví una gran experiencia, llena de horas de estudio, pero también en donde pudimos compartir muchas aventuras y buenos momentos. Agradeceré siempre su apoyo y amistad.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y PREGUNTAS ORIENTADORAS.....	XV
OBJETIVOS.....	XIX
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO .....	XXI
INTRODUCCIÓN.....	XXIII
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Importancia de la función principal de la unidad hidráulica para impulsar la pasta a túnel subterráneo en una mina extractora de plata en Guatemala .....	1
1.2. Funcionamiento básico de la unidad hidráulica .....	2
1.2.1. Unidad hidráulica .....	3
1.2.1.1. Depósito hidráulico .....	3
1.2.1.2. Unidad de potencia.....	4
1.2.1.3. Bombas hidráulicas de desplazamiento positivo .....	4
1.2.1.4. Cilindros hidráulicos.....	5
1.2.1.5. Válvulas direccionales .....	6
1.2.1.6. Filtros hidráulicos.....	6
1.2.1.7. Mangueras hidráulicas.....	7
1.2.1.8. Fluido hidráulico.....	7
1.3. Mantenimiento .....	9

1.3.1.	Mantenimiento preventivo .....	10
1.3.2.	Mantenimiento correctivo .....	11
1.3.3.	Mantenimiento predictivo.....	12
1.4.	Análisis de aceite como herramienta de mantenimiento predictivo.....	13
1.5.	Parámetros de evaluación en análisis de aceite usado con base en norma ISO 4406:17 .....	16
1.6.	Equipo de medición para conteo de partículas .....	18
1.7.	Limpieza de los fluidos requeridos para componentes hidráulicos típicos.....	19
1.8.	Equipos de sistema de filtración hidráulica .....	21
2.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN .....	23
2.1.	Método de análisis .....	23
2.2.	Fase 1. Técnica para la extracción de la muestra .....	23
2.3.	Fase 2. Recolección de datos .....	27
2.4.	Fase 3. Presentación y análisis de datos .....	31
2.5.	Fase 4. Determinación de planes de acción .....	32
2.6.	Fase 5. Revisión y mejora continua .....	35
2.7.	Instrumentos de recopilación de datos y equipo de limpieza ...	36
3.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	41
3.1.	Propuesta de modelo de gestión de un mantenimiento predictivo para análisis de aceite con aplicación de la norma ISO 4406:17 .....	48
3.2.	Descripción del modelo de gestión .....	48
3.2.1.1.	Preparación de equipo de monitoreo ...	49
3.2.1.2.	Recolección de datos .....	49
3.2.1.3.	Análisis de datos .....	50

3.2.1.4.	Detección de anomalías .....	50
3.2.1.5.	Elaboración de informe .....	50
3.2.1.6.	Generación de tendencias .....	51
3.2.1.7.	Presentación de resultados .....	51
3.2.1.8.	Mejora continua .....	52
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	53
4.1.	Discusión de análisis de aceite.....	53
4.2.	Discusión sobre el mantenimiento predictivo basado en análisis con aplicación de la norma ISO 4406:17 .....	54
	CONCLUSIONES .....	57
	RECOMENDACIONES.....	59
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Cilindros hidráulicos de unidad hidráulica .....	2
2.	Cilindros hidráulicos .....	5
3.	Ejemplo de tipos de válvulas direccionales, según sus vías y posiciones .....	6
4.	Diagrama básico de un sistema hidráulico, con cilindros de doble efecto con desplazamientos alternados .....	8
5.	Bomba de succión.....	15
6.	Contador de partículas Icount, marca Parker.....	19
7.	Fotografía microscópica de contaminación por partículas (ampliación 100x, escala: 1 división = 20 micrones) .....	21
8.	Carro de filtración.....	22
9.	Bomba de succión.....	24
10.	Recipientes para almacenaje de la muestra .....	25
11.	Especificaciones técnicas del aceite hidráulico Energol HLP-HM 46... ..	26
12.	Análisis de muestra con un testigo obtenido de la unidad hidráulica desde el reservorio.....	28
13.	Análisis de muestra desde una línea de presión máxima de hasta 350 bar .....	28
14.	Circuito hidráulico para el análisis de la muestra .....	29
15.	Flujo hidráulico controlado para la detección de la partícula.....	29
16.	Resultado que se presenta en la pantalla digital.....	30
17.	Carro de filtración.....	33
18.	Eficiencia de filtros en función del tamaño de partícula .....	35



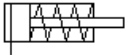




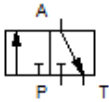
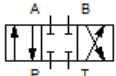


19.	Analizador de muestras de aceite Parker Icount (IOS).....	36
20.	Características y especificaciones técnicas del analizador de aceite Parker Icount .....	37
21.	Toma de muestra de un contenedor de aceite utilizando el carro de filtración .....	38
22.	Características y especificaciones técnicas del carro de filtración.....	39
23.	Gráfico para partículas de 4 $\mu$ .....	42
24.	Gráfico para partículas de 6 $\mu$ .....	43
25.	Gráfico para partículas de 14 $\mu$ .....	44
26.	Gráfico de la tendencia del código ISO en partículas de 4 $\mu$ .....	45
27.	Gráfico de la tendencia del código ISO en partículas de 6 $\mu$ .....	46
28.	Gráfico de la tendencia del código ISO en partículas de 14 $\mu$ .....	47
29.	Diagrama de flujo de un mantenimiento predictivo, basado en el análisis de aceite con aplicación de la norma ISO 4406:17 .....	52

## TABLAS

I.	Escala de números .....	17
II.	Niveles de limpieza de componentes hidráulicos típicos .....	20
III.	Límites permisibles de niveles de limpieza de componentes hidráulicos típicos .....	27
IV.	Resultados obtenidos de las muestras de campo .....	31
V.	Desempeño del elemento filtrante .....	34

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
	Bomba hidráulica
	Cilindro de doble acción
	Cilindro de simple acción con muelle
	Depósito hidráulico
	Filtro hidráulico
	Manguera hidráulica
%	Porcentaje
μ	Prefijo micro, indica factor de $10^{-6}$
	Válvula direccional, de 2 vías y 2 posiciones
	Válvula direccional, de 3 vías y 2 posiciones
	Válvula direccional, de 4 vías y 3 posiciones



## GLOSARIO

<b>Aceite</b>	Sustancia grasa de origen mineral, vegetal o animal, líquida, insoluble en agua, combustible y generalmente menos densa que el agua, que está constituida por ésteres de ácidos grasos o por hidrocarburos derivados del petróleo.
<b>Aceite hidráulico</b>	Líquidos transmisores de potencia que se utilizan para transformar, controlar y transmitir los esfuerzos mecánicos a través de una variación de presión o de flujo.
<b>Actuador</b>	Es un dispositivo inherentemente mecánico cuya función es proporcionar fuerza para mover o hacer actuar otro dispositivo mecánico.
<b>Cilindros hidráulicos</b>	Son mecanismos que constan de un cilindro dentro del cual se desplaza un émbolo o pistón, y que transforman la presión de un líquido, mayormente aceite, en energía mecánica.
<b>Bar</b>	Un bar es una unidad de presión, equivalente a un millón de barias, aproximadamente igual a una atmósfera.

<b>Desgaste</b>	Hace referencia a la pérdida de la estructura superficial de un material debido a una interacción constante y mecánica con una superficie o con un objeto.
<b>Filtración</b>	Efecto de filtrar.
<b>Filtro</b>	Materia porosa, a través de la cual se hace pasar un fluido para clarificarlo o depurarlo.
<b>Fluido oleohidráulico</b>	Fluidos derivados básicamente del petróleo como, por ejemplo, el aceite mineral.
<b>Fricción</b>	Rozamiento entre dos cuerpos en contacto, uno de los cuales está inmóvil.
<b>Hidráulica</b>	Parte de la mecánica que estudia el equilibrio y el movimiento de los fluidos.
<b>HP</b>	Por sus siglas en inglés ( <i>horsepower</i> ) unidad de medias de potencia.
<b>Humedad relativa</b>	Relación entre la cantidad de vapor de agua que tiene una masa de aire y la máxima que podría tener.
<b>ISO</b>	Sigla de la expresión en inglés International Organization for Standardization, Organización Internacional de Estandarización, sistema de

normalización internacional para productos de áreas diversas.

<b>Lubricante</b>	Sustancia grasa o aceitosa que se aplica a las piezas de un engranaje para que el rozamiento sea menos o más suave.
<b>Mantenimiento</b>	Conservación de una cosa en buen estado o en una situación determinada para evitar su degradación.
<b>Micrón</b>	Es una unidad de medida que representa la milésima porción del milímetro, o sea 0,001 mm, o referido al metro, su millonésima porción.
<b>Mililitro</b>	Medida de volumen, de símbolo ml, que es igual a la milésima parte de un litro.
<b>Mina subterránea</b>	Es aquella explotación de recursos mineros que se desarrolla por debajo de la superficie del terreno.
<b>Oleohidráulica</b>	En esencia, la oleohidráulica es la técnica aplicada a la transmisión de potencia mediante fluidos incompresibles confinados.
<b>Partícula</b>	Parte muy pequeña de alguna cosa.
<b>Tribología</b>	Es la ciencia que estudia la fricción, el desgaste y la lubricación que tienen lugar durante el contacto entre superficies sólidas en movimiento.

**Turbulencia**

Movimiento desordenado de un fluido en el cual las moléculas, en vez de sufrir trayectorias paralelas, describen trayectorias sinuosas y forman torbellinos.

## RESUMEN

En la mina extractora de plata en Guatemala, no se cuenta con plan de mantenimiento predictivo, correspondiente a los componentes hidráulicos, un adecuado mantenimiento asegura la disponibilidad y una producción constante, lo cual no ha sido tan favorable, debido a las diferentes fallas operacionales que puede presentar el departamento de planta de pastas. El análisis de aceite es un aliado natural en el logro de la confiabilidad de la maquinaria hidráulica. Ofrece fortalezas complementarias en el control de las causas de falla de la maquinaria en la identificación y comprensión de la naturaleza de las condiciones anormales.

Se logró controlar la contaminación en el aceite hidráulico, de tal manera que pueda reducirse o mantenerse en los parámetros requeridos, la tribología es parte esencial de un sistema hidráulico, puesto que analiza la lubricación, fricción y desgaste de los componentes. Con esto se logró crear un plan de mantenimiento predictivo y anticiparse a alguna falla relacionada, se redujeron de esta manera los paros innecesarios, lo cual permite una mayor disponibilidad y por consiguiente una alto rendimiento en la producción. Además con este sistema se complementa la gestión del mantenimiento correctivo y preventivo.

En conclusión, el estudio interpreta la importancia del modelo de mantenimiento predictivo, basado en normas internacionales, con la finalidad de optimizar el buen funcionamiento de la maquinaria y la prolongación de los aceites lubricantes.



Se sugiere que el sistema de mantenimiento predictivo sea integrado en conjunto con el mantenimiento preventivo y así poder reducir el mantenimiento correctivo que puede llegar a ser una falla catastrófica, así también se busca aportar un beneficio a la producción constante de la mina y aumentar su rentabilidad económica.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y PREGUNTAS ORIENTADORAS**

- Planteamiento del problema

En la planta de pastas de una mina subterránea extractora de plata en Guatemala no se cuenta con un mantenimiento predictivo basado en el análisis de aceite para la unidad hidráulica, que es la encargada de regresar al túnel el material que ya no tiene un valor económico y su falta de disponibilidad afecta en la producción, generando pérdidas económicas considerables.

- Descripción del problema

La unidad hidráulica que se encarga de impulsar la pasta hacia el túnel solo cuenta con mantenimiento preventivo, descrito por el manual del usuario y en su defecto algún mantenimiento correctivo. Para el año 2017 la empresa minera, al no contar con un plan de mantenimiento predictivo basado en análisis de aceite, con base en experiencias de fallas en componentes hidráulicos puede incrementar la probabilidad de ocurrencia.

La contaminación es la mayor causante de fallas en cualquier elemento mecánico lubricado. Un control efectivo y eficiente del desgaste se consigue controlando los elementos contaminantes presentes en el aceite. Con base en antecedentes se puede concluir que más del 70 % de las fallas de los sistemas hidráulicos están correlacionados con la contaminación por partículas.

Las partículas disueltas en el aceite hidráulico aumentan la fricción, desgaste de los componentes, reducen la lubricación efectiva del sistema y las funciones principales del lubricante.

- Formulación del problema

No es posible estar preparado para una falla en un equipo sin un sistema de mantenimiento predictivo, que como consecuencia impactará negativamente en la producción de la mina, por tal razón es importante realizar este tipo investigación, con el objetivo de responder a la pregunta principal, planteada de la siguiente manera:

- Pregunta central

¿Cómo puede mejorar el proceso la planta de pastas de una mina extractora de plata?

Para proceder con el planteamiento del problema, se formulan las siguientes preguntas de investigación:

- Preguntas secundarias
- 1- ¿Cómo se pueden determinar los estados históricos de los mantenimientos preventivos y correctivos que se le han realizado a los equipos hidráulicos de la planta de pastas?
  - 2- ¿Cuáles son los valores permitidos de contaminación en el aceite para resguardar los componentes hidráulicos críticos de la unidad hidráulica y así evitar una falla catastrófica?

- 3- ¿Qué beneficios se pueden obtener con la implementación de un mantenimiento predictivo basado en el análisis de aceite utilizado en los equipos hidráulicos en el proceso de pasta?



# OBJETIVOS

## General

Diseñar un sistema de mantenimiento predictivo basado en el análisis de aceite con aplicación de la norma ISO 4406:17 para la unidad hidráulica de la planta de pastas de una mina de plata en Guatemala.

## Específicos

1. Determinar a través del historial de fallas y fichas técnicas el control y los tipos de mantenimientos realizados a la unidad a hidráulica, a partir de la última reparación mayor.
2. Analizar las muestras semanales de aceite hidráulico de la unidad hidráulica, para determinar la contaminación permitida por los componentes típicos hidráulicos a resguardar.
3. Evaluar los beneficios que tiene la implementación de un sistema de mantenimiento predictivo, con base en el análisis de aceite con aplicación de la norma ISO 4406:17.



## RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

El diseño de la investigación tiene un enfoque cuantitativo y cualitativo y es de tipo no experimental con una orientación mixta, ya que no se refiere a un estudio en el que se manipulen intencionalmente una o más variables, por el contrario, solo se estudió la evolución. De acuerdo con lo mencionado anteriormente, la investigación es longitudinal. Se seleccionó longitudinal o evolutiva porque se recabaron los datos en diferentes puntos del tiempo, esto para realizar inferencias acerca de la contaminación de aceite. Las muestras se tomaron una vez a la semana durante aproximadamente tres meses, para poder evaluar la condición del problema de investigación.

