



UNIVERSIDAD
PRIVADA
DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

“IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA DE TRIBOLOGÍA
CENTRADA EN LA CONFIABILIDAD PARA MEJORAR LA
PRODUCTIVIDAD DE LAS PALAS PC4000 EN LA MINERA MISKI
MAYO”

Tesis para optar al título profesional de:

Ingeniero Industrial

Autores:

Guadalupe Esmeralda Tello Castro
Edwin Jonathan Espinoza Villaorduña

Asesor:

Ing. Johnny David Arrustico Loyola

Lima– Perú

2016

APROBACIÓN DE LA TESIS

El asesor y los miembros del jurado evaluador asignados, **APRUEBAN** la tesis desarrollada por los bachilleres **Guadalupe Esmeralda Tello Castro** y **Edwin Jonathan Espinoza Villaorduña**, denominada:

“IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA DE TRIBOLOGÍA CENTRADA EN CONFIABILIDAD PARA MEJORAR LA PRODUCTIVIDAD DE LAS PALAS PC4000 EN LA MINERA MISKI MAYO”

Ing. Johnny David Arrustico Loyola
ASESOR

Ing. Hans Clive Vidal
JURADO
PRESIDENTE

Ing. Sonia Isabel Espinoza Farías
JURADO

Ing. Jorge Luis Chiroque Calderón
JURADO

DEDICATORIA

La presente tesis está dedicado a la memoria de mi abuelo Justiniano Villaorduña, “Papá Grande” ausente en cuerpo, pero tan presente en mis decisiones, su ejemplo de lucha y sus innumerables consejos sentaron los cimientos de la persona que soy ahora, el solo imaginar la felicidad que sentiría al ver este logro en mi vida profesional me llena de regocijo pues verme en esta etapa fue tanto un sueño de él como mío.

Edwin Espinoza Villaorduña.

Eres la razón de mi vida, que has motivado mis pasos y logros, acompañándome y comprendiendo el desarrollo de mi carrera profesional y sobre todo entendiendo el sacrificio del tiempo que debí dedicarte en los inicios de tu mejor etapa la niñez.

Dedico mi vida y mis logros a ti mi “Aldito” querido.

Guadalupe Tello Castro.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por permitirme culminar exitosamente esta meta trazada y por darme los padres que tengo a los que también agradezco enormemente pues ellos siempre me han sabido brindar su apoyo y aliento en todos los objetivos que me he trazado y aconsejado en mis equívocos.

Edwin Espinoza Villaorduña

Cargado de ilusiones parten los arrieros en busca de anhelados sueños, con su poncho al viento van, con vehemencia, humildad y amor mis abuelos abren caminos, logrando juntar dos corazones, mis padres, que siguieron el camino del arriero, trabajando con esfuerzo, vehemencia, ejemplo y amor que ha sido heredado por cada generación.

No olvido mis raíces y agradezco eternamente a mis abuelos Atanacio Tello y Julián Castro por darme unos padres maravillosos.

Guadalupe Tello Castro

ÍNDICE DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DE LA TESIS.....	2
DEDICATORIA.....	3
AGRADECIMIENTO	4
ÍNDICE DE CONTENIDOS	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
ÍNDICE DE FIGURAS	9
RESUMEN.....	10
ABSTRACT	11
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1. Realidad problemática	12
1.2. Formulación del problema.....	14
1.3. Justificación.....	14
1.4. Limitaciones	15
1.5. Objetivos	16
1.5.1. <i>Objetivo General</i>	16
1.5.2. <i>Objetivos Específicos</i>	16
CAPÍTULO 2. MARCO TEORICO.....	17
2.1. Antecedentes	17
2.2. BASES TEORICAS.....	19
2.2.1. <i>TRIBOLOGÍA</i>	20
2.2.1.1. <i>Tribología Centrada en Confiabilidad (RCT)</i>	20
2.2.1.2. <i>Lubricación</i>	21
2.2.1.3. <i>Funciones de la lubricación</i>	22
2.2.1.4. <i>Mecanismos de falla de la lubricación</i>	22
2.2.1.5. <i>Lubricantes</i>	25
2.2.2. <i>Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)</i>	43
2.2.3. <i>El proceso FMEA</i>	46
2.2.4. <i>Productividad</i>	54
2.2.5. <i>Pala PC4000</i>	55
2.3. Definiciones y términos básicos.....	56
CAPÍTULO 3. HIPÓTESIS.....	60
3.1. Formulación de la hipótesis	60

3.2. Operacionalización de variables	60
CAPÍTULO 4. MATERIAL Y MÉTODOS	62
4.1. Tipo de diseño de investigación.....	62
4.2. Material.	63
4.2.1. <i>Unidad de estudio</i>	63
4.2.2. <i>Población</i>	63
4.2.3. <i>Muestra</i>	65
4.3. Métodos.	70
4.3.1. <i>Técnicas de recolección de datos y análisis de datos</i>	70
4.3.2. <i>Procedimientos</i>	70
CAPÍTULO 5. DESARROLLO.....	71
CAPÍTULO 6. RESULTADOS	107
CAPÍTULO 7. DISCUSIÓN.....	109
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES.....	110
CAPÍTULO 9. RECOMENDACIONES	111
CAPÍTULO 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112
CAPÍTULO 11. ANEXOS	114

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación ISO de viscosidades para los lubricantes líquidos industriales, identificada con ISO 3448.....	28
Tabla 2: Categorías en análisis de aceites	30
Tabla 3: Pruebas para detectar agua en el lubricante	35
Tabla 4: Problemas detectados en el análisis de aceite.....	42
Tabla 5: Clasificación de severidad.....	49
Tabla 6: Clasificación de ocurrencia	50
Tabla 7: clasificación de sistemas de detección temprana.....	51
Tabla 8: Aplicación del proceso FMEA en la lubricación	52
Tabla 9: Tabla de funciones de la lubricación y mecanismo de fallas por lubricación (FMEA)	54
Tabla 10: Operacionalización de variables	60
Tabla 11: Resumen de análisis de hipótesis	61
Tabla 12: Equipos de carguio y movimiento de tierras en la operación de MISKI MAYO.....	63
Tabla 13: Valoración de criticidad por tipo de impacto	65
Tabla 14: Valoración de criticidad por ocurrencia	65
Tabla 15: Clasificación por nivel de criticidad	66
Tabla 16: Criterios de criticidad según equipos	67
Tabla 17: Ejemplo de calculo de criticidad del equipo	73
Tabla 18: Matriz de Criticidad para calcular criticidad de Equipos	73
Tabla 19: Equipos Críticos de la Muestra	74
Tabla 20: Lista de fallas de lubricación de los seis (06) equipos PALA PC4000 en el sistema hidráulico en el año 2015	75
Tabla 21: Ocurrencia relativa en fallas de lubricación de las PALAS PC4000 en el sistema hidráulico (2015).....	77
Tabla 22: Potenciales modos de falla por lubricación.....	80
Tabla 23: Potenciales modos de falla por lubricación y su respectivo impacto potencial	81
Tabla 24: Nivel de severidad.....	82
Tabla 25: Potenciales modos de falla y su respectiva severidad	83
Tabla 26: Potenciales modos de falla y sus respectivos mecanismos potenciales de	

falla	84
Tabla 27: Potenciales modos de falla y sus respectivos valores de ocurrencia de falla	85
Tabla 28: Potenciales modos de falla y sus respectivos métodos predictivos	86
Tabla 29: Niveles de detección	87
Tabla 30: Potenciales modos de falla y sus niveles de detección	88
Tabla 31: Niveles de criticidades para RPN	89
Tabla 32: Potenciales modos de falla y su RPN	89
Tabla 33: Potenciales modos de falla y sus acciones de mantenimiento recomendadas	90
Tabla 34: Resultados de la implementación del RCT	92
Tabla 35: RPN antes y después del RCT	93
Tabla 36: Frecuencia de fallas Inicial y final	94
Tabla 37: Tasa de Falla Inicial	95
Tabla 38: Tasa de Falla Final	95
Tabla 39: Cuadro comparativo de MTTR aplicando RCT	96
Tabla 40: Cuadro comparativo de confiabilidad aplicando RCT	97
Tabla 41: Indicadores de mantenimiento	97
Tabla 42: Resultados estimados luego de aplicación de sistema RCT	98
Tabla 43: Producción de roca fosfórica por año e incremento por nivel de productividad	99
Tabla 44: Datos de consumo de aceite Shell Tellus ISO 68	100
Tabla 45: Horas acumuladas de operación de las palas	101
Tabla 46: Valorización de la pérdida anual de aceite hidráulico	101
Tabla 47: Datos operativos promedio de una PALA PC4000	102
Tabla 48: Resultados estimados de aplicación de sistema RCT	102
Tabla 49: Costo total de equipos	104
Tabla 50: Costo de servicio de instalación	104
Tabla 51: Costo de servicio de mantenimiento	105
Tabla 52: Resultado económico por productividad	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Precio por tonelada roca fosfórica:.....	12
Figura N° 2: Estructura Moleculares comunes de aceites minerales.....	26
Figura N° 3: Espectrofotómetro de absorción atómica.....	31
Figura N° 4: Variación de la Viscosidad con la presión.....	32
Figura N° 5: Viscosímetro automático de marca Cannon, Modelo MiniQV-X.....	33
Figura N° 6: Contador de Partículas PAMAS SBSS.....	36
Figura N° 7: Reporte de Análisis por Monitoreo de Condición del Aceite	38
Figura N° 8: Tendencias de desgaste, contaminación, aditivos de Análisis por Monitoreo de Condición del Aceite de reporte	38
Figura N° 9: Evolución de las teorías de mantenimiento por generaciones.....	44
Figura N° 10: Tipos de Mantenimiento según RCM	46
Figura N° 11: Causas de la pérdida de función de un equipo.....	47
Figura N° 12: Secuencia del proceso del FMEA	48
Figura N° 13: Imagen de PALA PC4000 Komatsu Mitsui	56
Figura N° 14: Proceso de Investigación para Implementación de RCT	71
Figura N° 15: Fotocheck de personal de Lubeman	72
Figura N° 16: Gráfico de Incidencias de fallas acumuladas por Lubricación	77
Figura N° 17: Pasos para la aplicación de Metodología FMEA.....	79
Figura N° 18: Implementación de las acciones de mantenimiento recomendadas.....	91
Figura N° 19: Gráfica de comparativo de mejoras en Indicadores de mantenimiento.....	98
Figura N° 20: Gráfica de comparativo de mejoras en Indicadores de mantenimiento.....	103

RESUMEN

La presente tesis pretende implementar un programa de tribología centrada en confiabilidad (RCT), que divulgue el concepto de tribología aplicada a las actividades de mantenimiento, fundamentado en herramientas de la ingeniería de confiabilidad que permita detectar fallas incipientes y evitar su desarrollo en fallas mayores de los equipos, mejora la productividad optimizando los procesos tribológicos a través de la reducción de fallas de las palas PC4000.

El trabajo de investigación se desarrolla en la provincia de Sechura en la operación minera a tajo abierto de propiedad de la minera MISKI MAYO.

Los factores externos como los bajos precios internacionales de la roca fosfórica, así como los factores internos tales como la madurez del ciclo de vida de los equipos mineros dentro, la pérdida de producción por las recurrentes fallas relacionadas a la lubricación ha estado afectando a la productividad negativamente.

Es por ello que, para el desarrollo de la investigación, se elabora un análisis de criticidad con la finalidad de determinar los equipos más críticos de la operación, siendo las palas hidráulicas las de mayor importancia, pues inciden directamente y en mayor grado en los niveles de productividad. Los sistemas hidráulicos de estos equipos son los elegidos para aplicar esta metodología, debido a la mayor calidad y cantidad de información recopilada, logrando implementar un programa de tribología centrada en confiabilidad para incrementar el tiempo medio entre fallas, minimizar la generación de paros no programados, incrementar la productividad, vida útil de las palas PC4000 y equipos de la empresa minera MISKI MAYO.