La investigación fue de tipo descriptivo correlacional, ya que se hicieron mediciones en muestras de aceite para determinar su contaminación. Así mismo fue secuencial, porque seguirá un método riguroso.

El estudio es descriptivo, debido a que únicamente se pretendió medir y recolectar información de manera independiente y describirla.

Los beneficiarios de esta investigación son los colaboradores del departamento de planta de pastas, ya que con la mejora de los mantenimientos aumentó la productividad y se redujeron los gastos por mantenimiento, además es una técnica no muy aplicada para un país en vías de desarrollo. Para conseguir los objetivos de la investigación se utilizaron varias, que fueron evaluadas para establecer los valores requeridos para contestar las preguntas de la investigación.



En la primera fase se realizó la revisión documental y los antecedentes del tema a estudiar, para demostrar los trabajos previos en cuanto a los métodos y técnicas de los mantenimientos utilizados y las últimas fallas relacionadas al sistema hidráulico. En la segunda fase se realizó una evolución de los componentes hidráulicos que deben considerarse como importantes y que se deben mantener en los límites de limpieza. En la tercera fase se parametrizaron los valores de limpieza de la contaminación para cada tamaño de partícula, siendo estas de 4 $\mu$ , 6 $\mu$  y 14 $\mu$  y monitorear que se puedan mantener en sus límites, además verificar si existe alguna evolución de la misma. Por último, en la cuarta fase se procedió a filtrar el aceite, con la finalidad de mantenerse en sus valores y evitar una falla catastrófica por la contaminación y por ende extender la vida útil del aceite hidráulico.

A partir de la siguiente investigación se crearon las bases para la gestión de un sistema de mantenimiento predictivo, estableciendo así los principales componentes críticos y las variables a considerar para cumplir con la norma ISO 4406:17.

La propuesta quedó establecida y apreciada, mediante un indicador de gestión del departamento de planta de pastas, reflejando así el control de los paros de producción para garantizar la mejora en la gestión de los mantenimientos, en relación a los otros departamentos de la mina extractora de plata.

## INTRODUCCIÓN

El análisis de aceite, como herramienta de un mantenimiento predictivo, permite predecir fallas por desgaste de los mecanismos que interactúan en un sistema hidráulico, esto genera el aumento de las partículas y por consiguiente sobrepasa los límites de contaminación que puede permitir un componente típico de un sistema. La mina en estudio ve la necesidad y sobre todo la importancia de establecer un sistema de mantenimiento predictivo que pueda asegurar la mayor disponibilidad de los equipos que conforman toda la parte de la producción.

En este estudio se analizará la unidad hidráulica del departamento de planta de pastas, la cual es la encargada de impulsar todo el material que se extrajo del túnel que ya no tiene un valor económico y debe mezclarse con cemento para poder ser ingresado al túnel, por medio de tuberías e impulsado a presión. El aporte de un sistema de mantenimiento predictivo basado en análisis de aceite según la norma ISO 4406:17 permitirá que se puedan resguardar los componentes más importantes de la unidad hidráulica y a la vez regenerar el aceite y, por consiguiente, anteponerse a una falla catastrófica.

El enfoque del estudio será una innovación al mantenimiento de la unidad hidráulica, se puede obtener información de la condición instantánea del aceite hidráulico. El resultado esperado es obtener un control de la contaminación del aceite y crear una línea de tendencia, para predecir y anteponerse a un paro innecesario.

Para la factibilidad del proyecto de mantenimiento predictivo se cuenta con los recursos básicos necesarios (disponibilidad de tiempo por parte de personal de mantenimiento, información técnica de la unidad hidráulica, analizador de muestras, carro de filtración y equipo de cómputo) para la implementación del sistema.

La investigación se inició efectuando una evaluación general de la situación actual de la unidad, seguidamente, el método de muestreo, para luego formular la planificación de los registros de los parámetros que se deben evaluar y establecer los procedimientos para un mantenimiento predictivo, así mismo la limpieza del aceite para que pueda seguir utilizándose.

El estudio está estructurado en cuatro capítulos, los cuales se describen brevemente a continuación:

En el capítulo I se describe el marco teórico que detalla brevemente la importancia del papel que juega la unidad hidráulica en la planta de pastas en una mina subterránea de extracción de plata en Guatemala. Incluye el funcionamiento básico general y los componentes típicos que conforman la unidad. Además el tipo de mantenimiento que se aplicará en el estudio, tipo de equipo para el análisis de aceite con aplicación de la norma ISO 4006:17 y la filtración fuera de línea.

El capítulo II presenta los resultados con base en las variables, muestras de gráficos del comportamiento en función del tiempo, líneas de tendencia y análisis de resultados.

En el capítulo III se contempla la discusión de los resultados, con base en la norma ISO y el método adecuado para aplicarla adecuadamente, con el fin

de establecer los beneficios implementando un sistema de mantenimiento predictivo, y también se propone la implementación de un sistema de mantenimiento predictivo basado en el análisis del aceite de la unidad hidráulica en la planta de pastas en una mina extractora de plata en Guatemala.



# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1. **Importancia de la función principal de la unidad hidráulica para impulsar la pasta a túnel subterráneo en una mina extractora de plata en Guatemala**

La mina subterránea extrae los materiales a través de túneles con varias ramificaciones, lo que a su vez hace que toda la mina se quede con túneles vacíos de donde se han extraído los materiales. Muchos de los materiales extraídos no son de utilidad, por lo que se vuelve necesario ingresarlos de nuevo para rellenar los túneles.

Los materiales que no tienen ninguna utilidad se mezclan con cemento y algunos otros componentes para formar lo que se conoce como pasta, esta debe ser impulsada por tuberías al túnel, donde adentro se distribuye en ramificaciones, para así rellenar los que ya no son de utilidad.

La pasta es recibida desde otro departamento donde se procesa para ser enviada a la planta de pastas, donde es enviada a presión desde la unidad hidráulica por una tubería principal. La unidad hidráulica es la parte principal y una de las más importantes de este departamento, sin un funcionamiento óptimo retrasa la producción de la mina. Esto derivado de la acumulación del material sin utilizar en el espacio de almacenamiento y deja de ser enviada la pasta hacia los túneles.

La importancia de la disponibilidad de la unidad hidráulica y su buen desempeño es un factor importante que debe mantener el departamento de

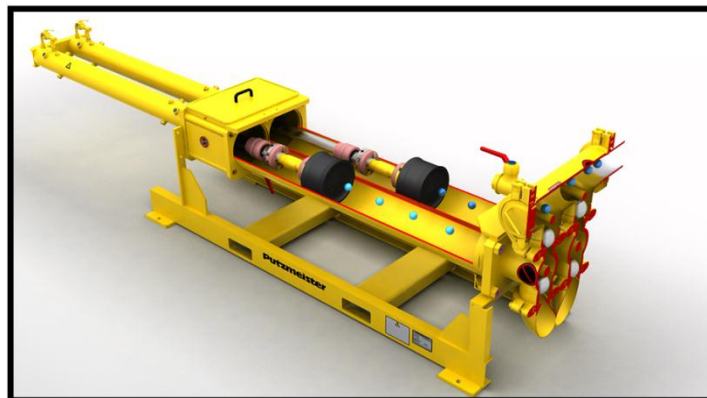
planta de pasta de la mina extractora de plata. Para mantener su capacidad de producción debe operar las 24 horas del día, durante los 365 días del año.

## 1.2. Funcionamiento básico de la unidad hidráulica

El objetivo principal de la unidad hidráulica es impulsar la pasta a través de dos cilindros hidráulicos, que funcionan alternativamente para mantener un flujo continuo y constante de suministro de pasta para toda la tubería principal de distribución. Para que esto sea efectivo la energía hidráulica que proporciona la unidad hidráulica debe ser capaz de impulsar la pasta en toda la longitud de la tubería, hasta el punto donde es recibida.

La unidad hidráulica está conformada por dos bombas de pistones axiales, ancladas a un mismo eje de un motor eléctrico de 75HP. Ambas bombas son las que mantienen a los dos cilindros trabajando alternativamente (ver figura 1) y controlados por electroválvulas, por tal razón las bombas hidráulicas son uno de los componentes críticos a resguardar en la unidad hidráulica.

Figura 1. **Cilindros hidráulicos de unidad hidráulica**



Fuente: Putzmeister. (2017). *Bombas industriales Putzmeister*.

El sistema hidráulico utiliza dos cilindros hidráulicos de doble efecto, los cuales tienen como función alternarse en la misma dirección, para succionar la pasta desde el depósito cuando se contrae hacia adentro y expulsarla hacia la tubería cuando se desplaza hacia afuera.

La unidad es controlada por un sistema automatizado electrónicamente, para que el flujo de la pasta sea continuo, también es monitoreada por el personal desde una cabina de control, equipada con cámaras de vídeo y sensores para supervisar que trabaje apropiadamente.

### **1.2.1. Unidad hidráulica**

Zamora (2016) refiere que “con carácter general, puede decirse que una máquina de fluido es un sistema mecánico que intercambia energía mecánica con un fluido que está contenido o que circula a través de él” (p. 2). Es una estación productora de caudal y presión, compuesta por varios componentes que dependerán de su aplicación. Una unidad de potencia básica está formada por un depósito o reservorio, bomba, cilindros, válvulas direccionales, filtros hidráulicos, mangueras y fluido hidráulico.

A continuación se describen los componentes básicos de una unidad hidráulica:

#### **1.2.1.1. Depósito hidráulico**

De las Heras (2011) describe “los depósitos son imprescindibles en todas las instalaciones hidráulicas, pues almacenan el aceite del sistema” (p. 369).



El depósito es el recipiente o contenedor que tiene la capacidad de almacenar el fluido hidráulico del sistema. Se compone de un tapón de llenado, un indicador de nivel y respiradero. En algunos casos también de una placa deflectora para separar el aceite que regresa al sistema y evitar que la turbulencia del fluido sea succionada.

El depósito en un diagrama hidráulico se representa con el siguiente símbolo:



#### **1.2.1.2. Unidad de potencia**

Las unidades de potencia de un sistema hidráulico son las encargadas de convertir la energía mecánica, neumática o eléctrica en energía hidráulica.

#### **1.2.1.3. Bombas hidráulicas de desplazamiento positivo**

Zamora (2016) detalla que “las bombas de desplazamiento positivo pueden ser de paletas deslizantes, externa de engranajes, interna de engranajes, de émbolo, de lóbulos, de tornillo, de tubo flexible, etcétera” (p.282)

Es el elemento mecánico encargado de producir un caudal y generar una presión en un sistema hidráulico. Generalmente pueden ser de engranajes, pistones, paletas, tornillo, centrífugas, peristálticas o de ariete, y se describen con el siguiente símbolo:



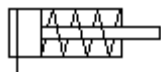
#### 1.2.1.4. Cilindros hidráulicos

Creus (2007) define:

Los actuadores hidráulicos, que son los más usuales y de mayor antigüedad en las instalaciones hidráulicas, pueden ser clasificados de acuerdo con la forma de operación, y aprovechan la energía de un circuito o instalación hidráulica de forma mecánica, generando movimientos lineales. (p.157).

Es un mecanismo formado de un cilindro dentro del cual se desliza un pistón para convertir la energía hidráulica en energía mecánica. Se utiliza para dar fuerza a través de un recorrido lineal, puede ser de simple acción, ya que su retorno es a través de un muelle, y doble acción cuando el circuito hidráulico puede actuar en ambos sentidos según se seleccione (ver figura 3). Su simbología es la siguiente:

Figura 2. Cilindros hidráulicos



Simple acción



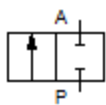
Doble acción

Fuente: elaboración propia.

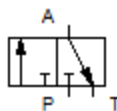
### 1.2.1.5. Válvulas direccionales

Creus (2007) expone lo siguiente: “las válvulas o distribuidoras o de control direccional se utilizan para cambiar el sentido del flujo de aceite dentro del cilindro y mover el pistón de un extremo al otro de su carrera” (p.167). Están formadas por un cuerpo con pasajes internos que dirigen el fluido en recorridos para los cuales fueron diseñadas. Pueden estar construidas con varios puertos y posiciones para su selección de trabajo, están limitadas por el caudal y presión de trabajo, a continuación se describen algunos tipos:

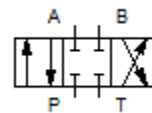
Figura 3. **Ejemplo de tipos de válvulas direccionales, según sus vías y posiciones**



2 vías / 2 posiciones



3 vías / 2 posiciones



4 vías / 2 posiciones

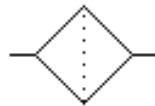
Fuente: elaboración propia.

### 1.2.1.6. Filtros hidráulicos

De las Heras (2011) describe que “los sistemas hidráulicos han de permanecer limpios y saneados para que su funcionamiento sea más eficiente y se alargue su vida útil” (p. 371). Los filtros hidráulicos son los riñones del sistema hidráulico, son encargados de purificar el fluido y deben ser colocados en puntos estratégicos para su efectividad. Algunos se colocan en la succión para evitar que ingrese fluido contaminado a la bomba, en el retorno para

eliminar las partículas por desgaste del sistema y en los filtros de presión que se instalan en la línea principal del sistema.

Se representan en un diagrama hidráulico con el siguiente símbolo:



#### **1.2.1.7. Mangueras hidráulicas**

De las Heras (2011) describe que “las mangueras son conductos flexibles, constituidos por diferentes capas de material elastómeros (SRT) o termoplásticos (TPT), reforzadas con capas de malla de acero y acabadas con una capa exterior protectora de goma o plástico” (p. 395). Son tubos flexibles capaces de transportar fluidos, también son considerados fusibles cuando existe una sobrecarga de presión en el sistema hidráulico.

Las mangueras son capaces de absorber elevaciones de presión y se clasifican por la cantidad y tipo de refuerzo. Su símbolo en un diagrama hidráulico es:

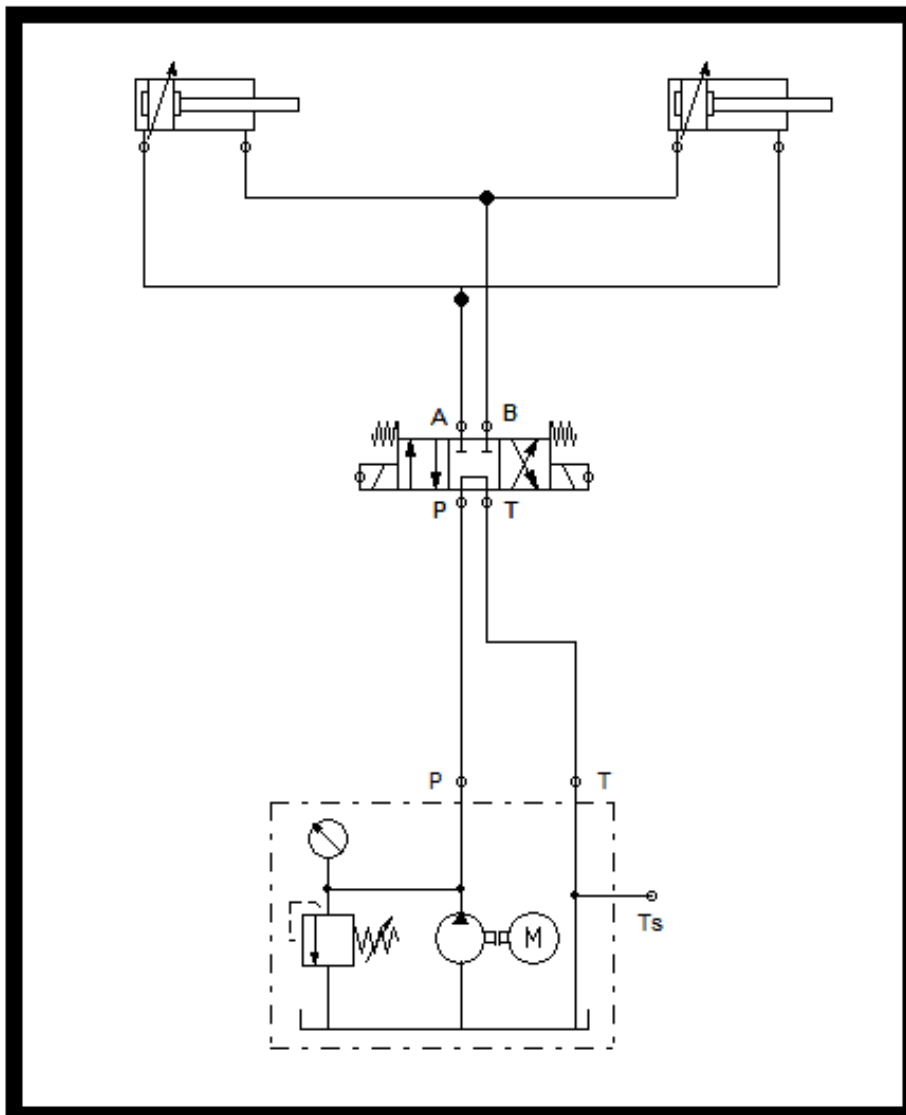


#### **1.2.1.8. Fluido hidráulico**

De las Heras (2011) define que “la selección y el cuidado del fluido oleohidráulico son primordiales para el buen funcionamiento y la duración de los componentes oleohidráulicos” (p. 353). Es utilizado como medio de transmisión

de la energía en un sistema hidráulico y pueden ser clasificados principalmente por su viscosidad y aditivos, que dependerán de su aplicación.

Figura 4. **Diagrama básico de un sistema hidráulico, con cilindros de doble efecto con desplazamientos alternados**



Fuente: elaboración propia, empleando FluidSIM.

### **1.3. Mantenimiento**

Se define habitualmente como mantenimiento al conjunto de técnicas destinadas a conservar equipos e instalaciones en servicio durante el mayor tiempo posible (buscando la más alta disponibilidad) y con el máximo rendimiento posible. (García, 2003).

Por su parte Urrutia (2016) comenta lo siguiente: “por mantenimiento se entiende básicamente cambio de aceite, filtros y revisión de niveles, podemos agregar en algunos casos cambio de fajas, ajuste de tren delantero, etc.” (p.12).

Entretanto, Conde (2010) manifiesta que “históricamente el principal objetivo de mantenimiento ha sido mantener las máquinas en marcha” (p. 33).

Como en toda industria, la maquinaria involucrada en la producción debe estar disponible el mayor tiempo posible en operación, por lo cual es importante predecir fallas y estar preparado ante cualquier eventualidad de un paro operacional. Muchas veces es impredecible cualquier falla que conforma la maquinaria de producción.

Existen diferentes tipos de mantenimientos que se utilizan en la industria, de los cuales se puede mencionar el mantenimiento preventivo y el mantenimiento correctivo. Sin embargo, en la actualidad la tecnología ha llevado a las nuevas tendencias de mantenimiento y tiene más uso el basado en la condición del equipo, conocido como mantenimiento predictivo.

### **1.3.1. Mantenimiento preventivo**

Este tipo de mantenimiento se fundamenta principalmente en realizar procedimientos y actividades específicas que indica el fabricante de la maquinaria y se llevan a cabo de forma programada, para mantener un perfecto estado de operación basado en tiempos de operación, recorrido, etc. Se respalda principalmente en las inspecciones VOSO, las cuales se basan en todos los repuestos consumibles, como filtros, lubricantes, sellos, empaques, fajas.

Este tipo de mantenimiento es muy importante, ya que periódicamente se reemplaza el aceite sucio, filtros y se limpia al agregar aceite nuevo. También se puede considerar que es un mantenimiento a ciegas, porque se podría estar reemplazando aceite y filtros que aún pudieran estar en buenas condiciones, generando gastos innecesarios.

Marrero (2010) menciona que el mantenimiento preventivo es el más conocido de todos. Es el que se viene a la mente cuando se nombra el mantenimiento. Este se convierte en una labor rutinaria. Conviene destacar que la personalización del mantenimiento preventivo nunca debe suponer disminuir las actuaciones especificadas en los protocolos del fabricante, sino solamente matizarlas y adaptarlas a las circunstancias particulares del sistema (p. 66).

Por otra parte, Urrutia (2016) indica:

El mantenimiento preventivo es el que se lleva a cabo de forma programada. Cada cierto tiempo (horas, kilómetros o meses) se cambia el aceite, se cambian filtros y se hace una inspección de fajas, niveles, estado general de los componentes de la máquina, etc. (p.12).

Así también, Garrido (2010) describe que “el mantenimiento preventivo tiene la misión de mantener un nivel de servicio determinado en los equipos, programando las correcciones de sus puntos vulnerables en el momento más oportuno” (p.17). Por tal razón es posible deducir que este tipo de mantenimiento se realiza con base en especificaciones de los fabricantes.

Sin embargo, aunque se sigan los procedimientos de un mantenimiento preventivo descrito por el fabricante, no se garantiza corregir una falla prematura de los equipos en un momento determinado.

El mantenimiento preventivo es el único aplicado en la actualidad a la unidad hidráulica, desde que la mina se encuentra en operaciones, acompañada del mantenimiento correctivo al momento de ocurrir una falla trágica.

### **1.3.2. Mantenimiento correctivo**

El mantenimiento correctivo consiste en la reparación que se ejecuta en el momento que se produce la falla, ocasionando que los equipos queden fuera de operación. Se considera el primer mantenimiento más común en todo el mundo, regularmente está basado en que la máquina siga funcionando hasta que falle, ya que no se tiene un plan programado, o bien se sabe que se tiene que hacer un mantenimiento pero no el adecuado.

En el 2003, García indicó que el mantenimiento correctivo es el conjunto de tareas destinadas a corregir las fallas que se presentan en los distintos equipos y que son comunicadas al departamento de mantenimiento por los usuarios de estos.



El mantenimiento correctivo consiste en la reparación que se realiza en el momento que ocurre una falla, produciendo que la maquinaria quede fuera de servicio (Girón, 2017).

Por su parte, Urrutia (2016) lo llama mantenimiento reactivo y es el primer tipo de mantenimiento más común en todo el mundo, ya que en la mayoría de casos la máquina se deja funcionar hasta que falle y no se tiene un plan programado.

El mantenimiento correctivo también es un mantenimiento muy costoso, sobre todo en las plantas de producción. Este tipo de mantenimiento ocasiona paros en toda la línea de producción y más aún si no se cuenta con el repuesto que se debe reemplazar por una falla inesperada.

### **1.3.3. Mantenimiento predictivo**

Es una técnica de ensayos no destructivos que se realiza sobre la maquinaria o equipo, para determinar la condición actual en la que se encuentra y de esa manera poder determinar el procedimiento a realizar para renovar su estado.

García (2003) indica que el mantenimiento predictivo utiliza herramientas adicionales al cambio de filtros y aceite, de las cuales se puede mencionar el análisis de aceite, termografía, radiografía, análisis de vibraciones para predecir fallas o evitar que progrese y tenga una falla total (p.12). Por su parte, Ledesma (2015) menciona que el mantenimiento predictivo es una estrategia de mantenimiento avanzado en los últimos años, está enfocado en los síntomas de fallas. Utilizando las distintas técnicas, como análisis de aceite, vibraciones,

ensayos no destructivos, así como las radiografías, ultrasonido, termografía, etc., permite detectar los síntomas del inicio de la falla.

Mientras tanto, Urrutia (2016) comenta que “el mantenimiento predictivo ya utiliza herramientas adicionales al cambio de aceite y filtros. Se puede mencionar análisis de aceite, termografía, vibraciones, etc.” (p.12).

En la actualidad el mantenimiento predictivo es una herramienta adecuada para orientar su labor a incrementar la disponibilidad y fiabilidad de los equipos.

Establece el estado en el que se encuentra un equipo en un momento determinado, puesto que la tecnología ha traído consigo la información en el instante de la evolución. Un equipo también puede ser monitoreado a distancia, en tiempo real.

La práctica del mantenimiento predictivo orienta su labor a incrementar la disponibilidad y fiabilidad de los equipos, por tal razón el presente trabajo está enfocado directamente en el análisis de aceite en la unidad hidráulica de la planta de pasta para una mina extractora de plata en Guatemala.

#### **1.4. Análisis de aceite como herramienta de mantenimiento predictivo**

La técnica de análisis de aceite permite analizar muestras obtenidas en el instante de adquirir un estado actual de los equipos y las condiciones en las que se encuentra operando. Existen diferentes tipos de análisis de aceite, como por ejemplo aceite lubricante para motores de combustión interna, maquinaria hidráulica, componentes hidráulicos, etc. Se pueden clasificar según sus características químicas, físicas y de contaminación.

El análisis de aceite usado de la maquinaria, mediante toma de muestras, determina la condición actual en la que se encuentran funcionando, evitando con ello llegar al punto de una falla infortunada, mediante un plan de paro proyectado.

Girón (2017) indica que la degradación de un aceite puede determinarse midiendo los parámetros de viscosidad, número básico total, número de acidez total y detergencia. Mientras que la contaminación se determina midiendo la cantidad de partículas de metales de desgaste que se encuentran disueltas en el aceite, cantidad de agua y humedad relativa.

Por otro lado, Guillén (2007) señala que el análisis de aceite permite detectar tendencias en el desgaste de los componentes del equipo, así como el estado del aceite, para optimizar los períodos de cambio. Urrutia (2016) menciona la importancia del personal a cargo del mantenimiento, ya que debe estar entrenado y debe ser involucrado en las nuevas tecnologías de filtración y muestreo para incrementar la confiabilidad de la máquina.

El entrenamiento del operador es básico para que se pueda adaptar a mejores maneras de operar una máquina que ha sido rediseñada en sus sistemas de filtración, muestreo y enfriamiento (p.11). Es de mucha importancia tomar en cuenta los siguientes factores: equipos de medición y puntos a monitoreo, tiempo de respuesta de los resultados, manejo e interpretación de los resultados obtenidos. Si alguno de estos factores falla, el análisis pierde su finalidad.

Una muestra de aceite precisará de los resultados de la técnica o herramienta que se utilice para su evaluación, obtención y transporte. Existen

diferentes maneras de obtener una muestra de aceite; se puede utilizar una bomba de succión, como se muestra en la figura 5:

Figura 5. **Bomba de succión**



Fuente: elaboración propia.

Al concordar con los autores antes mencionados, la técnica de análisis de aceite usado en la maquinaria refleja el estado en el que se encuentra el aceite lubricante.

Se puede concluir, con base en las referencias de los anteriores autores, la correlación que existe entre la contaminación y el incremento de la falla de los componentes internos y que aún no son catastróficos. Esto permite que el personal de mantenimiento pueda pronosticar fallas, preparar la reparación y evitar paros en la producción.

## **1.5. Parámetros de evaluación en análisis de aceite usado con base en norma ISO 4406:17**

Existen diferentes tipos de normas aplicadas a los análisis de aceite, como la ISO 11500 y la ISO 4406, esta última se considerará en este informe.

La norma ISO 4406:17 es la última versión. Especifica el código que se debe utilizar para definir la cantidad de partículas sólidas en el fluido utilizado en un sistema de potencia de fluido hidráulico dado. El objetivo de este código es simplificar el informe de los datos de recuento de partículas, convirtiendo la cantidad de partículas en códigos amplios, donde un aumento de un código generalmente duplicará el nivel de contaminación.

Según ISO (2017), los tamaños de partículas analizados son  $\geq 4\mu\text{m}$ ,  $\geq 6\mu\text{m}$  y  $\geq 14\mu\text{m}$ , los cuales se deben analizar con un contador de partículas automático calibrado de acuerdo a ISO 11171. Como bien se menciona anteriormente, el conteo de partículas se puede ver afectado por una variedad de factores, incluyendo la obtención de la muestra, la precisión del recuento de partículas, el contenedor de la muestra y su limpieza.

El código para niveles de contaminación que usa contadores de partículas automáticos comprende tres escalas que permiten diferenciar la dimensión y la distribución de las partículas. El primer dígito indica las partículas superiores a  $4\mu\text{m}$ , el segundo dígito las partículas superiores a las  $6\mu\text{m}$  y el tercer dígito correspondiente a las partículas superiores a las  $14\mu\text{m}$  por mililitro de fluido.

Los números de escalas se asignan de acuerdo con el número de partículas contadas por mililitro de la muestra del fluido (ver tabla I):

Tabla I. Escala de números

Number of particles per millilitre		Scale number
More than	Up to and including	
2 500 000		> 28
1 300 000	2 500 000	28
640 000	1 300 000	27
320 000	640 000	26
160 000	320 000	25
80 000	160 000	24
40 000	80 000	23
20 000	40 000	22
10 000	20 000	21
5 000	10 000	20
2 500	5 000	19
1 300	2 500	18
640	1 300	17
320	640	16
160	320	15
80	160	14
40	80	13
20	40	12
10	20	11
5	10	10
2,5	5	9

Fuente: ISO 4406:17.