La metodología de la tribología centrada en confiabilidad se basa principalmente en el uso del análisis de modos y efectos de falla (FMEA), herramienta fundamental del mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) el cual aplicamos en la presente investigación para los procesos tribológicos, pues a través del reconocimiento de los modos de falla, las funciones de la lubricación para cada modo de falla, los efectos de los modos falla y su probabilidad de ocurrencia, se proponen las tareas de mantenimiento derivadas a fin de contrarrestar sus efectos, una vez implementadas estas tareas logran controlar y reducir en forma lógica la tasa de fallas relacionadas a los procesos tribológicos mejorando la confiabilidad y productividad de los equipos.

ABSTRACT

The following thesis intends to implement a tribology program focused on reliability (RCT), which disseminates the concept of tribology applied to maintenance activities, based on reliability engineering tools to detect incipient faults and prevent their development in major faults. The equipment improves productivity by optimizing tribological processes through the reduction of PC4000 blade blades.

The research work is carried out in the province of Sechura in the open-pit mining operation owned by Minera MISKI MAYO.

External factors such as the low international prices of phosphoric rock, as well as internal factors such as the maturity of the life cycle of the mining equipment inside, the loss of production by recurrent lubrication-related failures has been affecting productivity negatively

This is why, for the development of the research, a criticality analysis is done in order to determine the most critical equipment of the operation, with hydraulic shovels being the most important, as they directly and to a greater extent affect the levels of productivity. The hydraulic systems of these equipment are those chosen to apply this methodology, due to the higher quality and quantity of information collected, Managing to implement a program a tribology program focused on reliability to increase the average time between failures, to minimize the generation of unscheduled shutdowns , Increase productivity, lifetime of the PC4000 blades and equipment of the mining company MISKI MAYO.

Since the methodology of reliability-centered tribology is mainly based on the use of fault-mode and effects analysis (FMEA), a fundamental reliability-based maintenance tool (RCM). We apply this tool to tribological processes because, through the recognition of failure modes, lubrication functions for each mode of failure, the effects of modes failure and their probability of occurrence, the tasks of Maintenance in order to counteract their effects, once these tasks are implemented, they manage to control and logically reduce the failure rate related to tribological processes by improving the reliability and productivity of the equipment.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

Actualmente en el Perú, el sector minero ha sufrido importantes cambios, consistente en la caída de los precios de minerales, generado por la crisis económica de sus principales clientes, los países industrializados, como China, Estados Unidos, Marruecos, Rusia, Brasil e India.

Esta situación igualmente ha repercutido en la demanda mundial de roca fosfórica que es aproximadamente de 185 millones de toneladas por año encontrándose los principales consumidores en China, Estados Unidos, Marruecos, Rusia, Brasil e India. En el corto plazo, se espera que dicha demanda se incremente entre el 4% y 5%. Asimismo, las proyecciones indican que esta tendencia se mantendrá y que para el año 2017, la demanda mundial de roca fosfórica se incrementará en 216.1 millones de toneladas por año.

Figura n.º 1. Precio por tonelada de roca fosfórica.



Fuente: Banco Mundial.

Como se aprecia en la (Figura n.º 1.) el precio por tonelada de roca fosfórica ha bajado casi sostenidamente desde diciembre de 2011 (su punto más alto: 202.5 US\$/TM) hasta llegar a su punto más bajo en diciembre del año 2013 (101 US\$/TM), habiéndose incrementado a partir de esa fecha muy lentamente y estabilizado en 115

US\$/TM entre setiembre 2014 y agosto 2015, a partir de éste último mes sube ligeramente llegando a 121.5 US\$/TM en diciembre de 2015 y no hay indicativos sólidos que el precio se recupere por lo menos este año 2016.

Las caídas de los precios por tonelada de roca fosfórica en contraste con la tendencia positiva de la demanda motivaron a la empresa MISKI MAYO a buscar alternativas que aumenten la rentabilidad de la operación actual, apuntando dichas alternativas a la gestión de mantenimiento donde se busca cambios profundos a fin de contrarrestar los bajos márgenes de utilidad en sus balances.

Para el año 2013 la flota de equipos de MISKI MAYO estaba en una etapa madura y a varios equipos le correspondía un mantenimiento mayor (overhaul). Un problema ignorado en la estimación del costo del ciclo de vida de los equipos ,radica en que no se tomaron las medidas para contrarrestar los efectos de la corrosión en sus componentes, sea en acoples, cilindros hidráulicos, juntas, pines o incluso de mayor magnitud como en componentes electrónicos.

Si bien la minera MISKI MAYO dispone desde el año 2011 con un programa de mantenimiento predictivo de los equipos, fundamentado principalmente en un programa de análisis de aceites lubricantes que es operado por la compañía Komatsu Mitsui (Representante de los equipos Komatsu en Perú). Los problemas de contaminación, principalmente sólidas procedente de la contaminación con polvo atmosférico de los sistemas lubricados de los equipos han sido persistentes y no ha habido un esfuerzo sostenido de mejora de los indicadores de control de contaminación, sólo se ha limitado a programar cambios de aceite cuando los niveles de contaminación son críticos.

Los bajos niveles de mantenimiento predictivo, el insuficiente esfuerzo para controlar la contaminación en los sistemas lubricados, la escasa difusión de los conceptos de tribología y lubricación, el poco aprovechamiento de todos los beneficios de contar con un programa de análisis de aceite, la no aplicación sistemática de buenas prácticas de lubricación, el insuficiente conocimiento de los modos de falla por lubricación de los equipos influye negativamente en la confiabilidad y disponibilidad de los equipos y los problemas de corrosión junto con el alto nivel del polvo atmosférico complicando más el nivel de mantenimiento de los equipos de la operación MISKI MAYO.

La compañía BAHIA DE BIZKAIA GAS (BBG) publica en el año 2015 el resultado de su certificación en RCT (*Reliability Centered Tribology*) que le acredita como empresa de clase mundial en prácticas de lubricación BBG, explica además que dicha certificación partió de la iniciativa de un grupo de tribología dentro del departamento de mantenimiento que lograron identificar sistemas y equipos a los que era posible implementar tribología centrada en confiabilidad RCT, implementación que se llevó a

cabo de acuerdo a la norma (ISO 18436-4) que incluía además la creación de una Zona RCT (Sala de Lubricación). Como resultado de todo este emprendimiento se lograron beneficios técnicos y económicos como la reducción consumos de energía, el ahorro en costes de lubricantes, ahorro en reparaciones por paros no previstos, la mayor vida y mejora de la confiabilidad de los equipos. Este caso de éxito contribuye a dirigir los resultados que se esperan obtener en la siguiente tesis.

Con la implementación de un programa de tribología centrada en la confiabilidad de equipos críticos, como las palas PC4000 de Komatsu Mitsui, equipo identificado de acuerdo a un estudio de incidencia de fallas por mantenimiento y lubricación, resultados arrojados en el mantenimiento predictivo (análisis de aceite del sistema hidráulico). Se desarrolla un plan de mantenimiento aplicando las mejores prácticas de lubricación para estos equipos, esto incluye incorporar un plan de acción como el sistema de micro filtrado ,que garantice la limpieza de los aceites y por ende brinde protección a los componentes críticos que han sido detectados, de esta forma se logre mayor confiabilidad, extender la vida útil de la maquinaria para así mejorar la productividad de las palas PC4000 en la operación minera MISKI MAYO de la ciudad de Sechura - Piura en el año 2016 y sucesivos años.

1.2. Formulación del problema

¿En qué medida la implementación del programa de tribología centrada en confiabilidad, mejoraría la productividad de las PALAS PC4000 en el área de mantenimiento de la minera MISKI MAYO, en el año 2016?

- ¿Cómo implementar un programa de tribología centrada en confiabilidad?
- ¿Cuál es el incremento de la productividad de las PALAS PC4000, al implementar tribología centrada en confiabilidad?

1.3. Justificación

La presente investigación profundiza aspectos teóricos sobre el Programa centrado en la confiabilidad, consistente en mejorar los procesos tribológicos en los equipos, como las palas PC4000, al respecto cabe referir lo argumentado por Paramo (2012); quien explica que el RCT es una herramienta para incrementar la confiabilidad de la maquinaria, que utiliza la metodología del FMEA, parte del mantenimiento centrado en confiabilidad, concentrándose en los 2 modos de falla (causas de falla) que son de mayor relevancia: la lubricación y la contaminación del lubricante. Por lo tanto, esto reafirma la base para el desarrollo de la presente investigación, que es el incrementar la confiabilidad de los equipos.

Esta investigación es importante para la empresa MISKI MAYO porque no tiene un Programa de Tribología centrada en confiabilidad (RCT). Al implementar un programa

RCT le permitirá a la empresa MISKI MAYO detectar defectos en los equipos en una etapa temprana y lograr minimizar la generación de paros no programados, acrecentar la disponibilidad, incrementar el tiempo medio entre fallas, ampliar la vida útil del aceite y aumentar la productividad de las PALAS PC4000 de la operación minera MISKIMAYO.

En el aspecto valorativo, al lograr implementar el programa de tribología centrado en confiabilidad ,que involucraría a todo el personal de mantenimiento a través de reuniones , capacitaciones, pruebas e implantación del programa, por impacto, se mejorarán los niveles de comunicación, trabajo en equipo entre las áreas responsables de todo el proceso como también nivel de satisfacción del personal por el desarrollo técnico adquirido, así como la reducción de sobre tiempos por fallas inesperadas en los equipos.

Por otro lado, la presente investigación aporta un hito importante para el área de mantenimiento brindando herramientas para la correcta implementación de un programa tribología centrado en confiabilidad la que podrá ser desarrollado también en diversas industrias. El cual servirá de referencia y motivación para que otras empresas emprendan estas mejoras en sus procesos tribológicos, así también se espera sea material de apoyo para futuros investigadores interesados en el tema, dentro del mundo mantenimiento.

1.4. Limitaciones

Información de mantenimiento desordenada y dispersa en muchos documentos de mantenimiento, fue necesario invertir mucho tiempo en ordenar la información.

Poca disponibilidad de personal de operaciones para las consultas con respecto al muestreo de aceites y plan de mantenimiento.

Difícil proceso de aprobación de permisos para el ingreso a las instalaciones de la minera MISKI MAYO.

El presupuesto destinado para la investigación en campo excedió a lo presupuestado inicialmente.

Sin embargo, aún con todas estas limitaciones de, información, disponibilidad de personal de apoyo, procesos de aprobación, facilidades y presupuesto se pudo realizar exitosamente la investigación.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Implementar un programa de tribología centrada en confiabilidad para mejorar la productividad de las palas PC4000 en el área de mantenimiento de la minera MISKI MAYO en el año 2016.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Implementar un programa de tribología centrada en confiabilidad en la empresa minera MISKI MAYO.
- Incrementar la productividad de las palas PC4000.

CAPÍTULO 2. MARCO TEORICO

Por la envergadura y los procesos en mina como la extracción, procesamiento, fundición y refinación, es necesario contar con especialistas y refuerzo en cada una de las áreas, por ello se convoca a “*Empresas Contratistas*”, para este trabajo de investigación hablamos de contratistas que son encargados del mantenimiento de los equipos para la extracción de minerales en algunos casos son más de dos ya que depende del tipo de flota y marca (por su conocimiento y experiencia) logrando contar con una operación confiable y productiva.

Con la experiencia de participar en la gestión de mantenimiento con el representante de KOMATSU MITSUI en la minera MISKI MAYO, realizando proyectos de mejora en los diferentes proyectos mineros, somos conscientes de la realidad donde la mayor parte del presupuesto en el área de mantenimiento es consumida por actividades de mantenimiento correctivo y preventivo, sobre todo en el primero de ellos. Es decir, se gasta ese dinero en corregir averías y fallas que no sólo significan costos por recambios, mano de obra, tiempo extra, entre otros. Sino que, además, tienen implicaciones en la confiabilidad de los equipos que paralelamente afectan en pérdidas de producción.

En tal sentido para la mejora en la calidad, el logro de la optimización de los costos de mantenimiento y el éxito en la producción de los proyectos mineros, se describe en esta tesis la implementación de un programa de tribología centrada en confiabilidad que permita incrementar la productividad de los equipos, en este caso de la minera MISKI MAYO de la ciudad de Piura.

2.1. Antecedentes

Pérez, E. (2010). Realizó un trabajo titulado “*Diseño de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad (MCC) para una paletizadora de sacos de cemento*”. (Tesis para optar al título de Ingeniero mecánico). Universidad de Oriente, Venezuela. En la corporación CEMEX DE VENEZUELA S.A.C.A. Una empresa líder en el mercado de cemento y concreto premezclado.

Con la aplicación del RCM y el FMEA (Análisis de Modo y Efecto de Fallas), a los equipos críticos de la paletizadora, se obtuvo como resultado la identificación de fallas funcionales en los rodillos aceleradores, bandas gira sacos, rodillos formadores de semicapa y correas desplazadoras los que sumaron en su conjunto 77 fallas reconocidas.

El autor concluye que el personal de mantenimiento de la paletizadora al tener identificados las fallas de los equipos y su criticidad permitió desarrollar de manera efectiva un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad que permitió la mayor disponibilidad de los equipos, disminuyendo de esta manera costos innecesarios por medidas correctivas y el tiempo por paradas inesperadas.

Este antecedente contribuye así reforzar la aplicación del FMEA, permitiendo el desarrollo del RCM para las labores de mantenimiento incrementando de este modo la

disponibilidad, la confiabilidad y productividad de los equipos de la operación, que representan objetivos de la presente tesis.

Cajas, C. (2008). Realizó un trabajo de grado titulado *“Automatización del análisis de modos de falla y efectos FMEA en la ingeniería de mantenimiento aplicado para la industria ecuatoriana”* (Tesis para optar al título de Ingeniero mecánico) Escuela Politécnica Nacional, Ecuador. Este proyecto sistematiza y automatiza, el proceso FMEA en la ingeniería de mantenimiento aplicado para la industria ecuatoriana, para este propósito se desarrolló una aplicación llamada AMFE-SM v1.0, el cual cumple el principal objetivo planteado del análisis de modo a fallas.

El autor resalta que el FMEA es una herramienta técnica proactiva multidisciplinaria de análisis de confiabilidad, de aseguramiento de calidad, de estimación de riesgo y seguridad más comúnmente usada a nivel industrial, puesto que mejora la productividad, lo que convierte a una industria en altamente competitiva.

El antecedente contribuye a demostrar la importancia que tiene el FMEA en la planificación de tareas de mantenimiento para la lograr la mejora de la productividad y la confiabilidad de los equipos, propuesta en nuestra presente tesis.

Castañeda, V. (2006), realizó la tesis titulado *“Metodología para integrar la tecnología del análisis de aceite a los programas de mantenimiento predictivo en sistemas hidráulicos de potencia”*. (Tesis de Maestría). Instituto Politécnico nacional, Querétaro. Este trabajo presenta el desarrollo de una metodología para integrar el análisis de aceite a las prácticas y programas de mantenimiento predictivo en sistemas hidráulicos de transmisión de potencia de la maquinaria y equipos destinados a la Producción, siguiendo principios tribológicos.

Además, el autor da a conocer la importancia de los beneficios económicos que pueden obtenerse al aplicar la tecnología del análisis de aceite como una herramienta para elevar la productividad y considerarla parte de la estrategia para la competitividad de la compañía.

Esta tesis, demuestra la importancia y los beneficios que pueden ser logrados al implementar el análisis de aceite como parte principal de programas de mantenimiento predictivo de sistemas hidráulicos siguiendo criterios y principios tribológicos.

Costa, M. (2010). Realizó la tesis titulada. *“Aplicación del mantenimiento centrado en la confiabilidad a motores a gas de dos tiempos en pozos de alta producción”*. (Tesis para optar al Título de Ingeniero Mecánico). Pontificia Universidad Católica, Perú. En la tesis se trabajó la identificación de los problemas que dificultan la función de los motores a gas a través del FMEA, estableciendo la criticidad de cada una de ellas y el impacto causado a

las metas de producción, mantenimiento, salud y medio ambiente. Donde se implementaron estrategias de mantenimiento para la eliminación de las causas de fallas identificadas.

El autor concluye que como resultado de la aplicación de la metodología se logra incrementar la vida útil de los componentes de los equipos, así como la disponibilidad de los mismos al disminuir las fallas y sus consecuencias, incrementando así, las ventas por la recuperación de petróleo crudo a un menor costo de mantenimiento.

El antecedente contribuye que a través del análisis de modo, fallas, causas y efectos (FMEA) se puede proponer estrategias de mantenimiento que incremente la productividad, confiabilidad y ahorro en el costo de mantenimiento que logrará incrementar la productividad de los equipos.

Córdova, C. (2005). Realizó una tesis titulado “*Implantación del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) a los hornos convertidores Peirce Smith de la fundición de cobre de Souther Perú Copper Corporation*”. (Tesis para optar al Título de Ingeniero Mecánico) Universidad Nacional de Ingeniería, Perú. Esta tesis contempla el estudio de todos los subsistemas y equipos involucrados en los Hornos Convertidores Peirce Smith, estudiando con mayor detalle a los equipos que presentan un mayor riesgo en la operación de los hornos. La metodología del RCM se expone completamente para la realización del proyecto, cabe señalar que la herramienta de evaluación es el Análisis de Modo y Efecto de Fallas FMEA, el cual nos permite establecer todos los modos de falla en el sistema o equipo estudiado.

Esta tesis concluye en que se ha disminuido las reparaciones mayores, se ha incrementado la disponibilidad operacional en estos equipos y se ha obtenido un ahorro entre los 6'337,105.83 y 8'225,563.36 US\$ al año, entre otros.

Estos antecedentes, nos indican que con la implementación de un programa RCT, una empresa puede detectar defectos en los equipos en una etapa temprana y lograr minimizar la generación de paros no programados, incrementar la disponibilidad, aumentar el tiempo medio entre fallas, acrecentar la vida útil de los equipos y aumentar la productividad de los equipos.

2.2. BASES TEORICAS

Esta Tesis tiene como objetivo general, implementar un programa de tribología centrada en confiabilidad para mejorar la productividad de las PALAS PC4000 en la minera MISKI MAYO; determinando cómo afecta el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) así como la vida útil del aceite, la disponibilidad y la generación de paros no programados de los equipos involucrados en el presente estudio.

2.2.1. TRIBOLOGÍA

Definición:

López, J. sostiene que la tribología (del griego tribos, "frotar o rozar") es la ciencia que estudia la fricción, el desgaste y la lubricación que tienen lugar durante el contacto entre superficies sólidas en movimiento.

El término es usado universalmente desde finales del siglo XX: en marzo de 1966, se usó por primera vez en el mundo la palabra tribología. Fue el doctor H. Peter Jost quién acuñó este término, que bien pudo definir a esta materia como Tribociencia o Tribotecnología.

El Dr. Jost define la Tribología como: la ciencia y la tecnología de superficies interactuantes en movimiento relativo y las prácticas asociadas.

La tribología requiere de conocimientos de física, química, tecnología de materiales y de ingeniería. Haciendo de esto una ciencia realmente interdisciplinaria.

Las tareas del especialista en tribología (tribólogo) son las de reducir la fricción y desgaste para conservar y reducir energía, lograr movimientos más rápidos y precisos, incrementar la productividad y reducir el mantenimiento.

La Tribología como Ciencia

Así el autor antes citado manifiesta que antes del nacimiento de la tribología como ciencia se pensaba en el término "lubricación" o ingeniería de lubricación. No se había generalizado la disminución de la fricción y el desgaste como prácticas cotidianas. Con la tribología como ciencia se estudia la fricción y sus efectos asociados, como el desgaste, tratando de prevenirlos con mejores diseños y prácticas de lubricación. Toma en cuenta, entre otros aspectos de la maquinaria industrial, los siguientes:

2.2.1.1. Tribología Centrada en Confiabilidad (RCT)

Definición:

Páramo, J. manifiesta que la tribología centrada en confiabilidad, RCT por sus siglas en inglés (Reliability Centered Tribology), es una metodología y herramienta usada para definir las necesidades de mantenimiento de las máquinas y equipos además de analizar la causa raíz del fallo, considerando el entorno de la operación asegurando que toda máquina y equipo se mantengan operativos.

Páramo, J. (noviembre, 2012). Tribología Centrada en Confiabilidad. En su Ponencia presentada en el XIV Congreso de Confiabilidad. Madrid, España, indica lo siguiente:

La aplicación de esta metodología, sin duda alguna impecablemente rigurosa, pero implica una considerable inversión de tiempo; formación de los facilitadores de RCM, formación de equipos, típicamente al menos de 6 integrantes: Mecánico, Operador, Supervisor Mecánico, Supervisor de Operación, ingenieros de confiabilidad y un facilitador, etc., y lo

más retador suelen surgir en los análisis de RCM al aplicarse la metodología, una considerable cantidad de modos de falla, que en etapas iniciales pueden encontrarse muchas decenas o cientos de modos de falla, ya sea porque hay poca experiencia o bien, el equipo y aún los facilitadores de RCM aún no dominan la metodología, lo que lleva a proponer tareas por condición, por rotura o “a falta de”, tan extensas que se corre un riesgo alto de dejar de lado la metodología y seguir el círculo vicioso de usar el plan de mantenimiento tradicional que realmente ya es hace mucho tiempo incongruente con los objetivos de la empresa.

La implementación efectiva y madurez del RCM típicamente se logra al menos en 3 años a veces hasta 5 años de trabajo sistemático y disciplinado por parte de la organización. El valor principal del RCM, es la manera sistemática y estandarizada para identificar las causas-raíz de las fallas, priorizarlas y determinar las estrategias de mantenimiento procedentes para reducir o evitar la incidencia de tales fallas. La efectividad concluyente de la efectividad del RCM es la tasa de incidencias en la industria de aviación, en donde tiene sus orígenes.

De las consideraciones anteriores surge lógica y naturalmente el RCT, el cual es una herramienta para incrementar la confiabilidad de la maquinaria, que utiliza la metodología del FMEA (análisis de modo y efecto de la falla) –parte de RCM- concentrándose en los 2 modos de falla (causas de falla) que, de acuerdo a lo anteriormente considerado, son de mayor relevancia: la lubricación y la contaminación del lubricante.

La metodología RCT es como aplicar un análisis de Pareto a los modos de falla más relevantes que afectan a las maquinarias, pues utiliza una parte muy importante de la metodología del RCM (el FMEA), y de enfocarse en los 2 modos de falla mencionados que, de acuerdo a instituciones, empresas y fabricantes de equipos impactan más en las averías de los equipos en la industria llegando hasta en un 80 % aproximadamente.

En resumen, el RCT es una filosofía desarrollada dentro de un programa que permite evaluar el estado actual de la lubricación de los equipos rotativos lubricados y la eficacia de los programas de lubricación que la empresa esté desarrollando, con el objetivo de analizar y evaluar sus fortalezas y debilidades y especificar las recomendaciones necesarias para involucrar las acciones de lubricación de la empresa de los mejores estándares mundiales en Lubricación.

2.2.1.2. Lubricación

Definición:

Díaz, J. (2006). La lubricación es la reducción de la fricción o desgaste que se genera en las superficies de cuerpos en contacto, que pueden encontrarse en reposo o con movimiento relativo, por la aplicación de algún elemento que se denomina lubricante.

Cada vez que un cuerpo se mueve, inmediatamente se genera una fuerza contraria que se opone al desplazamiento, solo una vez que se haya vencido esta fuerza, el cuerpo se pondrá en movimiento. El roce es un tipo de fuerza disipativa que genera calor y gasto de energía e incrementa el desgaste, por lo tanto hace los procesos más ineficientes y además reduce la vida útil de los equipos.

2.2.1.3. Funciones de la lubricación

Control de Fricción

Al separar las superficies móviles y proporcionando lubricación en películas adecuadas, el lubricante minimiza la fricción de superficie a superficie.