La norma indica que se tomará los dígitos uno después de otro en cada tamaño de partículas en el orden de 4µm, 6µm y 14µm.

Ejemplo:

Un código 20/17/14 significa que hay más de 5 000 y hasta incluyendo 10 000 partículas iguales o superiores a 4µm, más de 640 y hasta incluyendo 1300 partículas iguales o superiores a 6µm y más de 80 y hasta incluyendo 160 partículas iguales o superiores a 14µm en un mililitro de muestra obtenida.

## **1.6. Equipo de medición para conteo de partículas**

El conteo de partículas consiste en medir la contaminación sólida en el lubricante, mediante el conteo y la clasificación del grado de contaminación en función del tamaño de la partícula.

El analizador de muestras de aceite para conteo de partículas utilizado en esta investigación tiene por nombre lcount, de la marca Parker, es un equipo portátil para el control de la contaminación de aceite hidráulico y también puede utilizarse para combustible diésel. Es un contador para el control de la contaminación muy preciso, rápido, sencillo y económico. Además es un recurso innovador ante el reto de controlar la limpieza de los aceites hidráulicos y combustible diésel. Es utilizado en aplicaciones de energía renovable, marina, fabricación de vehículos, agricultura y en aplicaciones militares, maquinaria de minería y aeroespaciales. Puede tomar muestras en el punto, desde el depósito hidráulico e incluso en las líneas de alta presión, hasta un máximo de 350 bares.

Parker (2011) menciona que el contador de partículas incorpora un sofisticado detector láser que emplea la técnica de bloqueo de luz en una celda de flujo. Este procedimiento proporciona una medición continua del flujo que circula por el capilar. Las mediciones son estándar, cada segundo, pero los intervalos de medición y períodos de prueba pueden ser definidos por el usuario. Los resultados son transmitidos inmediatamente y actualizados en tiempo real. Los datos se representan en un monitor digital incorporado y pueden ser recopilados en una interfaz a la web incorporada por medio de un cable RJ45.

La tecnología de detección láser contrastada es una práctica de Parker en el desarrollo de oscurecimiento y bloqueo de la luz láser.

Figura 6. **Contador de partículas Icount, marca Parker**



Fuente: Parker Hannifin. (2011). *Analizador de muestras de aceite Parker Icount*. Recuperado de: <http://www.parkerhfde.com/pdf/conmon/fdcb528es.IOS.Spanish.pdf>

### **1.7. Limpieza de los fluidos requeridos para componentes hidráulicos típicos**

Se debe considerar que el fabricante de la maquinaria no siempre toma en cuenta el ambiente donde el equipo estará operando. Por tal razón es indispensable que se evalúen los niveles de limpieza del aceite hidráulico para así poder minimizar los daños prematuros.



Bilbao (2014) menciona que “algunos fabricantes de maquinaria proponen especificaciones de código ISO, otros exigen para validar las garantías”. (p.10)

Los aceites, aun siendo nuevos, en muchas ocasiones no cumplen los niveles de limpieza, por lo cual es necesario analizar la muestra y he ahí la importancia de colocar filtros hidráulicos fuera de línea.

La tabla II muestra algunos componentes con los niveles de limpieza recomendados, pero lo ideal es consultar con la ficha técnica de los componentes hidráulicos, esto servirá para la selección de los filtros y por garantía de los equipos.

Tabla II. **Niveles de limpieza de componentes hidráulicos típicos**

<b>Limpieza del Fluido para los Componentes Hidráulicos Típicos</b>	
<b>Componentes</b>	<b>Código ISO</b>
Válvulas de Servo control	17/14/11
Válvulas Proporcionales	18/15/12
Bombas/ motores de paleta y piston	19/16/13
Válvulas de control de presión y direccional	19/16/13
Motores/bombas engranes	20/17/14
Cilindros, válvulas de control de flujo	21/18/15
Fluido nuevo, sin usar	21/18/15

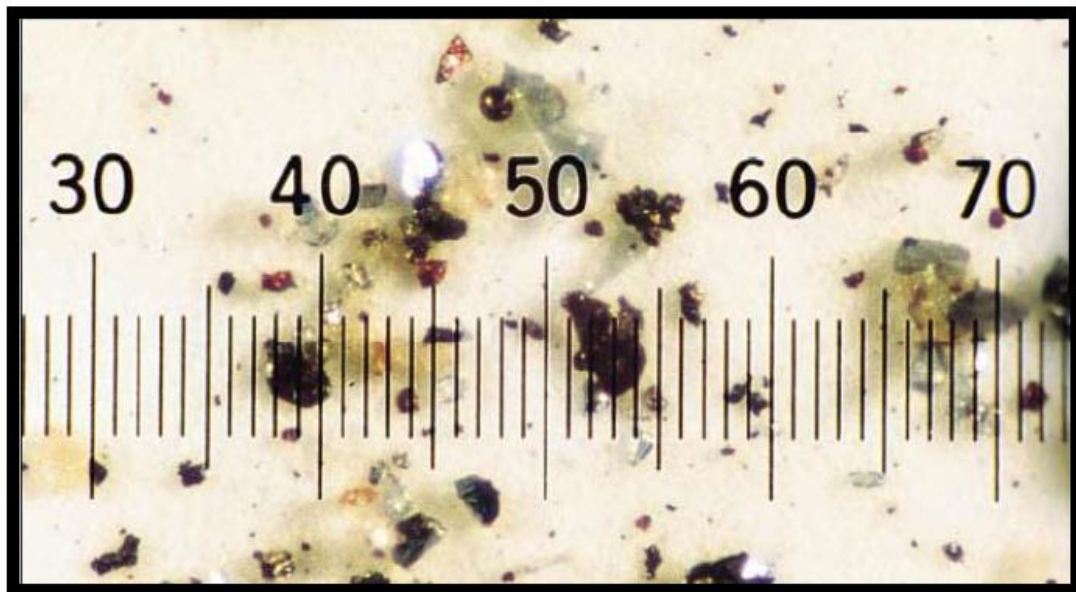
Fuente: Parker Hannifin. (2011). *Analizador de muestras de aceite Parker lcount*. Recuperado de: <http://www.parkerhfde.com/pdf/conmon/fdcb528es.IOS.Spanish.pdf>

## 1.8. Equipos de sistema de filtración hidráulica

Existen diferentes tipos y equipos de filtrado para aceite hidráulico.

También existen filtros para retener agua y otros para partículas, los filtros para partículas van en función del tamaño de partículas a filtrar y se miden en micrones.

Figura 7. **Fotografía microscópica de contaminación por partículas (ampliación 100x, escala: 1 división = 20 micrones)**



Fuente: Parker Hannifin. (2011). *Analizador de muestras de aceite Parker Icount*. Recuperado de: <http://www.parkerhfde.com/pdf/conmon/fdcb528es.IOS.Spanish.pdf>

Los carros de filtración son portátiles y únicamente necesitan reemplazar el elemento filtrante. Se utilizan principalmente para filtrar fluidos nuevos,

transferir los fluidos entre depósitos a sistemas, complementar sistemas actuales de filtración y remover agua del sistema.

Es necesario seleccionar el elemento filtrante conforme al tamaño de partículas que se desea filtrar. Para reducir el grado de contaminación se utilizan filtros de  $4\mu\text{m}$ ,  $6\mu\text{m}$  y  $14\mu\text{m}$ , tal como lo indica la norma ISO 4406:17 en esta investigación.

Figura 8. **Carro de filtración**



Fuente: Parker Hannifin. (2011). *Carros de filtración Parker*. Recuperado de:  
<http://www.iatsamexico.com/Pdf/Hca/Carro%20deFiltracion.pdf>

## **2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN**

### **2.1. Método de análisis**

El objetivo de estudio del presente trabajo es la aplicación del mantenimiento predictivo basado en el análisis de aceite, con aplicación de la norma ISO 4406:17, por tal razón se tomaron muestras desde el mes de marzo al mes de julio del año 2017, tomando una muestra aproximadamente por semana, para determinar los cambios de contaminación por partículas durante ese lapso de tiempo, ya que el aceite hidráulico había sido reemplazado completamente durante esos días.

Todo aceite siempre corre el riesgo de contaminarse y oxidarse desde el momento en que se destapa el recipiente que proporciona el fabricante, de igual forma es también vulnerable a contaminarse, lo cual dependerá de la técnica utilizada para extraer la muestra, así como del recipiente donde se desea transportarla, puesto que existen recipientes especiales para no crear alguna alteración.

### **2.2. Fase 1. Técnica para la extracción de la muestra**

Las muestras fueron extraídas utilizando una bomba manual de succión, que incluye una manguera plástica, la cual cumple con los requerimientos para este tipo de muestreo, y un recipiente especial para el transporte para así poder evitar algún tipo de contaminación. En la figura 9 se muestra la bomba de succión o de vacío para obtener la muestra donde luego fue depositada en un recipiente para poder realizar el análisis.

Figura 9. **Bomba de succión**



Fuente: elaboración propia.

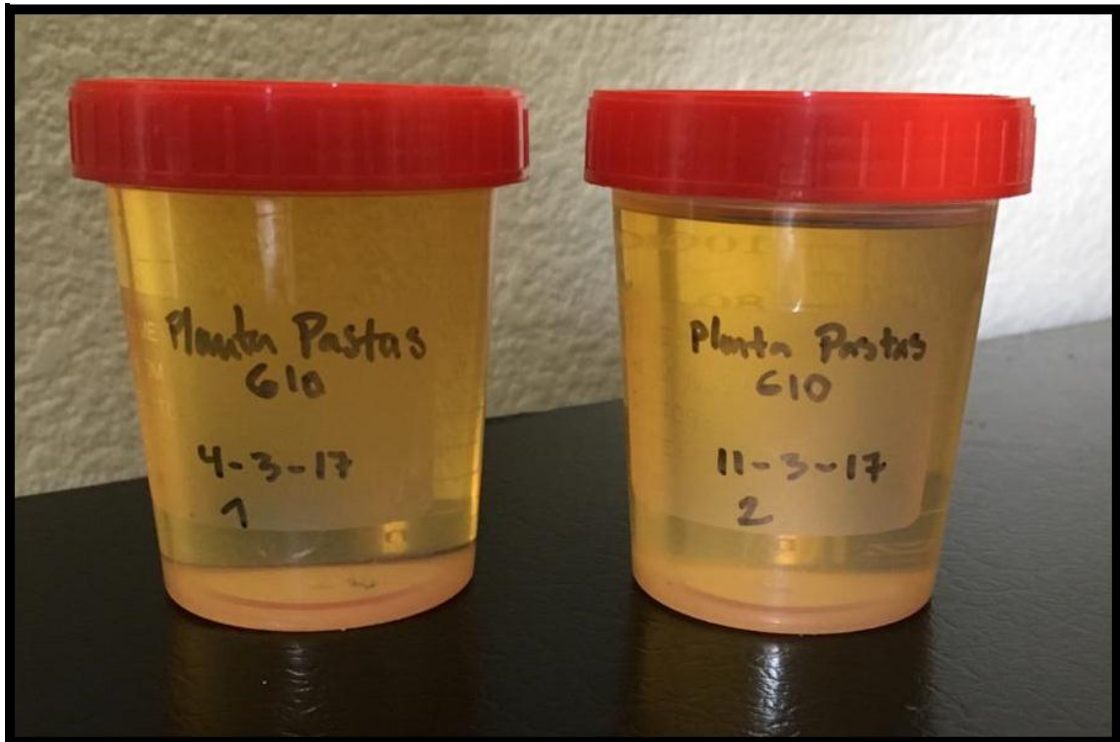
Cada muestra se extrae desde el depósito hidráulico, debido a que allí se recibe el aceite que ya realizó su función y por tal razón las partículas se mantienen en suspensión, producidas por el desgaste de los componentes mecánicos, favoreciendo así los datos que se desean obtener, y luego es succionado nuevamente desde el depósito por la bomba hidráulica para empezar de nuevo el ciclo.

La muestra obtenida se coordinó con el supervisor del departamento de la planta de pastas, para que se obtuviera el permiso de acceder al depósito hidráulico de la unidad.

Se desea registrar físicamente cada muestra obtenida, de tal manera que quede un testigo durante el proceso de la evaluación de la investigación, debe ser resguardada en un recipiente especial para su transporte y almacenaje, sin que pueda ocurrir alguna alteración en la muestra.

Toda muestra que se obtuvo fue etiquetada con la fecha y el número de muestra, para tener un registro consecutivo de todos los testigos y que si en algún momento pueda existir alguna duda con el resultado, se pueda nuevamente realizar el análisis.

Figura 10. **Recipientes para almacenaje de la muestra**



Fuente: elaboración propia.

Estos recipientes son especiales para el transporte, almacenaje, degradación o alteración química y no alteran la evaluación de la muestra, por tal razón no puede utilizarse cualquier otro tipo de recipiente que no cumpla las características de los recipientes.

Figura 11. Especificaciones técnicas del aceite hidráulico Energol HLP-HM 46

Características Típicas					
	Método de Ensayo	Unidades	Grado		
			32	46	68
Density at 15 °C	ISO3675/ASTM D1298	kg/m <sup>3</sup>	876	879	882
Flash Point (COC)	ISO2592/ASTM D92	°C	216	225	240
Kinematic Viscosity at 40 °C	ISO3104/ASTM D445	mm <sup>2</sup> /s	32	46	68
Kinematic Viscosity at 100 °C	ISO3104/ASTM D445	mm <sup>2</sup> /s	5.4	6.76	8.7
Viscosity Index	ISO2909/ASTM D2270-		100	100	100
Pour Point	ISO3016/ASTM D97	°C	-30	-30	-30
Colour	ISO 2049/ASTM D1500		1.0	1.5	L2.0
Neutralisation Value	ASTM D664	mgKOH/g	0.7	0.7	0.7
Foam Tendency/Stability:					
Sequence I : 24°C	ASTM D892	ml	5/0	10/0	10/0
Sequence II : 93°C		ml	20/0	30/0	30/0
Sequence III : 24 after 93°C		ml	5/0	10/0	10/0
Copper Corrosion (100°C, 3h)	ASTM D130	-	1b	1b	1b
Corrosion-Rust Protection B	ASTM D665	-	pass	pass	Pass
Seal Compatibility Index	IP 278		15	13	10
24h/100°C					
FZG test (failure load stage)	ASTM D5182	load stage	11	12	12
A/8.3/90°C					

Las cifras anteriores son las típicas que se obtienen con tolerancias de producción normales y no constituyen una especificación.

Fuente: Energol. (2005). *Especificaciones técnicas del aceite.*

Las especificaciones que describe la ficha técnica del aceite hidráulico Energol HLP-HM 46 definen las características fisicoquímicas, pero no indican los parámetros de contaminación, puesto que esto depende de las fichas técnicas de los componentes hidráulicos que se desean resguardar, como lo muestra la siguiente tabla:

Tabla III. **Límites permisibles de niveles de limpieza de componentes hidráulicos típicos**

Limpieza del Fluido para los Componentes Hidráulicos Típicos	
Componentes	Código ISO
Válvulas de Servo control	17/14/11
Válvulas Proporcionales	18/15/12
Bombas/ motores de paleta y piston	19/16/13
Válvulas de control de presión y direccional	19/16/13
Motores/bombas engranes	20/17/14
Cilindros, válvulas de control de flujo	21/18/15
Fluido nuevo, sin usar	21/18/15

Fuente: Parker Hannifin. (2011). *Analizador de muestras de aceite Parker Icount*. Recuperado de: <http://www.parkerhfde.com/pdf/conmon/fdcb528es.IOS.Spanish.pdf>

### 2.3. Fase 2. Recolección de datos

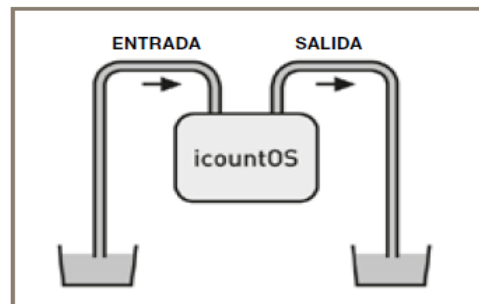
La primera muestra de aceite usado para la realización del análisis fue extraída el 4 de marzo de 2017, la unidad hidráulica trabaja las 24 horas, los 7 días de la semana.

Las condiciones de uso y características para tomar muestras con el analizador Icount Parker son las siguientes:



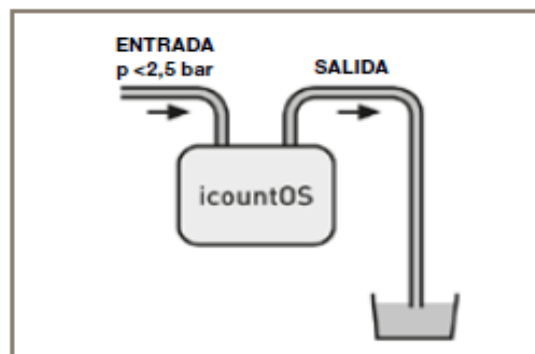
Existen dos maneras en las que se puede realizar el análisis de la muestra, siendo una tomando un testigo y analizándola y la otra obteniéndola a través de una línea de presión del sistema, como se muestran en las siguientes figuras:

Figura 12. **Análisis de muestra con un testigo obtenido de la unidad hidráulica desde el reservorio**



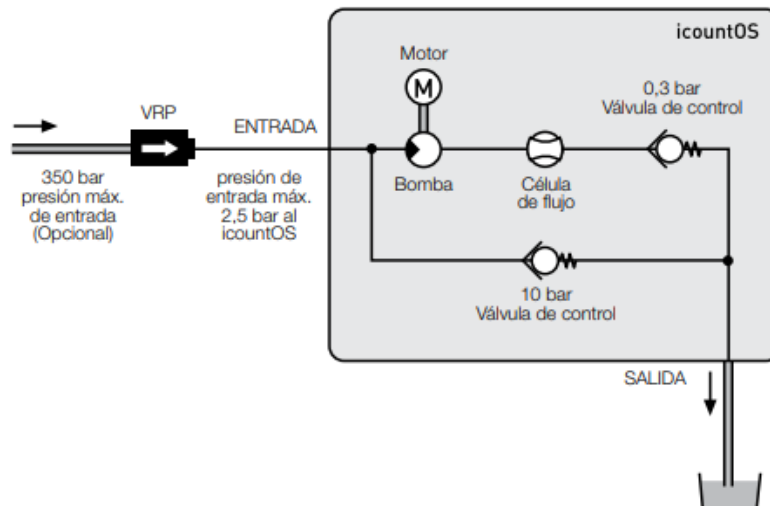
Fuente: Parker Hannifin. (2011). *Analizador de muestras de aceite Parker Icount*. Recuperado de: <http://www.parkerhfde.com/pdf/conmon/fdcb528es.IOS.Spanish.pdf>

Figura 13. **Análisis de muestra desde una línea de presión máxima de hasta 350 bar**



Fuente: Parker Hannifin. (2011). *Analizador de muestras de aceite Parker Icount*. Recuperado de: <http://www.parkerhfde.com/pdf/conmon/fdcb528es.IOS.Spanish.pdf>

Figura 14. **Circuito hidráulico para el análisis de la muestra**



Fuente: Parker Hannifin. (2011). *Analizador de muestras de aceite Parker Icount*. Recuperado de: <http://www.parkerhfde.com/pdf/conmon/fdcb528es.IOS.Spanish.pdf>

El método que utiliza el analizador de muestras Parker Icount es la técnica de detección láser contrastada, es un proceso de oscurecimiento y bloqueo de la luz que emite el láser, en un término sencillo, de una columna controlada del fluido hidráulico, este entra a la cámara del escáner óptico del láser, como lo muestra la figura 15:

Figura 15. **Flujo hidráulico controlado para la detección de la partícula**



Fuente: Parker Hannifin. (2011). *Analizador de muestras de aceite Parker Icount*. Recuperado de: <http://www.parkerhfde.com/pdf/conmon/fdcb528es.IOS.Spanish.pdf>

La información que se obtiene en el analizador es el código de la norma ISO 4406:17, el cual representa la cantidad de partículas con base en el código y el tamaño de la partícula, como lo muestra la pantalla del analizador.

Figura 16. **Resultado que se presenta en la pantalla digital**



Fuente: Parker Hannifin. (2011). *Analizador de muestras de aceite Parker lcount*. Recuperado de: <http://www.parkerhfde.com/pdf/conmon/fdcb528es.IOS.Spanish.pdf>

Lo que indica el analizador en la figura 6 es un código ISO 4406:17, 22/19/15.

Se realizaron tomas de muestras durante el mes de marzo al mes de julio del año 2017, ya que esto representa cerca de tres meses de toma de datos, haciendo un trabajo continuo de aproximadamente 3360 horas, un dato considerable para poder predecir el crecimiento de la contaminación en el aceite, puesto que el fabricante recomienda el reemplazo del aceite cada 5000 horas de uso, sin embargo la norma ISO 4406:17 establece los parámetros permitidos de contaminación en los componentes para así poder extender la vida útil del aceite, si sus propiedades fisicoquímicas no han sido alteradas.

#### 2.4. Fase 3. Presentación y análisis de datos

Los datos de las muestras obtenidas con el analizador de muestras lcount de Parker son las siguientes:

Tabla IV. Resultados obtenidos de la muestras de campo

<b>Muestra</b>	<b>Fecha</b>	<b>código ISO 4406:17</b>
1	sábado, 4 de marzo de 2017	17/15/11
2	sábado, 11 de marzo de 2017	18/15/2
3	sábado, 18 de marzo de 2017	17/15/12
4	sábado, 25 de marzo de 2017	17/15/12
5	sábado, 1 de abril de 2017	17/16/12
6	sábado, 8 de abril de 2017	18/16/13
7	sábado, 15 de abril de 2017	19/18/14
8	sábado, 22 de abril de 2017	21/19/14
9	sábado, 29 de abril de 2017	23/19/16
10	sábado, 6 de mayo de 2017	17/14/11
11	sábado, 13 de mayo de 2017	17/14/11
12	sábado, 20 de mayo de 2017	18/14/11
13	sábado, 27 de mayo de 2017	17/15/11
14	sábado, 3 de junio de 2017	17/14/11
15	sábado, 10 de junio de 2017	17/14/12
16	sábado, 17 de junio de 2017	17/14/11
17	sábado, 24 de junio de 2017	18/14/11
18	sábado, 1 de julio de 2017	17/16/12
19	sábado, 8 de julio de 2017	19/18/12
20	sábado, 15 de julio de 2017	19/18/12
21	sábado, 22 de julio de 2017	21/19/13

Fuente: elaboración propia.

## **2.5. Fase 4. Determinación de planes de acción**

Durante la recolección de datos se detectaron anomalías en la semanas de la 7 a la 9, por tal razón se implementó la técnica de filtrado fuera de línea para reducir los índices de contaminación y luego realizar un análisis por la variación de partículas, un método de análisis por espectrometría para detectar qué tipo de contaminación de metales o algún otro tipo de contaminación se puede detectar, este método es una técnica muy diferente a la que se aplicó en esta investigación, como lo es la ISO 4406:17.

En la semana 7 se obtuvo un aumento de la contaminación, pero no se consideró filtrar en ese momento, hasta ver la evolución de la contaminación que se obtendría en la siguiente semana. En la semana 8 se vio nuevamente un aumento de la contaminación, por tal razón se estaba creando una línea de tendencia que demuestra el crecimiento de la contaminación. En la semana 9 se pudo observar que seguía creciendo la contaminación y por tal razón se toma la decisión de filtrar el aceite, con un sistema de filtración que se conoce fuera de línea, puesto que no interviene con parte del circuito hidráulico de la unidad.

Figura 17. **Carro de filtración**



Fuente: Parker Hannifin. (2011). *Analizador de muestras de aceite Parker Icount*. Recuperado de: <http://www.parkerhfde.com/pdf/conmon/fdcb528es.IOS.Spanish.pdf>

La filtración hidráulica fuera de línea es el método práctico para reducir los niveles de contaminación, con base en los datos que muestra el analizador se debe seleccionar el filtro para el tamaño de partícula que se desea reducir.

Para esta corrección que se realizó en la semana 9 se observó que las partículas de  $4\mu$ ,  $6\mu$  y  $14\mu$  habían aumentado en cantidad, por tal razón se toma la decisión de filtrar el tamaño más pequeño, que es de  $4\mu$  y por consiguiente se reduce también el tamaño de partículas más grandes de  $6\mu$  y  $14\mu$ , en caso contrario, si se detecta solo aumento de contaminación por partículas de  $6\mu$  ó  $14\mu$ , se debe utilizar un filtro para reducir específicamente ese tamaño de partícula y considerablemente reducirá el tamaño de partícula mayor a la que se está reduciendo.

Tabla V. **Desempeño del elemento filtrante**

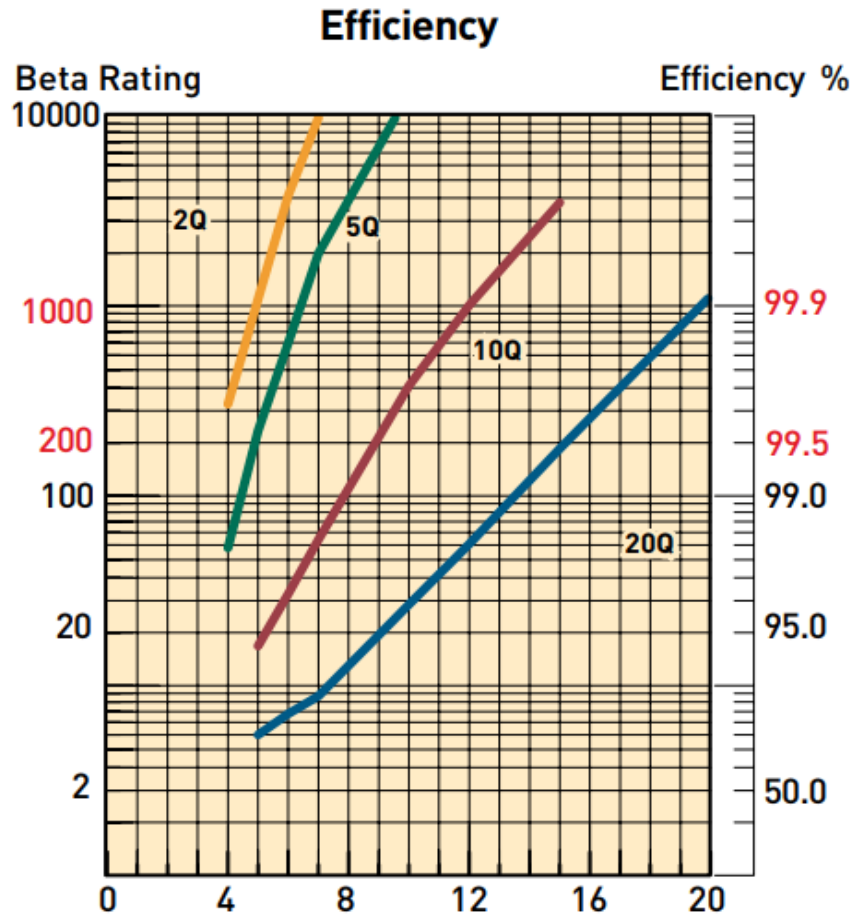
Código del Material del Elemento	Material del Elemento	Capacidad (gramos)
40W	Malla Metálica	*
40SA	Sintético	*
20Q	Microglass III	140
10Q	Microglass III	135
05Q	Microglass III	130
02Q	Microglass III	110

Fuente: Parker Hannifin. (2011). *Analizador de muestras de aceite Parker Icount*. Recuperado de: <http://www.parkerhfde.com/pdf/conmon/fdcb528es.IOS.Spanish.pdf>

El carro filtrante utiliza un filtro primario y uno secundario, el primero sirve para retener partículas grandes y no saturar el filtro que se colocó para la filtración de la partícula deseada.

En este estudio en el carro filtrante se colocó un filtro de 20 $\mu$  en la entrada o filtro principal y uno de 2 $\mu$  en la salida o filtro secundario.

Figura 18. Eficiencia de filtros en función del tamaño de partícula



Fuente: Parker Hannifin. (2011). *Analizador de muestras de aceite Parker Icount*. Recuperado de: <http://www.parkerhfde.com/pdf/conmon/fdcb528es.IOS.Spanish.pdf>

## 2.6. Fase 5. Revisión y mejora continua

Este es el modelo sugerido para el control de la contaminación utilizando la norma ISO 4406:17, para poder crear una línea de tendencia de la contaminación y así poder ir reduciendo ese grado y tener equipos que operen con mayor eficiencia o, de lo contrario, analizar las posibles causas que producen esa alteración en la contaminación.