Control del desgaste

Reducir al mínimo la fricción de superficies y reducir el desgaste. El control de desgaste, por supuesto, aumenta la vida útil de los componentes y máquinas.

Control de Corrosión

Evitan el óxido y la corrosión de las superficies de los componentes.

Control de temperatura

El lubricante absorbe la energía térmica en el punto de generación y lo transporta a un enfriador o al tanque donde se puede disipar.

Control de la Contaminación

El lubricante recoge contaminantes en el punto de entrada y los transporta a los filtros, deshidratadores, tanques de separación, entre otros. Para su eliminación, además el lubricante mejora la eficacia de los sellos.

Energía y Transferencia de Trabajo

En los sistemas hidráulicos, el fluido de trabajo (que también cumple la función como un lubricante) es el medio por el cual se lleva a cabo el trabajo.

2.2.1.4. Mecanismos de falla de la lubricación

Pérdida súbita volumétrica

Por lo general, el lubricante cae a tierra si el tapón de drenaje está suelto, debido a la vibración del equipo o si falla la válvula de drenaje, cuando esto sucede, el sistema pierde funcionalidad de lubricación muy rápidamente; en circunstancias normales, estas fallas seguirían un patrón de fallos aleatorios, o constante.

Falla por relleno

Encender una máquina sin lubricante es una manera segura de provocar un fallo. Esto parece obvio, pero sucede. Al igual que la pérdida volumétrica súbita, el insuficiente relleno produce una pérdida inmediata de la funcionalidad del lubricante. Este es un tipo

de mortalidad infantil de falla que se puede prevenir fácilmente siguiendo estrictos procedimientos de inspección y pre-arranque.

Niveles bajos

Algunas máquinas pierden un poco de lubricante con el tiempo, debido a la combustión y/ o fuga, lo que podría producir condiciones de bajo nivel. La funcionalidad de la lubricación se pierde a diferentes velocidades cuando los niveles son bajos. Por ejemplo, como el nivel desciende, la capacidad del aceite para disipar el calor y el aire se pierden progresivamente, por lo tanto, la capacidad de transferir potencia y el trabajo del lubricante, puede seguir siendo muy constante hasta que el nivel cae por debajo de la línea de succión, provocando una pérdida funcional inmediata. Las fallas causadas por niveles bajos pueden abordarse mediante la programación de mantenimientos para inspeccionar, rellenar, o mediante la eliminación de la causa de la fuga o quema en la combustión. Si la fuga es el culpable, existe el riesgo adicional de deslizamiento o peligro de incendio.

Lubricante incorrecto

Este es un común tipo de falla por "muertes juveniles" que se vincula a errores en los procedimientos. Agregar el lubricante incorrecto para el sistema puede producir numerosos fallos funcionales de lubricación dependiendo de la naturaleza y la gravedad del error. Un error leve como el uso de EP 320 en lugar de 460 EP en el cambio de aceite es probable que produzca un efecto leve. Por el contrario, la adición de lubricante que no es compatible con los sellos o con el revestimiento de una superficie puede tener un efecto muy dramático. Este mecanismo de falla se evita de varias maneras; educando al personal sobre la importancia de conseguir el lubricante correcto en el sistema, pegando etiquetas fáciles de entender en los dispositivos / sistemas de dispensación del lubricante y crear procedimientos para asegurar la lubricación adecuada.

La degradación del lubricante base.

La degradación del lubricante base normalmente sigue un patrón de falla basado en el tiempo. Aunque las propiedades del lubricante tienden a degradarse con un patrón constante, las capacidades más funcionales son mantenidos hasta que se pasa de un umbral crítico y el lubricante ya no es capaz de realizar uno o más de sus funciones diseñadas. La degradación del lubricante base se puede controlar de forma proactiva, reduciendo al mínimo la exposición del lubricante al calor, aire, agua y catalizadores metálicos. El análisis de lubricante sirve para alertar al usuario de una condición degradada antes de este pierda su capacidad funcional.

La contaminación de partículas

La contaminación por partículas afecta principalmente a la capacidad del lubricante para controlar la fricción y el desgaste. Obstruye la separación de los componentes móviles e interfiere con películas químicas de aceite proporcionado por los aditivos anti desgaste y EP (extrema presión), la contaminación por partículas puede aumentar sustancialmente la tasa de abrasión, la adhesión y la fatiga de superficie. Los efectos de la contaminación por partículas son lentos e imperceptibles. De hecho, la pérdida de la capacidad funcional del lubricante para reducir la fricción y el desgaste se olvida a menudo debido a la lentitud con la que la contaminación por partículas afecta el sistema.

Contaminación por Humedad

La contaminación por humedad aumenta el desgaste por oxidación química de las superficies de hierro y acero, y el aumento de la fuerza corrosiva de ácidos (formados en la operación) al ataque de cobre y de las superficies de plomo, las cavitaciones por rompimiento de burbujas son entre otros los aportes principales del agua a un mayor desgaste mecánico. La humedad también degrada aditivos y acelera la velocidad de oxidación base del lubricante.

Combustible / Química dilución

La contaminación por combustible reduce la viscosidad del lubricante y diluye la fuerza de los aditivos. Dependiendo del contaminante químico y aplicación, otras complicaciones van desde incompatibilidad química con el lubricante, sellos, recubrimiento o material, riesgo de fuego y peligro para la seguridad.

La contaminación con el líquido refrigerante

Un problema para los motores y los sistemas enfriados con glicol es la contaminación del refrigerante que produce una amplia gama de problemas de lubricación. El glicol produce un ambiente ácido, bloqueo del paso de flujo de aceite, aumenta el desgaste y promueve la degradación del lubricante básico y sus aditivos.

Agotamiento de aditivo

Algunos sistemas son más susceptibles a problemas funcionales por lubricación causados por agotamiento de aditivos que otros. Los aceites de turbina, por ejemplo, tiene un paquete de aditivos muy simple, pero importante, que tiende a ser estable bajo circunstancias normales. Los motores, por otro lado, contienen sistemas de aditivos muy complejos que nunca cambian durante el funcionamiento.

Arrastre de Aire

El arrastre de aire puede producir una serie de fallas de lubricación funcionales, incluyendo aumento de la oxidación, la pobre transferencia térmica, cavitación en los sistemas hidráulicos. Asimismo, algunos sistemas son más propensos a incorporar aire en el lubricante que otras máquinas. La disipación efectiva del aire varía mucho dependiendo de la viscosidad del lubricante, sistema de aditivos, presencia de contaminación, el tamaño y diseño del sumidero o tanque.

Espuma

La formación de espuma, al igual que el arrastre de aire, es más o menos probable que ocurra dependiendo del lubricante, de la máquina y la aplicación. La espuma, cuando se bombea hacia los componentes, ofrece una mala lubricación en general. Al proporcionar una fuente abundante de oxígeno y que actúa como un aislante de inhibir la disipación del calor, la espuma aumenta la velocidad a la que el lubricante se oxida. El tanque también produce un potencial de caídas del personal o riesgo de incendio cuando la espuma se desborda de su reservorio.

Más / Menos Engrase

Para los rodamientos engrasados, especialmente los motores, el exceso de grasa puede ser tan malo como cuando es demasiado poco. El sobre engrase provoca la generación de calor excesivo en los rodamientos. Del mismo modo, la grasa empuja hacia el bobinado de los motores contaminándolos causando problemas eléctricos.

2.2.1.5. Lubricantes

Definición:

Díaz, J. (2006). Sostiene que el término lubricante corresponde a la sustancia que se utiliza para reducir el rozamiento entre dos superficies. Los lubricantes se clasifican en general como gaseosos, líquidos, semisólidos y sólidos.

Por ende, el lubricante es un elemento vital para el funcionamiento de las máquinas y es el responsable de mantener con vida el proceso productivo de las empresas.

Una mala elección del lubricante o la ausencia del mismo, puede generar problemas graves que se manifiestan entre otras, en costosas reparaciones, paradas improductivas, elevación en los costos de mano de obra, cambio de repuestos o necesidad de reposición de las máquinas, así como la pérdida de calidad del producto, es decir, pueden tornar los procesos productivos de una empresa en ineficaces e ineficientes. Así el mencionado autor alude también a una serie de tipos de lubricantes que son:

Tipos de lubricantes: Dependiendo de su composición y presentación tenemos:

Líquidos: la base es de origen mineral o vegetal, se utilizan para la lubricación hidrodinámica y son usados en la industria como por ejemplo los aceites.

Semisólidos: Conocidas como “Grasas”, su composición puede ser vegetal o mineral, estos también en algunas ocasiones pueden ser combinados con Grafito, Molibdeno o Litio.

Sólidos: Es de mínima resistencia molecular interna es por ello que brinda óptimas condiciones de lubricación. Uno de los más conocidos y utilizados es el grafito.

En la presente tesis mencionaremos:

Aceite

Puede ser de origen animal, vegetal o mineral, de estado líquido insoluble en agua, hidrocarburos menos densos en el agua, donde se compone por ésteres de ácidos grasos o por hidrocarburos derivados del petróleo.

Grasa

Sustancia orgánica, untuosa y sólida a temperatura ambiente, que se puede encontrar en el tejido adiposo de los animales, vegetales además en semillas de plantas, se constituye por una mezcla de ácidos grasos y ésteres de glicerina.

Tipos de aceites

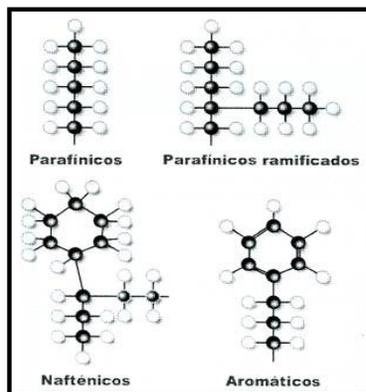
Aceites minerales.

Los aceites minerales son los aceites formulados con aceites básicos que provienen de la refinación de los crudos de petróleo.

Se pueden clasificar en base a la función que desempeñan y los tipos de aplicaciones industriales. Por lo general existen hasta tres tipos de aceites minerales:

Aceites parafínicos, nafténicos y aromáticos. (Ver figura n.º 2).

Figura n.º 2. Estructuras moleculares comunes de aceites minerales.



Fuente: Lansdown. Manual de análisis de Aceites de Noria.

Aceite Sintético

El término hidrocarburo sintetizado (**SHC**), y lubricantes sintéticos, son utilizados igualmente para describir una familia de aceites y grasas sintéticos que incluyen aceites circulantes, de engranes, hidráulicos, grasas y aceites de compresores.

Estos lubricantes son utilizados en una gran variedad de aplicaciones industriales por definición, un lubricante sintético es un lubricante diseñado y elaborado para servir mejor a los propósitos previamente reservados para productos extraídos directamente del petróleo. Los términos sintetizado y sintético, describen los aceites básicos principalmente Polialfaolefinas (PAOs). Adicionalmente, hay otros tipos de aceites básicos que incluyen poli glicoles, ésteres orgánicos, ésteres fosfatados y siliconas.

El tamaño y forma idéntica en los sintéticos, proporcionan un mayor coeficiente de tracción y menor fricción interna entre las moléculas bajo carga. (Reliabilitiweb, 2016,parr.5).

Las propiedades especiales de los aceites sintéticos, justifican el costo adicional cuando los lubricantes minerales no pueden proporcionar el adecuado desempeño. El uso de un aceite sintético se justifica, basado en las consideraciones económicas de la aplicación. Generalmente un sintético proporciona entre 5 a 10 veces más vida, comparado con un aceite mineral. Los sintéticos pueden costar alrededor de 5 veces más que un aceite mineral, por lo que no se podrá frecuentemente justificar su uso basado únicamente en el costo del aceite y la extensión de su vida útil. En su proceso de decisión, asegúrese de incluir todos los conceptos que intervienen en el costo y los beneficios potenciales que estos aceites le proporcionan:

- Menos partes de reemplazo
- Menos costos por mano de obra
- Menos cambios de aceite.
- Menos costos por disposición
- Menos filtros.
- Ahorros de energía
- Producción con menores interrupciones.
- Entre otras.

Clasificación ISO de los aceites Industriales.

La International Organization for Standardization (ISO) a partir del 1º de enero de 1978 hizo efectiva la clasificación ISO de viscosidades para los lubricantes líquidos industriales, identificada con ISO 3448, (*ver Tabla n. °1.*) que establece 18 grados de viscosidad comprendidos entre 2 y 1500. Cada uno de estos grados se designa por el número entero más cercano a su viscosidad cinemática media, expresada en centistokes (**cSt**) a 40°C permitiéndose una variación de $\pm 10\%$ de este valor.

Por otro lado, en años anteriores a la publicación de la clasificación ISO otros organismos como la Sociedad Americana de Fabricantes de Engranajes (**AGMA**), la Sociedad

Americana de Ingenieros Automotrices (**SAE**), desarrollaron otros métodos para medir la viscosidad de aceites lubricantes de uso en engranajes industriales y automotores, en la actualidad estos tres sistemas de clasificación siguen vigentes.

Tabla n. °1. Clasificación ISO de viscosidades para los lubricantes líquidos industriales, identificada con ISO 3448.

Grado de Viscosidad ISO	Viscosidad Media (cSt @ 40°C)	Límite de Viscosidad Cinemática (cSt @ 40°C)	
		Mínima	Máxima
ISO VG 2	2,2	1,98	2,42
ISO VG 3	3,2	2,88	3,52
ISO VG 5	4,6	4,14	5,06
ISO VG 7	6,8	6,12	7,48
ISO VG 10	10	9	11
ISO VG 15	15	13,5	16,5
ISO VG 22	22	19,8	24,2
ISO VG 32	32	28,8	35,2
ISO VG 46	46	41,4	50,6
ISO VG 68	68	61,2	74,8
ISO VG 100	100	90	110
ISO VG 150	150	135	165
ISO VG 220	220	198	242
ISO VG 320	320	288	352
ISO VG 460	460	414	506
ISO VG 680	680	612	748
ISO VG 1000	1000	900	1100
ISO VG 1500	1500	1350	1650

Fuente: ISO (*International Organization for Standardization*).

Análisis de aceite.

El análisis de aceite es una tecnología que es usada como herramienta del mantenimiento predictivo - proactivo que permite a través de su adecuada interpretación prevenir o anticiparse a los sucesos de falla de las maquinarias. Hay por lo menos seis razones básicas para el uso del análisis de aceites esto es para:

- Monitorear el desgaste de los componentes de la maquinaria.
- Determinar el nivel de limpieza del lubricante.
- Inspeccionar los contaminantes.
- Asegurarse que el lubricante en servicio es el correcto.
- Monitorear la degradación del lubricante.
- Optimizar los intervalos de cambio de aceite.

Pero para cada una de estas razones existen una o varias pruebas o ensayos de laboratorio que deben estar orientadas hacia tres áreas específicas.

- Condición del Equipo : Rebasas de desgaste
- Condición de Contaminación : Contaminación del fluido
- Condición del Lubricante : Propiedades del aceite

Generalmente, es necesario efectuar las pruebas en las tres áreas, para evitar la falla de los equipos, aunque en ocasiones algunas de las pruebas trabajan en dos o más áreas, esto se utiliza para asegurarnos de la evidencia de alguna condición anormal.

El análisis de aceite es una estrategia ampliamente utilizada y de grandes beneficios económicos. Los avances en computación, programas e instrumentación han propiciado grandes cambios en el campo. Esta nueva tecnología hace que los programas de análisis de aceite sean más fáciles de administrar y asegura un alto retorno del dinero invertido en mantenimiento.

En la (*Tabla n. 2.*) puede encontrar las categorías en análisis de aceites.

Tabla n.º2. Categorías en análisis de aceites.

Pruebas	Propiedades del Aceite	Contaminación	Rebabas de desgaste
Propiedades que se analizan	Propiedades físicas y químicas del aceite usado	Contaminantes destructivos del aceite y la maquinaria	Presencia e identificación de las partículas de desgaste
Análisis de humedad	N	I	N
Análisis de Conteo de partículas	N	I	M
Densidad de rebabas	N	N	I
Análisis Espectrofotométrico	I	M	I
Ferrografía analítica	N	M	I
FTIR (Espectroscopia Infrarroja)	I	M	N
Prueba de membrana	N	I	M
Punto de inflamación	M	I	N
TAN / TBN	I	M	M
Tipo de Mantenimiento	Proactivo	Proactivo	Predictivo

I	Beneficio Importante
M	Beneficio menor
N	No proporciona beneficio

Fuente: Trujillo, G. Interpretación de análisis de aceites.

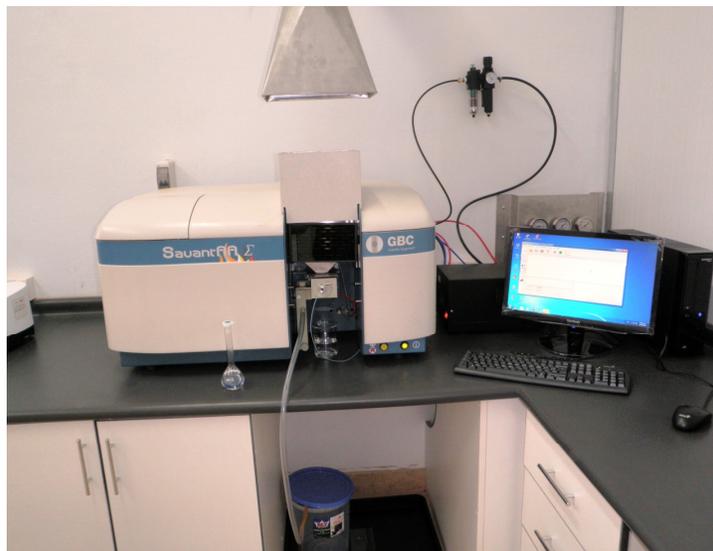
Análisis Espectrofotométrico:

Esta técnica se utiliza para detectar y cuantificar elementos metálicos en un aceite usado como resultado del desgaste, contaminación y aditivos del aceite. (Aunque en ocasiones se utiliza para aceites nuevos, no es muy común). La muestra de aceite es energizada

para hacer que cada elemento emita o absorba una cantidad cuantificable de energía, lo cual indica la concentración de elementos en el aceite. Los resultados reflejan la concentración de elementos metálicos disueltos como los aditivos y también partículas muy finas de desgaste. Esta prueba es la columna vertebral de la mayoría de los laboratorios de análisis de aceite en el mundo, ya que proporciona información de la máquina, la contaminación y la condición del desgaste relativamente rápido y precisa. Su limitación principal es que su eficiencia de detección es muy baja para partículas de tamaño de 5 μm (micrones) o mayores. Las partículas con diámetros mayores de 10 μm son generalmente las partículas resultantes de desgaste anormal y esas partículas deberán ser cuantificadas para determinar la ocurrencia del desgaste. Esta técnica tiene una exactitud promedio del 10%, aunque hay equipos nuevos que actualmente reportan un 3%.

En la (Figura n° 3.) se muestra un espectrofotómetro de absorción atómica Modelo SAVANTAA SIGMA del año 2013, el cual puede analizar los siguientes elementos: **Cu, Fe, Cr, Ni, Ti, V, Cd, Ag, Pb, Sn, Al, Si, Na, K, Mo, B, Ba, Ca, Mg, Mn, P, Zn**. Estos metales pueden ser desgastes, contaminantes o aditivos.

Figura n°. 3. Espectrofotómetro de absorción atómica modelo SAVANTAA SIGMA.



Fuente: Equipo de LUBEMAN LABORATORIO E.I.R.L

Análisis de viscosidad:

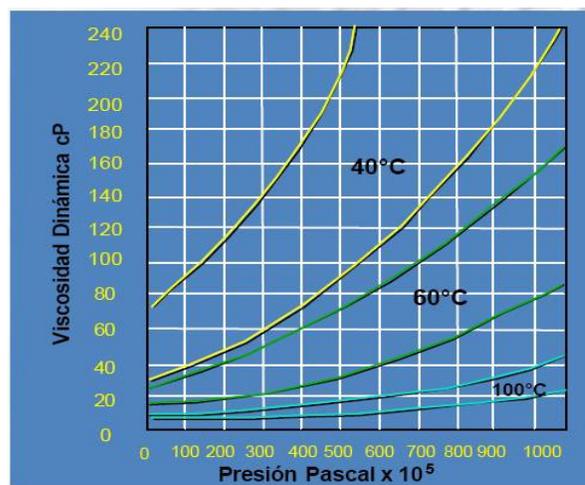
El viscosímetro es un instrumento que mide la viscosidad y algunos otros parámetros de flujo de un fluido. Isaac Newton fue el primero en crear una fórmula para medir la viscosidad de fluidos, propuso que dicha fuerza correspondía al producto del área superficial del líquido por el gradiente de velocidad, posteriormente en 1884 Jean Léonard Marie Poiseulle superó esta técnica realizando nuevos estudios sobre el movimiento de líquidos en tuberías.

Considerar el uso de la prueba de Viscosidad es importante, ya que en un aceite usado no sólo varía la viscosidad, sino también el peso específico o gravedad del aceite, dando por resultado un error en el resultado, ya que la viscosidad cinemática es igual a la Viscosidad Absoluta / Densidad.

Las pipetas de cristal pueden llegar a tener una reproducibilidad de un 0,1% bajo condiciones ideales, lo que significa que pueden sumergirse en un baño no diseñado inicialmente para la medida de la viscosidad, con altos contenidos de sólidos, o muy viscosos. No obstante, es imposible emplearlos con precisión en la determinación de la viscosidad de los fluidos no-newtonianos, lo cual es un problema ya que la mayoría de los líquidos interesantes tienden a comportarse como fluidos no-newtonianos. Hay métodos estándares internacionales para realizar medidas con un instrumento capilar, tales como el (ASTM D445).

En la (Figura n.º 4.) Se muestra las curvas de variación de la viscosidad con la presión mientras que en la (Figura n.º5). se observa un equipo viscosímetro automático de marca Cannon, modelo Mini QV-X.

Figura n.º. 4. Variación de la viscosidad con la presión.



Fuente: Tutor de Lubricación de Shell.

Figura n.º 5. Viscosímetro automático de marca CANNON, modelo MiniQV-X.



Fuente: Equipo de LUBEMAN LABORATORIO E.I.R.L

Análisis Infrarrojo (FTIR):

Esta técnica espectrométrica se utiliza para detectar componentes orgánicos en el aceite, agua y productos de degradación de una muestra de aceite usado. Durante la utilización del aceite, este se degrada y en ocasiones se acidifica. Si la oxidación del aceite fuera severa, el lubricante corroerá las superficies del equipo. Mientras mayor sea el “Número de Oxidación”, mayor oxidación tendremos.

La espectrometría infrarroja indica también contaminación debida a combustible, agua libre, glicol del anticongelante y depósitos por hollín. Algunos fabricantes de equipo han establecido algunos parámetros de advertencia, pero recomendamos que sea utilizada como una herramienta de monitoreo de tendencia. Los valores deberán ser considerados para cada aplicación, tipo de maquinaria, severidad, etc.

Análisis del Número Ácido Total (TAN):

Es un método diseñado para indicar la acidez relativa del aceite. El número ácido es utilizado como una guía de seguimiento de la degeneración por oxidación de un aceite en servicio. Los cambios de aceite son frecuentemente recomendados cuando el valor del TAN alcanza un nivel predeterminado para un cierto tipo de lubricante y aplicación. Un incremento repentino del TAN deberá ser considerado como un indicador de condiciones anormales de operación (tal vez sobrecalentamiento) que requiere de una investigación por parte de mantenimiento. La mayoría de los fabricantes de aceites proporcionan límites condenatorios en sus recomendaciones. Recomendamos establecer un límite máximo dependiendo del tipo de aceite y la aplicación y monitorear la tendencia del aceite para detectar los cambios repentinos. El comportamiento del TAN es muy estable generalmente, manteniendo una tendencia en principio negativa y posteriormente se

estabiliza, sin embargo, cuando la oxidación inicia, la tendencia se incrementará de manera exponencial. Esta prueba tiene la designación de (**ASTM D 974**) y su exactitud es del $\pm 15\%$.