## 2.7. Instrumentos de recopilación de datos y equipo de limpieza

- Equipo para análisis de aceite: se utilizó el equipo de análisis de muestra Icount, de la marca Parker, el cual es un equipo versátil utilizado en la industria minera, aeroespacial, energía renovable, agricultura, industria marina y militar. Fácil de utilizar debido a que es un equipo portátil para tomar muestras en campo.

Figura 19. Analizador de muestras de aceite Parker Icount (IOS)



Fuente: Parker Hannifin. *Analizador de muestras Icount Parker*. Recuperado de:  
<http://www.parkerhfde.com/pdf/common/fdcb528es.IOS.Spanish.pdf>.

Figura 20. **Características y especificaciones técnicas del analizador aceite Parker Icount**

Característica	Especificación
Tiempo de arranque del producto	10 segundos como mínimo
Período de medición	Por defecto 30 segundos de funcionamiento, 15 segundos de almacenamiento de datos.
Intervalo de información	Almacenamiento de datos en el IOS una vez por segundo. Salida por la conexión RJ45
Principio de funcionamiento	Detección óptica por láser de las partículas contaminantes
Rango de códigos internacionales	Hasta ISO 22 (código +/- 1 ISO) NAS 0-12
Calibración	Calibración según métodos en línea reconocidos, confirmados por los procedimientos ISO correspondientes. MTD - mediante un detector automático de partículas certificado ISO 11171 aplicando los principios ISO 11943. Informe de distribución de partículas a ISO 4406:1999
Recalibración y servicio	Recomendación: cada 12 meses
Presión de trabajo	2,5-350 bar (35-5000psi). Las presiones de más de 2,5 bar requieren el uso de la Válvula de Reducción de Presión Parker (PRV) – ACC6NN027
Viscosidad de trabajo	1-300 cSt
Rango de flujo por el IOS	40-140 ml/minuto; controlado a 60 ml/min por la bomba interna del IOS
Interface de conexión de flujo	ENTRADA: 6 mm a presión DRENAJE: 4 mm a presión
Temperatura ambiente para almacenaje de la unidad	-40°C a +80°C
Temperatura de funcionamiento de la unidad	-30°C a +80°C
Rango de humedad de funcionamiento	5% HR a 100% HR
Temperatura de funcionamiento del fluido (aceite)	+5°C a +80°C
Temperatura de funcionamiento del fluido (combustible)	-20°C a +70°C
Sensor de humedad	Escala lineal en el rango 5% RH a 100% RH
Compatibilidad con ordenadores	Conexión RJ45 clase IP68 que puede ser conectada a la entrada LAN RJ45 de un ordenador con el cable de 2 m suministrado
Requisitos energéticos	Fuente de alimentación regulada suministrada con la unidad
Certificación	Clase IP54 (unidad abierta) clase IP67 (unidad cerrada) Declaración de Conformidad EC Directiva de Máquinas EMC EN61000-6-3:2001 EMC EN61000-6-2:2001 EMC EN61010-1:2001 Certificación CE

Fuente: Parker Hannifin. *Analizador de muestras Icount Parker*. Recuperado de:  
<http://www.parkerhfde.com/pdf/common/fdcb528es.IOS.Spanish.pdf>.

- Carro de filtración: es un sistema de filtración fuera de línea de la marca Parker, por lo cual no debe colocarse en alguna de las líneas del sistema hidráulico, cuenta con dos carcasas portadoras de elementos filtrantes, la primera es la de la entrada del aceite y debe de ser de mayor tamaño

que el micrón a recibir, y la segunda es la de salida y tiene como función filtrar el tamaño de la partícula deseada. Se utiliza también para transferir aceite de un punto a otro, para llenar un sistema de fluido nuevo, rellenar y remover el agua con filtros especiales.

Figura 21. **Toma de muestra de un contenedor de aceite utilizando el carro de filtración**



Fuente: Parker Hannifin. *Analizador de muestras lcount Parker*. Recuperado de:  
<http://www.parkerhfde.com/pdf/common/fdcb528es.IOS.Spanish.pdf>.

Figura 22. **Características y especificaciones técnicas del carro de filtración**

<p><b>Viscosidad Máxima del Fluido Recomendada:</b>                      5 MFP – 3000 SUS (627 cST)                      0.85 gravedad específica</p> <p>10 MFP – 500 SUS (108 cST)                      0.85 gravedad específica</p> <p><b>Indicador Visual (filtro de salida):</b></p> <p><b>Indicador Tipo Diferencial</b>                      Con 3 bandas (limpio, cambiar y ByPass)</p> <p><b>Válvula de Paso de Flujo del Filtro</b>                      (integrada al elemento):</p> <p>Entrada – 3psid (0.2 bar)                      Salida – 35 psid (2.4 bar)</p>	<p><b>Temperatura de Operación:</b></p> <p>Opción de sello "B" (estándar)                      -40°F a +150°F (-40°C a +66°C)</p> <p>Opción de sello "V" (para altas temperaturas)                      -15°F a +200°F (-26°C a +93°C)</p> <p><b>Requerimientos Eléctricos:</b></p> <p>5 MFP – 110/120 Volts, 60/50 HZ, Monofásico, 8/4 Amp.                      10 MFP – 110/120 Volts, 60/50 HZ, Monofásico, 10/5 Amp.</p> <p><b>Motor Eléctrico:</b></p> <p>5 MFP – ½ Hp @ 1725 rpm O.D.P.                      10 MFP – ¾ Hp @ 3450 rpm O.D.P.                      Con protección termomagnética para sobre carga</p>	<p><b>Construcción:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Marco de acero</li> <li>• Tapas de filtros de aluminio</li> <li>• Cuerpo de los filtros de acero</li> <li>• Mangueras de PVC (estándar)</li> <li>• EPDM (opción para altas temperaturas)</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tubo rígido de los extremos de PVC (estándar)</li> <li>• Tubo de acero (opción para altas temperaturas)</li> <li>• Peso: 110lb (45.5 Kg)</li> </ul>
---	---	---

Fuente: Parker Hannifin. *Analizador de muestras Icount Parker*. Recuperado de:  
<http://www.iatsamexico.com/Pdf/Hca/Carro%20deFiltracion.pdf>.



### 3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Para alcanzar los objetivos se presentan los siguientes resultados, el cual es un método adecuado para poder monitorear el comportamiento de la tendencia de la contaminación, es a través de gráficos que describen la contaminación en función del tiempo.

El incremento de la contaminación por partículas en un aceite hidráulico está relacionado en un 70% con fallas mecánicas, por eso es de suma importancia este tipo de mantenimiento predictivo, para hacer los equipos más eficientes y evitar fallas prematuras o paros innecesarios en la producción.

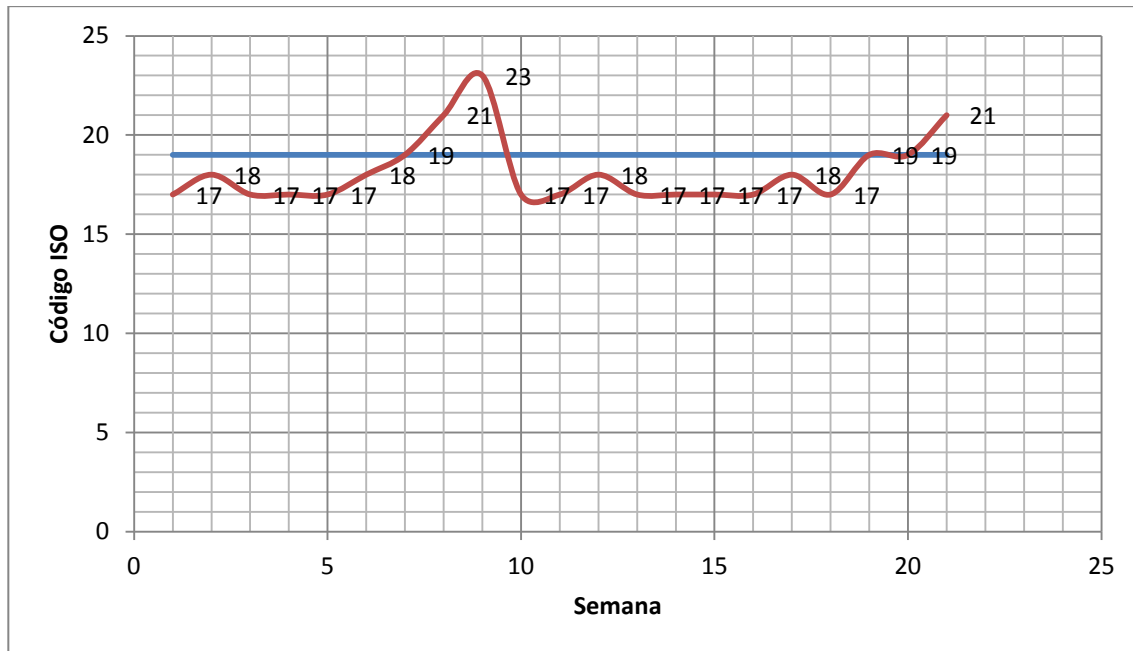
A continuación se representa gráficamente el resultado obtenido de los tres tamaños de partículas que establece la norma ISO 4406:17 durante el proceso de la toma de muestras, se puede observar en el eje vertical el código ISO requerido o esperado y el código ISO obtenido para partículas de 4 $\mu$ , 6 $\mu$  y 14 $\mu$ , por otra parte, en el eje horizontal se muestran las 21 semanas en las que se realizó el estudio.

Además se puede identificar de la semana 7 a la 9 el crecimiento de la contaminación, creando una línea de tendencia de suma importancia, que puede revelar una falla en algún componente mecánico que interactúa en el funcionamiento de la unidad hidráulica.

Es importante identificar cómo la contaminación se redujo en la semana 10, luego de haber realizado una filtración fuera de línea con el carro de filtración y el tipo de filtro adecuado, para así poder seguir prolongando la vida

útil del aceite y no tener que realizar reemplazos innecesarios del mismo y por ende también contribuir al medio ambiente.

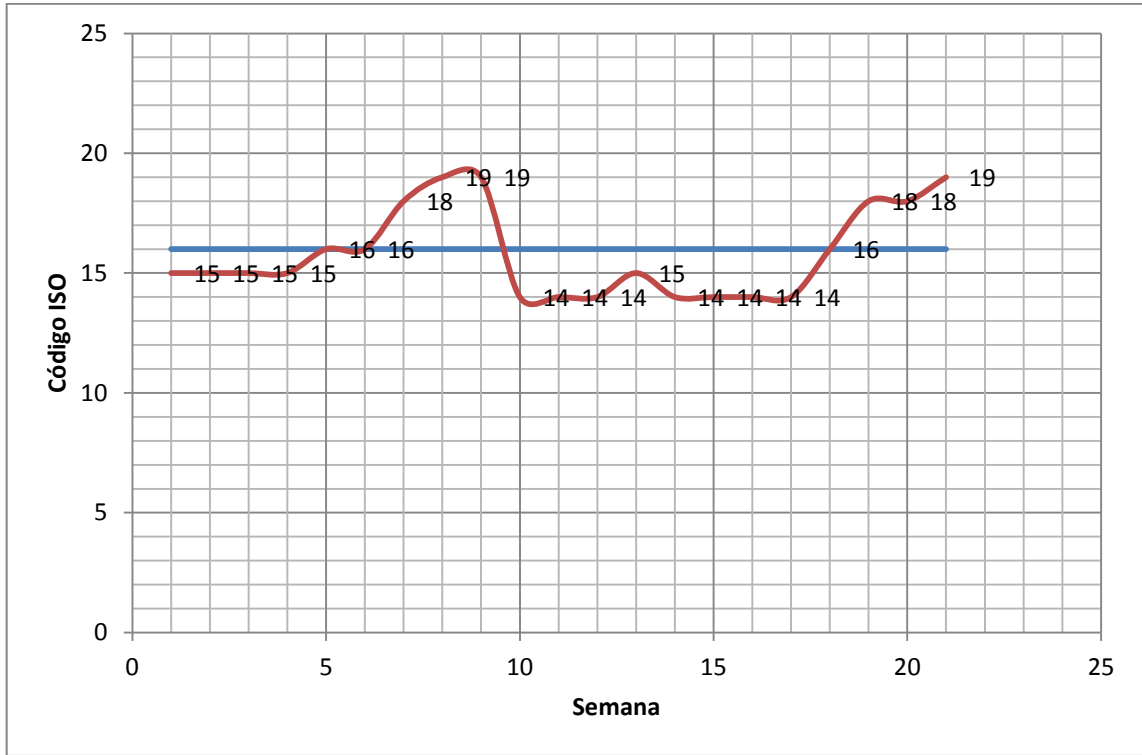
Figura 23. **Gráfico para partículas de 4 $\mu$**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 23 se muestra el comportamiento de la contaminación del aceite por partículas de 4 $\mu$ , así mismo el comportamiento durante las 21 semanas del desarrollo de la investigación. Se puede también observar una variación considerable entre la semana 7 y la 9, se muestra el procedimiento de limpieza para reducir la contaminación después de haber detectado una elevación considerable de la misma.