Análisis Número Básico Total (TBN):

El Número básico, es el inverso del TAN y es una prueba utilizada para determinar la reserva alcalina de un lubricante. El TBN es aceptado generalmente como un indicador de la habilidad del lubricante para neutralizar ácidos peligrosos formados por la combustión de productos en motores de combustión interna. El TBN es normalmente aplicado a motores a Diesel. Los fabricantes de motores generalmente establecen en sus límites condenatorios valores límites mínimos para la operación y determinan el cambio de aceite cuando estos sean alcanzados. De igual manera recomendamos evaluar la tendencia y actuar cuando cambios súbitos se presenten.

Análisis de Humedad:

El agua es un elemento no deseado normalmente en el lubricante, ya que el agua destruye la capacidad del lubricante para proteger las partes en movimiento y además ataca los aditivos del aceite, haciendo que el equipo sufra desgaste, herrumbre y corrosión. Otro efecto del agua en los lubricantes es la formación de espuma, incremento de temperatura y lodo en los tanques. La contaminación por agua no deberá exceder del 0.25% en la mayoría de los equipos y no más de 100 ppm. para aceites de turbinas y sistemas de control. Hay varios métodos o pruebas utilizados para evaluar la humedad, cada uno con diferentes niveles de detección, (ver *Tabla n.º 3*).

Tabla n.º 3. Pruebas para detectar agua en el lubricante.

Visual	> 1%	Bajo	Prueba de campo sólo cualitativa	Sólo es posible ver agua en cantidades grandes
Crepitación	1000 ppm (0.1%)	Bajo	Buen indicador de campo, fácil de efectuar	Sólo cualitativo – No válido para tendencia.
Agua por FTIR	1000 ppm (0.1%)	Bajo	Cuantitativo. Bueno para tendencia, fácil de efectuar	Si hubiera glicol, puede haber confusión
Centrífuga	1000 ppm (0.1%)	Bajo	Utilizado para detectar agua en el combustible.	No es muy efectivo, debido a los aditivos demulsificantes.
Karl Fisher	10 ppm (0.001%)	Alto	Cuantitativo, excelente como tendencia, muy exacto aún con baja humedad	Requiere solventes, genera desechos Se requieren expertos

Fuente: Trujillo, G. Interpretación de análisis de aceites.

Análisis de conteo de partículas:

Es un método para clasificar y contar partículas en el fluido lubricante de acuerdo con rangos aceptados de tamaño, por organismos como la **ISO** con su norma **ISO 4406-99** entre otros. La más utilizada es la **ISO 4406**, la cual especifica el nivel de limpieza de un aceite con base en tres números, el primero de los cuales indica el número de partículas mayores o iguales a 4 µm; el segundo a 6 µm y el último a 14 µm presentes en 1 ml de muestra del aceite evaluado.

Se lleva a cabo mediante la utilización de un Contador de Partículas (funciona con una base óptica láser) que permite una medición absoluta de las partículas de 2 µm en adelante presentes en una muestra del aceite (no especifica el tipo de material). Hay varios tipos de instrumentos utilizados para conteo de partículas, que utilizan diferentes sistemas y tecnologías, desde contadores ópticos láser hasta los de monitoreo de bloqueo de poro.

El conteo de partículas, cuenta todas las partículas en la muestra de aceite sin importar el tipo de elemento de que se trate y las clasifica de acuerdo a su tamaño. Su interpretación

deberá ser en función de los parámetros de limpieza que se hayan establecido para cada aplicación en particular, cualquier variación por arriba de los límites, deberá generar una investigación de la causa y probablemente sea necesario tomar acciones de filtración, reemplazo de filtros, aceites, etc. La eficiencia de los equipos puede variar en función del tipo de aceite y los aparatos, generalmente es del 10%.

En la (Figura n.º 6).Se puede observar el contador de partículas PAMAS SBSS de tecnología alemana, calibrado según estándar **ISO 11171** que reporta usando la norma **ISO 4406**. Este equipo permite una alta repetitividad de los valores medidos a diferencia de otras tecnologías. Cuantifica y categoriza según el tamaño, la cantidad de partículas existentes en un aceite hasta un tamaño de 80 micrones. Cuantifica tanto partículas metálicas como no metálicas. Se aplica en aceites de sistemas cerrados y no a los de sistemas abiertos (motor).

Este equipo es un aliado indiscutible para los ambiciosos programas de control de contaminación que permite una adecuada conservación de los equipos.

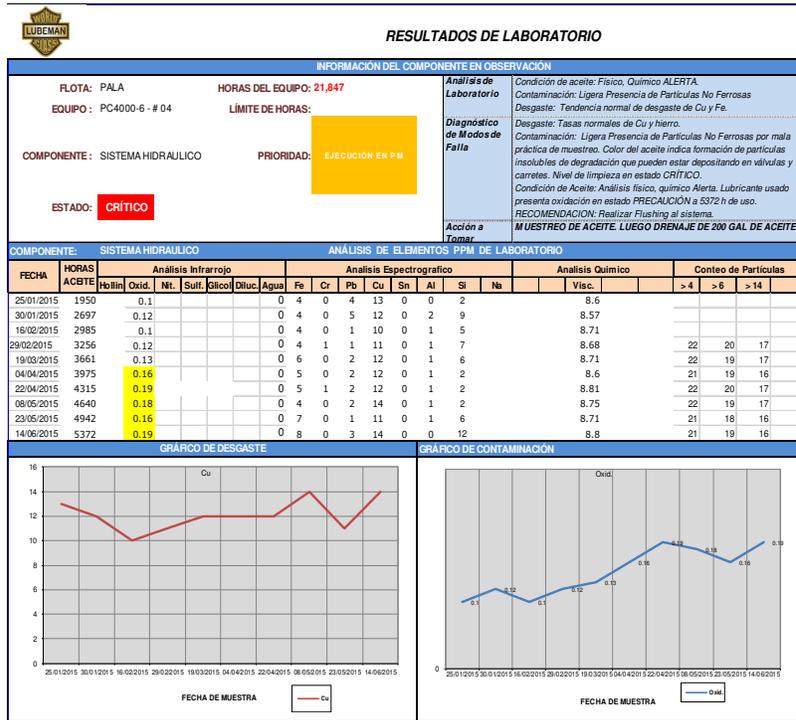
Figura n.º 6. El contador de partículas PAMAS SBSS.



Fuente: Equipo de LUBEMAN LABORATORIO E.I.R.L

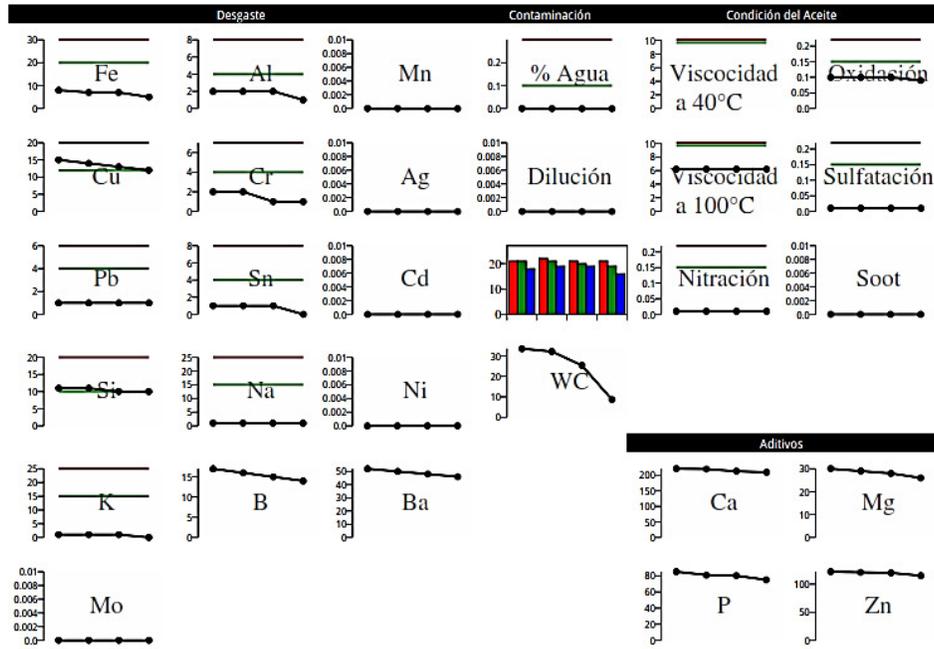
Con los Análisis mencionados podemos obtener un reporte de Análisis por monitoreo de condición del aceite tal como se aprecia en la (figura n.º 7).

Figura nº. 7. Reporte de análisis por monitoreo de condición del aceite.



Fuente: Reporte de LUBEMAN LABORATORIOS para KOMATSU MITSUI- análisis de aceite
hidráulico de la PALA PC4000-6-#4

Figura nº. 8. Tendencias de desgaste, contaminación, aditivos de análisis por monitoreo de condición del aceite de reporte.



Fuente: Reporte de LUBEMAN LABORATORIOS para KOMATSU MITSUI análisis de aceite hidráulico de la PALA PC4000-6-#4

Los aditivos usados en la formulación de lubricantes.

Los aditivos son sustancias químicas que se agregan al lubricante básico para mejorar ciertas propiedades.

Esto es, una vez obtenido el lubricante básico, se le agregan principalmente aditivos antioxidantes y anticorrosivos. Estos aditivos son absolutamente necesarios en todos los lubricantes básicos para brindar resistencia a la corrosión a los metales con los que el lubricante va a estar en contacto y resistencia a la oxidación para el lubricante mismo. La oxidación es muy común entre los aceites y es fácilmente reconocida, por ejemplo, en la cocina de casa, la manteca y otras cosas que contienen aceite se ponen rancias debido a la oxidación de estos productos. Todos los lubricantes básicos eventualmente se oxidan y se degradan. Esto es lo que hace que un lubricante usado adquiera una coloración oscura y aumente su viscosidad. Los aditivos son importantes y esenciales para brindar durabilidad y consistencia a los lubricantes.

Una vez que el aceite básico ha sido combinado con los dos aditivos mencionados anteriormente (antioxidantes y anticorrosivos), se le agrega un segundo “paquete” de aditivos. Este paquete provee las características especiales a cada lubricante. Lo

interesante del asunto es que la materia prima afecta la calidad final tanto como cada uno de los aditivos que conforman la mezcla.

- Compuestos orgánicos e inorgánicos disueltos o suspendidos (como sólidos) en el aceite.
- Pueden representar entre el 0.1% y el 30 % del volumen de un aceite formulado.

Clasificación de los aditivos.

En la actualidad existen diferencias entre los fabricantes de aditivos en cuanto a su denominación existiendo en algunas ocasiones varios nombres para un solo tipo de aditivo por lo que es más conveniente clasificarlos sobre la base de la función que desempeñan.

Mejorar las propiedades existentes del aceite básico.

- Antioxidantes
- Inhibidores de corrosión
- Agentes antiespumantes
- Agentes demulsificantes

Suprimir propiedades indeseables del aceite básico.

- Depresores del punto de congelación
- Mejoradores del índice de viscosidad (IV)

Imparte nuevas propiedades al aceite básico.

- Aditivos de extrema presión (EP) o anti desgastes (AD)
- Detergentes
- Deactivadores de metales
- Agentes de adhesividad.

Contaminación del lubricante

La contaminación y la degradación son las principales causas que reducen la efectividad de los lubricantes.

En los aceites usados de cárter se encuentra por lo general agua, suciedad atmosférica, combustible, escapes de la combustión tipo hollín, y metales de desgaste del motor. Los lubricantes almacenados en envases abiertos o el uso de equipo de suministro sucio son las causas de que se Introduzcan materias extrañas en el aceite cuando este se añade.

Código ISO de contaminación de sólidos

La prueba de conteo de partículas con las que se monitorea la contaminación del aceite lubricante requiere un método estándar para reportar sus resultados.

La norma **ISO 4406-99** que reemplaza a la norma **ISO 4406-87** establece cómo se informan estos resultados. Esta norma contiene una tabla con códigos asignados a diferentes rangos, que representan cantidades de partículas en 1 ml de muestra. Una vez obtenidos los resultados de la medición, clasificados por estos rangos, se eligen los rangos que contienen la cantidad acumulada de partículas mayores de 6 micrones y aquel que corresponda a las mayores de 14 micrones. Con esas cantidades se determinan los códigos de la Tabla **ISO 4406** para cada rango acumulado y se informa en forma mínima como **R₆/R₁₄** sólo con dos códigos. La forma completa (aunque menos frecuente) del reporte incluye un tercer código **R₄**, que corresponden a la cantidad acumulada de partículas mayores que 4 micrones. Entonces el informe queda como **R₄/R₆/R₁₄**

Control de la Contaminación en los Aceites Lubricantes.

Cualquier disminución en la certeza a causa de la contaminación líquida tiene un impacto mayor en costos de mantenimiento, así como en la productividad de la máquina. Para aumentar la confiabilidad del sistema, se debe de establecer un programa para el control de la limpieza La contaminación del aceite coloca una amenaza grave al desempeño y la confiabilidad de estos sistemas.

Las fallas de componentes o sistemas hidráulicos y lubricantes son, la mayoría de las veces, relacionados a una cantidad excesiva de contaminación.

Las fallas Tribológicas cuestan a la industria miles de millones de dólares por año, pero pueden ser aminoradas fácilmente.

Las instalaciones que operan actualmente pueden recortar costos del mantenimiento dramáticamente, y mejorar la producción apreciablemente, por aplicar correctamente las técnicas probadas del control de la contaminación.

La vida útil de las maquinarias depende de que los factores que causan las fallas sean mantenidos dentro de límites aceptables, para ello debemos detectar estas causas y aplicar acciones correctivas para eliminarlas y prevenir sus efectos.

Fases del Control de la Contaminación.

a) Fase de Formación y Capacitación.

Fase de sensibilización al personal. En esta etapa el personal de mantenimiento debe ser capacitado en diversas materias como, técnicas de cambio de aceites, lubricación básica, filtración y los fundamentos del control de la contaminación entre otros.

b) Selección de Maquinarias con las que se iniciará el Programa de Control de la Contaminación.

Aquí se deben elegir los equipos más críticos cuyas fallas repercuten fuertemente en gastos asociados a fallas.

Antes de iniciar el programa, se registran las condiciones actuales de la maquinaria. Se mide la concentración y tamaño de partículas, la cantidad de humedad y la temperatura del aceite de la maquinaria. Si se conoce estos datos desde el principio se facilitará la medición comparativa del ahorro una vez ya implementado el Programa.

Implementación del Control de la Contaminación.

1) Establezca objetivos para sus niveles de limpieza de contaminantes.

Aquí debemos fijar para cada uno de los fluidos lubricantes de las maquinarias, un objetivo de limpieza, utilizando el código **ISO 4406-99**, mida el nivel de limpieza inicial del conteo de partículas y compárelo con el objetivo. El objetivo debe ser un nivel mayor de limpieza.

2) Determinar las Acciones a tomar para lograr los Objetivos de Limpieza.

Se deben establecer las acciones para evitar y controlar el ingreso de partículas en el sistema y designar las responsabilidades respectivas.

Se utilizarán dos estrategias:

a) Exclusión: Evitar que las partículas contaminantes ingresen a los componentes de las maquinarias.

b) Remoción: Si han ingresado las partículas contaminantes entonces se las debe de retirar rápidamente.

3) Medir los Niveles de Limpieza Códigos ISO de los lubricantes.

Si podemos medirlo, lo podemos controlar. Entonces en función de los valores que reporten los análisis de aceites, de los códigos ISO, de los niveles de agua, del nivel de algún otro contaminante se aplicarán las acciones específicas al lubricante y su aplicación para minimizar y controlar los efectos que estos puedan causar a las maquinarias. Estas acciones permitirán verificar el desempeño de filtros, condición de sus componentes, rotura de sellos, decidir si se utiliza dialización, condición de los respiradores, entre otros.

4) Interpretación de Resultados de Análisis de Aceite.

El fin primordial del análisis de aceite es informar sobre una condición anormal o el inicio de falla incipiente, por ello todo programa de análisis de aceites debe contar con una adecuada interpretación de los resultados, sobre la base de las indicaciones analíticas saber exactamente qué significado tienen los resultados y que permita

fácilmente reconocer los problemas y tomar las medidas necesarias para poder controlar o minimizar los efectos potenciales de una falla en el equipo.

A continuación (ver *Tabla n. 4*). Se indican los probables problemas detectados en el análisis de aceite y las condiciones operativas a tener en cuenta.

Tabla n. 4. Problemas detectados en el análisis de aceite.

Problema Detectado	Análisis Realizados	Consideraciones Operativas
Lubricante equivocado.	Cambios en la viscosidad, IV, punto de inflamación, elementos de aditivos, FTIR, TAN, TBN.	Cambio en la temperatura del rodamiento de bolas. Desgaste de rodamiento de bolas o ruido. Vuelta de flecha difícil
Deterioro del aceite básico	Incremento de viscosidad, TAN, conteo de partículas o partículas ferrosas. Decremento de TBN. Cambio en el IV.	Pobre separación de agua – aceite. Aire atrapado, formación de espuma. Olor desagradable, formación de lodo o barniz. Oscurecimiento del aceite. Prueba de papel de filtro amarillo-café.
Contaminación con agua.	Incremento de: viscosidad, TAN, concentración de Ca, Mg y/o Na Degradación de aditivos. Prueba de crujido. Pruebas de papel de filtro.	Aceite nebuloso, opacidad, agua batida/ separada, formación de lodos. Evidencia de desgaste, corrosión. Filtros: Papel ondulado, alta caída de presión, vida reducida. Atascamiento de válvulas.
Agotamiento de aditivos.	Decremento del TAN, del ZDDP. Incremento de viscosidad, TAN, conteo de partículas. Incremento de oxidación, sulfatación y/o nitración.	Oscurecimiento del aceite. Olor desagradable, Operación caliente.
Aire atrapado	Incremento de: viscosidad, TAN, agua y/o FTIR para oxidación. Antiespumantes de silicio muy altos o bajos. Prueba de papel de filtro: Carbón coquizado en la membrana.	Aceite nebuloso/ exhumación. Incremento en la temperatura del aceite. Sistemas hidráulicos esponjosos, lentos, cavitación en la bomba/ rodamiento de bolas, operación ruidosa.
Falla de filtro	Incremento de silicio, aluminio, conteo de partículas y/o hierro	Atascamiento de válvulas. Rodamientos ruidosos. Presión diferencial en los filtros alta o sin cambio. Fallo frecuente de rodamiento de bolas, altos niveles de sedimento en el fondo.

Fuente: Manual de Lubricación marina de Maraven S.A de Venezuela, año 1990.

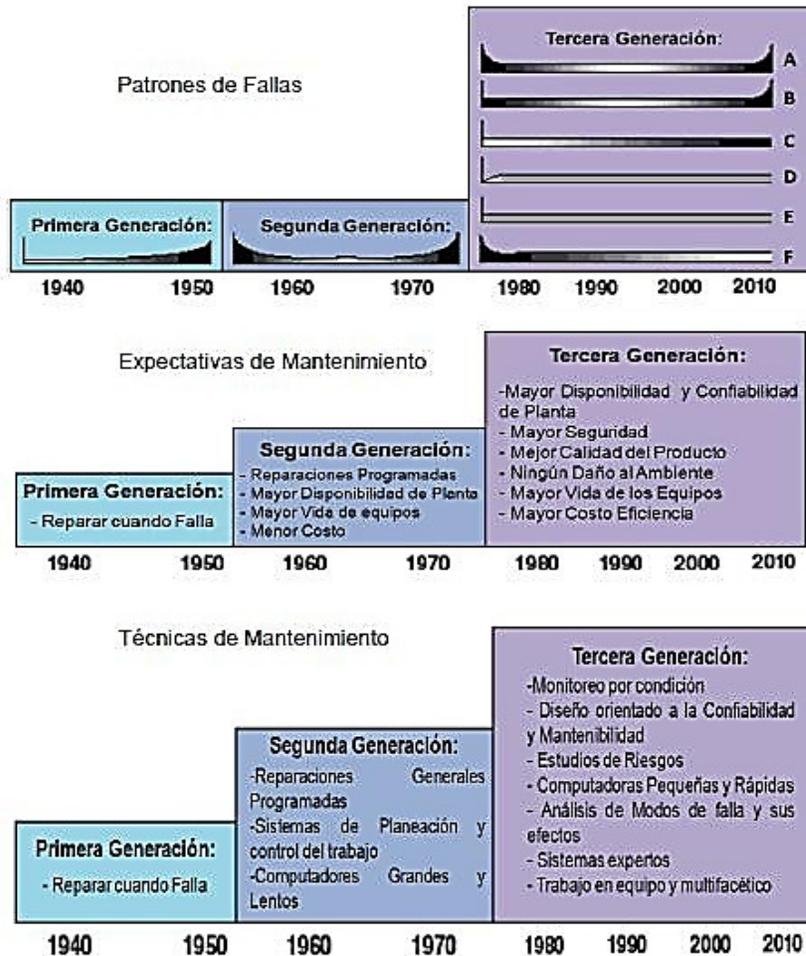
2.2.2. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)

Historia del RCM

En 1974, el Departamento de Defensa de los Estados Unidos le asignó a la empresa United Airlines preparar un informe sobre los procesos usados por la industria de la aviación civil a fin de elaborar programas de mantenimiento para los aviones, este informe fue realizado por F. Stanley Nowlan Director de Análisis de Mantenimiento de United Airlines y Howard F. Heap, Gerente de Planeación del Programa de Mantenimiento de United Airlines, el documento fue publicado en 1978 y fue titulado Mantenimiento Centrado en Confiabilidad o RCM por sus siglas en inglés Reliability-Centered Maintenance. (*Reliability-Centered Maintenance RCM II, Jhon Moubray 3 MOUBRAY. JHON., 1997. P.318*)

El RCM se desarrolló debido a que en las teorías de mantenimiento de la época siempre habían relaciones causa efecto entre el mantenimiento programado y la confiabilidad operacional, esta suposición estaba basada en la creencia intuitiva de que las partes mecánicas se desgastaban y que la confiabilidad de cualquier equipo estaba directamente relacionada con la edad operacional, el único problema que había era determinar la edad límite de las partes para reemplazarlas y asegurar una operación confiable. Las teorías del mantenimiento en el tiempo se ha diferenciado por generaciones (ver *Figura n° 9*), la primera y segunda generación del mantenimiento utilizaban como modelos los patrones de falla tradicionales como el Patrón A o curva de la Bañera esta comienza con una gran incidencia de fallas (mortalidad infantil) seguida por un incremento constante o gradual de la probabilidad condicional de falla y por ultimo una zona de desgaste o el Patrón B que muestra una probabilidad condicional de falla constante o que crece lentamente y que termina también en una zona de desgaste, sin embargo a través de los años se descubrió que muchos tipos de fallas no podían ser prevenidas de forma efectiva sin importar cuán intensas fueran las actividades de mantenimiento preventivo que se realizarán debido a que las fallas no seguían los patrones tradicionales A o B, pero gracias a las investigaciones realizadas en la industria de la aviación se logró determinar que habían en realidad seis patrones de falla distintos que afectaban la confiabilidad y la disponibilidad de los equipos, con estos cambios de paradigmas se inició la tercera generación del mantenimiento en el cual las exigencias y expectativas de mantenimiento son mucho mayores lo que obligó a realizar también cambios radicales en las técnicas y teorías del mantenimiento.

Figura nº. 9. Evolución de las teorías de mantenimiento por generaciones.