Figura 24. Gráfico para partículas de 6 $\mu$

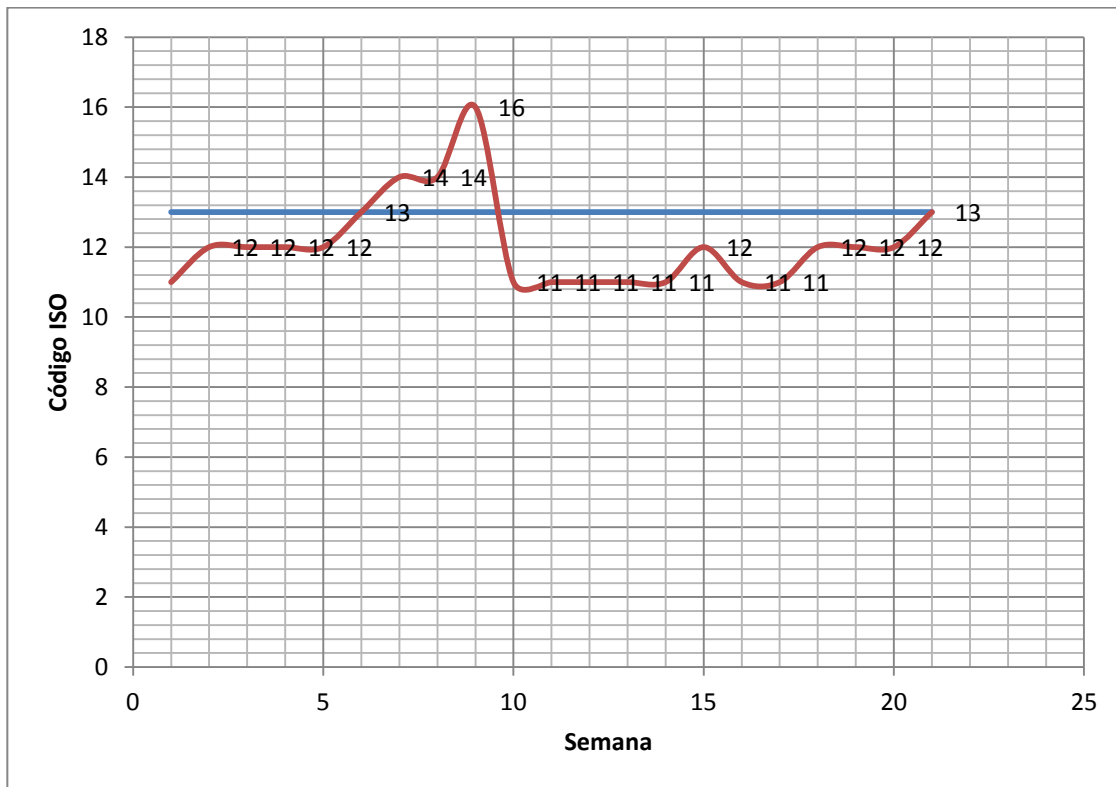


Fuente: elaboración propia.

La figura 24 muestra el comportamiento de la contaminación de aceite por partículas de 6 $\mu$ , al igual que el comportamiento de la gráfica anterior, las partículas de 4 $\mu$  también sufrieron un cambio de la semana 7 a la semana 9 y se reduce considerablemente en el transcurso de las siguientes semanas.



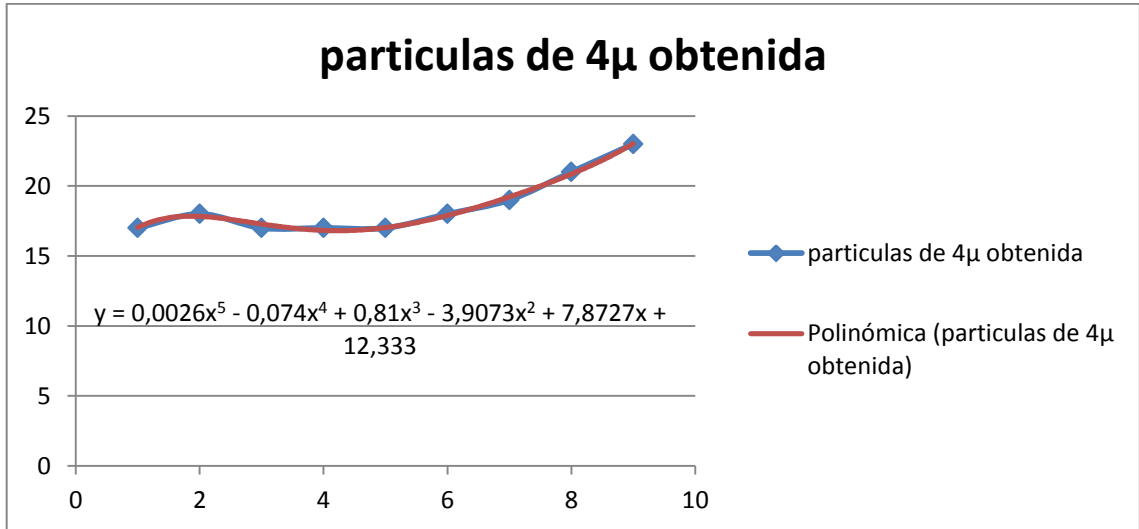
Figura 25. Gráfico para partículas de 14 $\mu$



Fuente: elaboración propia.

En la figura 25 se muestra el comportamiento de la contaminación del aceite por partículas de 14 $\mu$  durante las 21 semanas del estudio, así mismo un comportamiento muy similar de aumento de la contaminación en la semana número 9, en partículas de 4 $\mu$  y 6 $\mu$ .

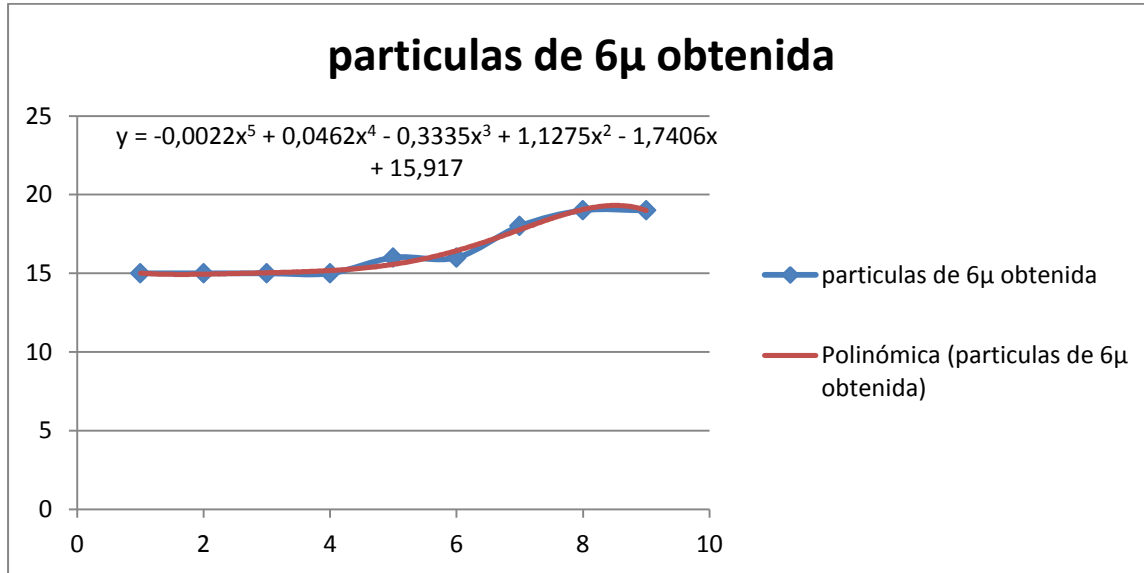
Figura 26. Gráfico de la tendencia del código ISO en partículas de 4μ



Fuente: elaboración propia.

La figura 26 muestra el crecimiento del código ISO 4406:17 y por ende el aumento en la contaminación del aceite hidráulico, además se muestra la línea de tendencia y la ecuación polinómica que describe el comportamiento de contaminación en función del tiempo.

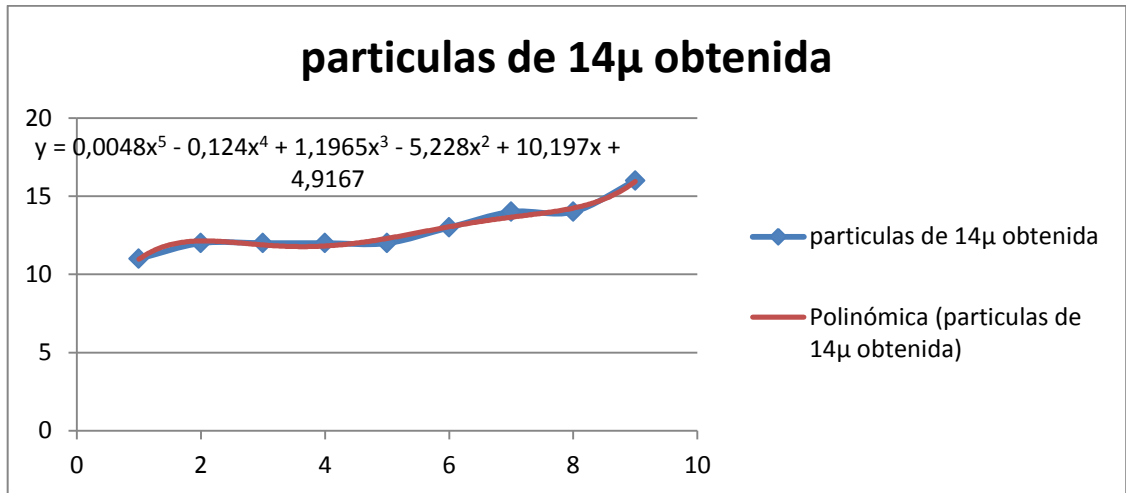
Figura 27. Gráfico de la tendencia del código ISO en partículas de 6μ



Fuente: elaboración propia.

En la figura 27 se muestra el crecimiento del código ISO 4406:17 para las partículas de 6μ, desde la semana 1 a la semana 9, donde se nota un aumento de la contaminación, además se describe la ecuación y el gráfico de la línea de tendencia durante esas semanas de estudio.

Figura 28. Gráfico de la tendencia del código ISO en partículas de 14μ



Fuente: elaboración propia.

En la figura 28 se puede observar el crecimiento de las partículas de 14μ, tal como sucedió con las de 4μ y 6μ de los gráficos anteriores, además también en este gráfico se muestra la ecuación de la tendencia para las partículas de 14μ.

Con base en los gráficos se puede determinar que los tres tamaños de partículas 4μ, 6μ y 14μ aumentaron drásticamente desde la semana 7 a la semana 9, lo que determina que en ese lapso pudo haber existido un desgaste brusco de algún componente mecánico dentro de la unidad hidráulica.

Luego de detectar ese crecimiento drástico, en la semana 9 se procede a realizar el proceso de filtrado, por tal razón la semana número 10 tiene una reducción considerable de la contaminación para así poder prolongar la vida útil del aceite hidráulico y los componentes de la unidad hidráulica.

### **3.1. Propuesta de modelo de gestión de un mantenimiento predictivo para análisis de aceite con aplicación de la norma ISO 4406:17**

El plan de mantenimiento predictivo, basado en análisis de aceite, tiene como fin controlar la limpieza, bajo el monitoreo de partículas, para la toma de decisión del filtrado del aceite y mantener los requerimientos que establece la norma ISO4406:17. Consecuentemente se podrá reducir fallas en los componentes hidráulicos, como también mantener la eficiencia de la maquinaria, evitar paros innecesarios y pérdidas económicas en la producción.

Este modelo se basa en analizar los tres tamaños de partículas, siendo estas de 4 $\mu$ , 6 $\mu$  y 14 $\mu$  y la cantidad de partículas por mililitro de aceite lubricante, de los cuales son los límites permitidos con base en los componentes que se desea resguardar.

Debe cuidarse los límites de contaminación para optimizar la vida útil de los equipos, prolongar además el uso del aceite hidráulico y reducir paros en la producción.

La propuesta de mejoras se realizó con base en los resultados obtenidos con el analizador de muestras Parker lcount, aplicando la norma ISO 4406:17, bajo un sistema de implementación de mantenimiento predictivo, para la unidad hidráulica de la planta de pastas de una mina subterránea de extracción de plata en Guatemala.

### **3.2. Descripción del modelo de gestión**

La necesidad es la implementación de un plan de mantenimiento predictivo basado en análisis de aceite, que está integrado de un analizador de

muestras de aceite Icount de la marca Parker. El analizador es un equipo portátil para el control de la contaminación en sistemas de aceite hidráulico, el cual tiene dos métodos de selección de monitoreo: ISO 4406:17 y NAS1638, pero en este caso se realizará el estudio basado en la norma ISO4406:17.

#### **3.2.1.1. Preparación de equipo de monitoreo**

Es necesario que en cada toma de muestra se reemplacen las mangueras del analizador de muestras Parker Icount, debido a que puede quedar alguna contaminación por el tiempo que transcurre para tomar la siguiente muestra, o ya sea por el fluido hidráulico que queda de la muestra anterior.

Para obtener una muestra y evaluarla es necesario que la unidad hidráulica se encuentre en operación, debido a que la muestra testigo se obtiene del depósito, pues las partículas se encuentran disueltas cuando retornan después de que el aceite hidráulico ha realizado su trabajo.

#### **3.2.1.2. Recolección de datos**

El modelo que se propone es registrar los datos, en un formato de Excel, la información que se obtiene desde el analizador Parker Icount importa los datos por medio de una interfase USB, la información es exportada en formato de Excel, para tener un registro y almacenarlo en una computadora.

No se debe olvidar que el analizador de muestras se puede utilizar en dos métodos de conteo de partículas, siendo estas la ISO 4406:17 y NAS1638, por lo cual es necesario verificar que esté en la norma ISO al momento de la toma de datos.

### **3.2.1.3. Análisis de datos**

Teniendo los datos tabulados en Excel es necesario crear una columna con la fecha y el código ISO obtenido, de tal manera que se pueda graficar la evolución de la contaminación en función del tiempo , esto ayudará también a crear una línea de tendencia sobre el aumento de la contaminación del aceite hidráulico. También es importante que se tenga un registro físico del dato obtenido, para que pueda ser evaluado fuera de una oficina o donde no se tenga acceso a una computadora.

### **3.2.1.4. Detección de anomalías**

Es necesario evaluar la información obtenida, si aún no se tiene claro el código ISO obtenido es necesario realizar de nuevo la evaluación, ya que la respuesta es instantánea se puede reevaluar, ya que en un máximo de 30 segundos se obtiene el resultado del estado de cada muestra.

Se debe considerar que puede ser muy raro que la muestra con el tiempo pueda reducir la contaminación, al menos que se haya reemplazado los filtros originales de la unidad hidráulica y eso pueda hacer que en un tiempo la contaminación se reduzca.

### **3.2.1.5. Elaboración de informe**

La elaboración del informe no solo debe incluir la tabulación de datos en Excel, sino también un registro de la persona que está de turno como mecánico y supervisor. El informe debe incluir los datos obtenidos del código ISO, así como los gráficos que definen el comportamiento de la contaminación en función del tiempo. Los gráficos básicamente muestran una visión más amplia

del parámetro donde la contaminación es permisible para los componentes que se desean resguardar en la unidad hidráulica.

#### **3.2.1.6. Generación de tendencias**

La parte más importante del informe es la gráfica y la ecuación que describe la tendencia de la contaminación, la gráfica se irá formando conforme se vaya avanzando en el monitoreo y la recolección de datos, esto dará un panorama de la evolución y hacia dónde se dirige el grado de contaminación y qué momento es el adecuado para tomar la decisión de realizar la filtración.

Por otra parte, también reflejará en qué momento se realizó una filtración fuera de línea en la unidad hidráulica, para incrementar el tiempo de vida útil del aceite hidráulico, para también poder reducir alguna falla y por consiguiente evitar paros innecesarios de la producción.

#### **3.2.1.7. Presentación de resultados**

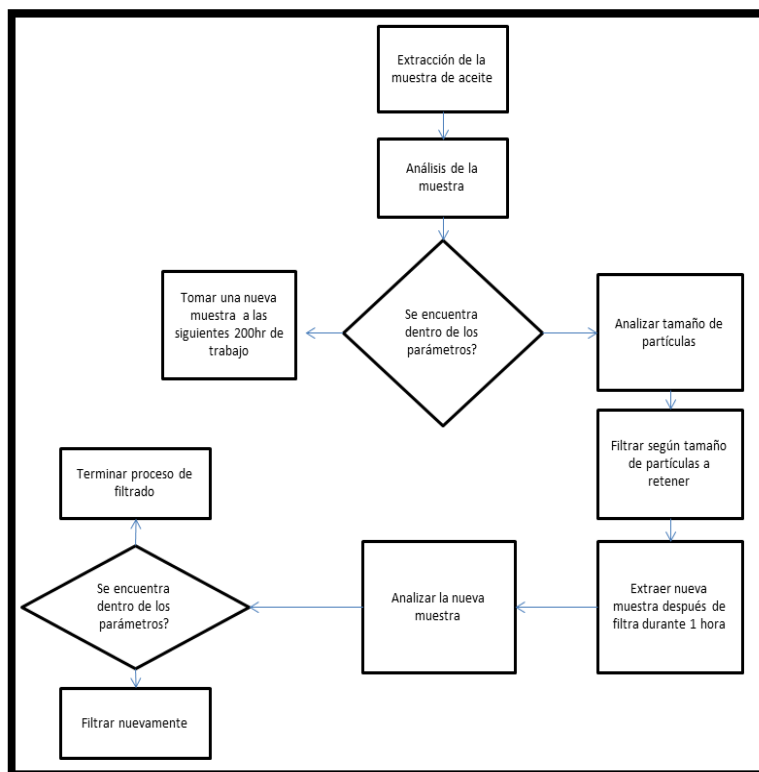
La presentación de los resultados debe ser un informe claro y de una manera gráfica, para su mejor comprensión, debe presentarse un informe individual de tamaño de partícula, siendo estas las de  $4\mu$ ,  $6\mu$  y  $14\mu$ , ya que no precisamente los tres tamaños de partículas pueden a la vez subir su nivel, por eso es muy importante que cada una sea analizada individualmente y con base en los resultados, así debe aplicarse la filtración para la partícula que se desea reducir en el proceso de limpieza.



### 3.2.1.8. Mejora continua

Como toda industria, los controles de mantenimiento de cualquier tipo son de suma importancia, no dejando a un lado el más importante en la actualidad: el mantenimiento predictivo, por tal razón es necesario que se pueda seguir buscando una mejora en el proceso, no está de más que también se puedan realizar auditorías externas para evaluar la condición fisicoquímica del aceite hidráulico.

Figura 29. **Diagrama de flujo de un mantenimiento predictivo, basado en el análisis de aceite con aplicación de la norma ISO 4406:17**



Fuente: elaboración propia.

## **4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

### **4.1. Discusión de análisis de aceite**

La importancia de un mantenimiento predictivo por parte del departamento de planta de pastas de la mina extractora de plata es un tema de suma importancia, ya que es un proceso que debe llevar estrictos controles para el buen desempeño del área, debido a que es un departamento de suma importancia en la operación, ya que cada hora que este departamento esté sin operación repercute en la producción, ya que la pasta es la encargada de rellenar todo los túneles vacíos y en la superficie de la mina se acumula todo el material que debe ser regresado al interior.

Es de mucha importancia que el analizador de muestra Parker Icount se mantenga dentro de los rangos de calibración y por tal razón Parker recomienda una calibración por año, esta calibración debe realizarse según la norma ISO 11171.

Los datos muchas veces pueden ser erróneos debido a la humedad que existe en el aceite, por tal razón también se debe verificar la humedad relativa del sistema y no está de más realizar en intervalos de limpieza un análisis de espectrometría, que dará la información de los componentes que más pueden estar sufriendo desgaste en la operación de la unidad hidráulica, ya que es un método para poder tener un criterio sobre la piezas que deben ser reemplazadas y que corresponden a una técnica de mantenimiento correctivo.

La norma ISO 4406:17 es una actualización de la ISO 4406:99, sin embargo el análisis básicamente sigue siendo según el mismo criterio: mantener una cantidad y tamaño de partículas por unidad de fluido. Además existen los límites de contaminación para cada componente y es el usuario quien debe definir con base en lo que el fabricante determina para cada componente.

Así mismo el fabricante recomienda el reemplazo de aceite hidráulico cada 5000 horas de trabajo, junto con todos los filtros internos del sistema, sin embargo, hasta que no se realiza un análisis de partículas, no se puede determinar la condición del aceite, pero cabe mencionar que los filtros del sistema son los encargados de mantener bajos los niveles de contaminación.

Los resultados obtenidos sobre la contaminación del aceite hidráulico de la unidad son lo que se espera con la aplicación de la técnica del análisis de aceite, cumpliendo así el objetivo del mantenimiento predictivo.

#### **4.2. Discusión sobre el mantenimiento predictivo basado en análisis con aplicación de la norma ISO 4406:17**

La limpieza de un fluido hidráulico es un factor clave para la confiabilidad, cuando se refiere a sistemas y componentes hidráulicos, debido a que la acumulación de la suciedad y la degradación del aceite aumentan considerablemente con el uso del equipo, lo que produce sedimentación y por ende abrasión en las piezas. Teniendo en cuenta que existe una relación entre la limpieza del fluido hidráulico y la vida útil de los componentes, mientras más limpio esté el sistema, mayor será la vida útil del aceite y los componentes hidráulicos.

Giraldo (2006) indica que la contaminación es la causa de la mayoría de los problemas en sistemas hidráulicos, debido a la experiencia de fabricantes y usuarios que indican que un 75% de las fallas están relacionadas a la contaminación del fluido hidráulico. Obteniendo un estado actual del aceite, se complementa el mantenimiento preventivo y correctivo, para realizar intervenciones más efectivas.

Las normas ISO establecen que conviene ser susceptibles a las mejoras, además que estas puedan ser auditables y realizadas de forma estándar, por tal razón los informes deben realizarse de una manera de fácil interpretación, ya que en Guatemala aún no es muy común trabajar con la norma ISO 4406:17 como una herramienta de mantenimiento predictivo.

El mantenimiento predictivo es un sistema independiente de los otros tipos de mantenimiento, no un complemento de la tarea actual. Además es importante recordar que un mantenimiento correctivo muchas veces suele ser mucho más costoso, debido al tiempo de paro de la producción y los mantenimientos preventivos muchas veces pueden prolongarse para optimizar recursos económicos.

Debido al poco conocimiento sobre esta técnica de análisis de aceite y de personal con experiencia, muchas veces se vuelve un tema de discusión para poder definirla y establecerla como efectiva para el mantenimiento de equipos hidráulicos, por tal razón los costos económicos en este tipo de inversión inicialmente son bastante altos, pero en el momento que se presenta una falla catastrófica se justifica el gasto.



## CONCLUSIONES

1. Se diseñó un sistema de mantenimiento predictivo para la unidad hidráulica de la planta de pastas de plata, con base en el análisis de aceite, según la Norma ISO 4406:17, para así crear un sistema de producción más eficiente y una mejor fluidez con la disponibilidad de la unidad hidráulica.
2. Se realizó la verificación de los historiales de mantenimiento y fichas de control, así como de las fallas más recurrentes de los componentes críticos del sistema hidráulico, para evitar una falla catastrófica de la unidad.
3. Se analizaron muestras de aceite utilizando la técnica adecuada de recolección y monitoreo en la unidad hidráulica, para determinar el grado de contaminación existente en cada uno de los tamaños de partículas y compararlas con el permitido, siendo este de 19/16/13.
4. Se evaluaron los beneficios de la implementación del plan de mantenimiento predictivo, con base en el análisis de aceite según la Norma ISO 4406:17, prolongando la vida útil del aceite por medio de la filtración y evitando con ello falla en los componentes hidráulicos.



## RECOMENDACIONES

1. Efectuar el modelo desarrollado con la finalidad de crear un plan de mantenimiento predictivo de rutina y que los mantenimientos correctivos sean integrados al mismo, para así poder evitar los mantenimientos correctivos para beneficio de la gestión operacional de la mina.
2. Crear un historial con los resultados de los análisis de aceite realizados en el mantenimiento predictivo, determinando las fallas más recurrentes en los componentes hidráulicos.
3. Utilizar la técnica de análisis de muestras de aceite de forma periódica y la técnica adecuada de muestreo, con el objetivo de interpretar la relación de la contaminación y las fallas relacionadas a la contaminación.
4. Realizar los análisis de aceite, puesto que muchas veces los aceites son reemplazados cuando aún pueden ser útiles, siempre y cuando las propiedades fisicoquímicas se mantengan, por lo cual se debe monitorear periódicamente sus propiedades con un análisis que incluya espectrometría, acidez, humedad relativa, contaminación, materiales expuestos y viscosidad.





## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Bilbao, M. (2014). *Contaje de partículas. Lubrication management*. Recuperado de: [http://lubrication-management.com/wp-content/uploads/sites/3/2014/07Análisis\\_aceite\\_aerogeneradores\\_2\\_ES.pdf](http://lubrication-management.com/wp-content/uploads/sites/3/2014/07Análisis_aceite_aerogeneradores_2_ES.pdf).
2. Carrión, C. (2007). *Implementación del sistema de análisis de aceite de lubricantes utilizando software Oilview y laboratorio de análisis Minilab*. (Tesis de Licenciatura en Ingeniería), Universidad del Bío-Bío, Chile.
3. Conde, A. (2010). *Modelo de excelencia en lubricación y mantenimiento predictivo. Ingeniería del mantenimiento. Ingeniería del mantenimiento industrial, TBN, servicios integrales de lubricación*.
4. Construcción Minera. (2015). *Construcción de túneles mineros*. Recuperado de: [http://www.construccionminera.cl/wp-content/uploads/2013/12/ConstruccionMinera\\_10.pdf](http://www.construccionminera.cl/wp-content/uploads/2013/12/ConstruccionMinera_10.pdf).
5. Creus, A. (2007). *Neumática e hidráulica*. Barcelona, España: Marcombo.
6. De las Heras, S. (2011). *Fluidos, bombas e instalaciones hidráulicas*. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Catalunya.

7. García, S. (2003). *Organización y gestión integral de mantenimiento*. Albasanz, Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos.
8. Garrida, S. (2010). *Organización y gestión integral del mantenimiento*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos.
9. Giraldo, R. (2006). *Aceites hidráulicos y de lubricación, normas técnicas de lubricación*. Recuperado de: <http://www.indisa.com/indisaonline/anteriores/Indisa%20On%20line%2040.pdf>
10. Girón, L. (2017). *Implementación de análisis de aceite usado como herramienta de mantenimiento predictivo aplicado a las máquinas propulsoras del guardacostas GC-653 Azumanche, del comando naval del pacífico*. (Tesis de Maestría en Ingeniería), Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
11. Guillén, L. (2007). *Procedimiento para el análisis de muestras de aceite usado en la agroindustria*. (Tesis de Maestría en Ingeniería), Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
12. Hernández, R. (2014). *Metodología de la investigación*. México D.F.: McGraw-Hill.
13. ISO. (2018). *Hydraulic fluid power-fluids-method for coding the level of contamination by solid particles*. Vernier, Suiza: McGraw-Hill.
14. Ledesma, M. (2015). *Análisis de aceite hidráulico para identificar componentes de desgaste en el sistema de implementos de*

*excavadoras 336dl CAT.* (Tesis de Licenciatura en Ingeniería), Universidad Nacional del Centro del Perú.

15. Llaña, C. (2007). *Implementación del sistema de análisis de lubricantes utilizando software Oilview y laboratorio de análisis Minilab.* (Tesis de Licenciatura en Ingeniería), Universidad del Bío-Bío, Chile.
16. Marrero, P. (2010). *La importancia del siempre menospreciado mantenimiento. Ingeniería del mantenimiento. Ingeniería del mantenimiento industrial, TBN, servicios integrales de lubricación.* México, Grupo Editorial Patria.
17. Medrano, J. (2017). *Mantenimiento, técnicas y aplicaciones industriales.* Azcapotzalco, México, Grupo Editorial Patria.
18. Mesa, D. (2007). *Principios básicos de tribología.* Risaralda, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira.
19. Noria. (2013). *Considere la contaminación antes de comprar maquinaria hidráulica.* Recuperado de: <http://noria.mx/lublearn/considere-el-control-de-la-contaminacion-antes-de-comprar-maquinaria-hidraulica/>.
20. Noria. (2013) *¿Qué tan importante es el código de contaminación sólida ISO 4406:99?* Recuperado de: <http://noria.mx/lublearn/que-tan-importante-es-el-codigo-decontaminacion-solida-iso-440699/>.
21. Parker. (2011). *Analizador de muestras de aceite Parker lcount.* Recuperado de:

<http://www.parkerhfde.com/pdf/conmon/fdcb528es.IOS.Spanish.pdf>

22. Parker. (2011). *Carros de filtración Parker*. Recuperado de: <http://www.iatsamexico.com/Pdf/Hca/Carro%20deFiltracion.pdf>
23. Putzmeister. (2010). *Bombas industriales Putzmeister*. Recuperado de: [https://downloads.german-pavilion.com/downloads/pdf/exhibitor\\_24002.pdf](https://downloads.german-pavilion.com/downloads/pdf/exhibitor_24002.pdf).
24. Serrano, N. (2002). *Oleohidráulica*. Madrid, España: McGraw-Hill.
25. Urrutia, L. (2016). *RCM aplicado al proceso de lubricación de maquinaria. Los cuatro tipos de mantenimiento*. Maquinaria & Petróleo. México, Grupo Editorial Patria.
26. Widman International. (2016). *Tablas de códigos de limpieza ISO 4406 para aceite y combustible*. Recuperado de: [http://www.widman.biz/Seleccion/iso\\_4406.html](http://www.widman.biz/Seleccion/iso_4406.html).
27. Zamora, B. (2016). *Máquinas hidráulicas*. Cartagena, Colombia: Universidad Politécnica de Colombia.