Fuente: Reliability-Centered Maintenance RCM II, Jhon Moubray

Fuente: Reliability-Centered Maintenance RCM II, Jhon Moubray

Definición de RCM:

RCM o Reliability Centered Maintenance, (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad) es una técnica más dentro de las posibles para elaborar un plan de mantenimiento en una planta industrial y que presenta algunas ventajas importantes sobre otras técnicas. Inicialmente fue desarrollada para el sector de aviación, donde los altos costes derivados de la sustitución sistemática de piezas amenazaban la rentabilidad de las compañías aéreas. Posteriormente fue trasladada al campo industrial, después de comprobarse los excelentes resultados que había dado en el campo aeronáutico. (RCM. videograbación producido por Instituto Renovetec)

La Norma **SAE JA1011** (Una guía para el estándar de mantenimiento centrado en confiabilidad, RCM) define el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad de la siguiente

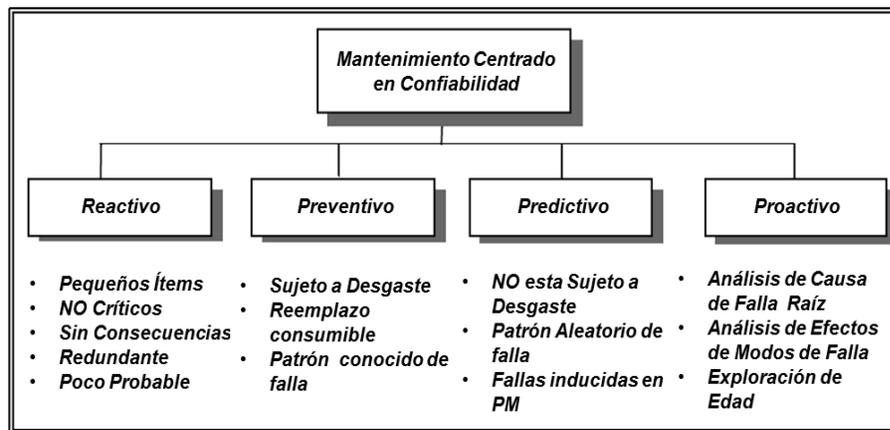
manera: “RCM es un proceso específico usado para identificar las políticas que deben ser implementadas para administrar los modos de falla que pueden causar fallas funcionales en cualquier activo físico en su contexto operacional”

En el Libro de RCM II de Moubray, J. (1997) el autor plantea la siguiente definición: Reliability Centered Maintenance (RCM) es un proceso utilizado para determinar qué se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional actual”. “El RCM es el proceso usado para determinar el enfoque más efectivo del mantenimiento, esto implica identificar acciones que cuando se toman reducen la probabilidad de falla de la forma más costo-efectiva buscando una mezcla óptima de acciones basadas por condición, acciones basadas en ciclos o en tiempo o el enfoque de operar hasta que falle”.

En conclusión, el RCM es un proceso que permite determinar las tareas mínimas de mantenimiento (Correctivo, Preventivo, Predictivo y Proactivo) necesarias para que los activos cumplan con su función en su contexto operacional

En la *Figura n. °10*. se puede observar los tipos de mantenimiento según el RCM.

Figura nº. 10. Tipos de mantenimiento según RCM.



Fuente: NASA Reliability Centered Maintenance guide or facilities and collateral equipment.

RCM y las siete preguntas básicas:

El RCM plantea siete preguntas básicas acerca del activo o sistema que se quiere revisar:

1. ¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo en su actual contexto operacional?
2. ¿De qué manera falla en satisfacer dichas funciones?
3. ¿Cuál es la causa de cada falla funcional?
4. ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?
5. ¿En qué sentido es importante cada falla?
6. ¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir la falla?
7. ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada?

Fuente: Ortiz, D. Memorias; Curso, Mantenimiento centrado en confiabilidad - RCM.

2.2.3. El proceso FMEA

El proceso FMEA para las fallas de lubricación

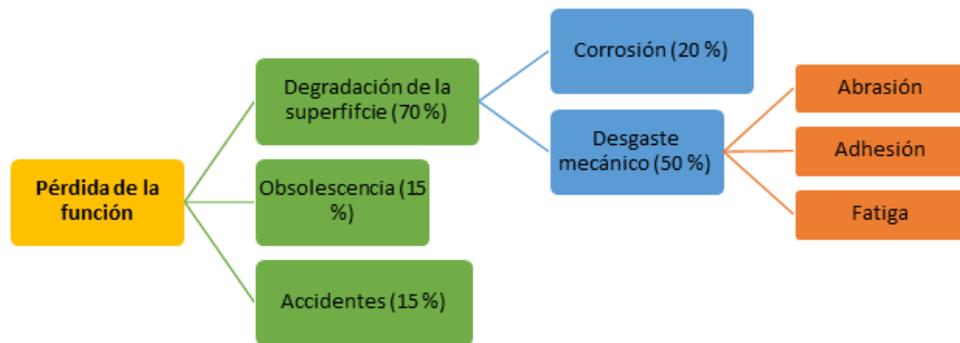
La metodología de RCM orienta las decisiones de asignación de recursos para asegurar que las actividades de mantenimiento y objetivos de confiabilidad estén estrechamente alineadas. A su vez, estos objetivos de confiabilidad están alineados con los objetivos de la organización tales como maximización de las utilidades y patrimonio de los accionistas, seguridad, impacto ambiental, entre otros., para una óptima operación.

Una herramienta importante del RCM es el análisis de modo y efecto de falla (FMEA por sus siglas en inglés). A diferencia del análisis de causa raíz de falla (FRCA por sus siglas en inglés) el cual es utilizado para analizar la falla después de que esta ha ocurrido, el FMEA es un proceso sistemático utilizado para identificar modos potenciales de falla y su efecto antes de que la falla ocurra. En la realidad, FRCA y FMEA trabajan en forma conjunta. FRCA prepara el escenario para el FMEA, lo que a su vez produce un plan para implementar acciones adecuadas de mantenimiento. FRCA está limitado en el sentido de que debe producirse una falla para que pueda ser aplicado, lo que resulta muy costoso para sistemas críticos. Es más práctico estimar por adelantado los modos potenciales de falla y sus consecuencias, o simular una falla en una situación experimental, que esperar a que se produzca la falla antes de que se haya implementado un plan de mantenimiento.

El ex profesor emérito del MIT Rabinowicz, E. estima en su libro, Fricción y Desgaste de los Materiales, que cerca del 70% de los casos en donde los equipos pierden su utilidad, el

desgaste y la corrosión son las causas principales de la degradación de las superficies (ver Figura n.º 11.). Expertos en la industria generalmente concuerdan que entre el 40% y el 75% de todo el desgaste en equipos industriales está relacionado de alguna forma con la lubricación, haciéndola responsable de entre el 25% y un 50% de la pérdida de utilidad de los equipos industriales. A pesar de la prevalencia de las fallas relacionadas con lubricación, la manera en que estas son típicamente documentadas en las plantas es muy informal. Por ejemplo, una repentina pérdida de volumen de lubricante causada por vibración en el tapón en el puerto de drenado y el relleno del sistema con el lubricante equivocado pueden ser catalogados generalmente como una falla en lubricación. Mientras que ambas pueden afectar significativamente la lubricación, los mecanismos mediante los cuales los equipos alcanzan este estado de falla no son comparables. También hay que señalar que las fallas de lubricación son a menudo mal diagnosticadas como falla de rodamientos, bombas, etc., cuando en realidad estos son síntomas de fallas, no las causas. Cuando se identifica correctamente que la falla es por lubricación, la naturaleza de esta falla no es lo suficientemente clara como para ser de utilidad. El FMEA es una excelente herramienta de análisis inductivo que añade precisión para identificar las fallas por lubricación y permite a los administradores de los activos anticipar y planear para ellos estrategias de mantenimiento costo-efectivas.

Figura nº. 11. Causas de la pérdida de función de un equipo.

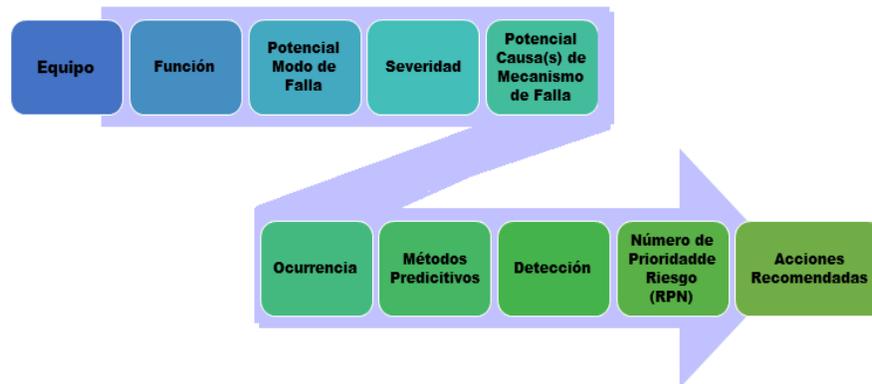


Fuente: Rabinowicz, E.(MIT)

2.2.3.1. La metodología del FMEA

La metodología del FMEA no es nueva. Sin embargo, es nuevo cuando se aplica en la optimización del mantenimiento. Los diferentes componentes y etapas del proceso básico del FMEA se describen a continuación (ver la *Figura n. ° 12*).

Figura nº. 12. Secuencia del proceso del FMEA.



Fuente: Páez, J, (2014) El proceso FMEA para las fallas de lubricación, traducido por Páez, J.,
Noria Latín América 20 de agosto del 2014

La metodología del FMEA: se desarrolla con los siguientes pasos.

Paso 1: Enumere los equipos a nivel de sistema y/o subsistema. El grado en que uno desee descomponer el sistema hacia abajo dependerá de la criticidad de la operación. En general se aconseja iniciar a un alto nivel e ir descendiendo según sea necesario más adelante en el proceso.

Paso 2: Identifique la(s) función(es) que cumple el equipo para lograr los objetivos de la organización. Por ejemplo, en una operación de estampado, una prensa hidráulica (equipo) debe estampar el material (función) para que la organización logre sus objetivos comerciales.

Paso 3: Identifique los modos potenciales de falla. Una falla de la bomba es una manera, o modo, en que una prensa hidráulica falla en desempeñar su función de diseño. Típicamente, se invierte mucho tiempo en diferenciar lo que es una falla funcional de una falla técnica. Los accionistas de la organización a menudo tienen diferentes puntos de vista sobre lo que se define como un estado de falla. Por ejemplo, supongamos que un individuo adquiere un auto deportivo cuya publicidad indica que puede alcanzar una velocidad de 250km/h. En una visita a una pista de pruebas el orgulloso propietario se da cuenta de que su vehículo sólo es capaz de alcanzar los 230 km/h. Técnicamente el vehículo ha fallado. Funcionalmente, el vehículo sólo habrá fallado si viaja a velocidades por encima de los 230km/h, lo cual es un requisito de buena fe para el vehículo.

Paso 4: Enumere los efectos potenciales de la falla. Diferentes modos de falla tendrán diferentes efectos en la organización. Si la bomba hidráulica se rompe, esta cesa su función por completo. Si la bomba se desgasta con el tiempo causando que su eficiencia volumétrica decline, la operación puede volverse lenta o puede requerir mayor energía para completar en mismo nivel de trabajo de una bomba funcionando correctamente.

Paso 5: Defina el nivel de la severidad. Con la finalidad de comparar y priorizar, es necesario asignar un nivel de severidad a la falla por cada ocurrencia. Esto se refiere al impacto relativo de la falla sobre la operación con respecto a los costos por paro por hora y por duración esperada, costos de reparación, costos por lesiones del personal, costos por limpieza del ambiente, etc. La severidad de la falla suele ponderarse entre uno y diez, siendo uno la menos severa y diez la más severa. Cada organización tiene una definición para lo que es un periodo de paro corto o largo. Generalmente, operaciones en serie son más sensibles a los paros de producción que las operaciones donde múltiples máquinas cumplen la misma función (paralelo), y la pérdida de una máquina representa sólo la pérdida de una fracción de la producción total. Existen varias maneras de obtener un nivel de severidad para cada modo de falla, pero para aplicaciones industriales, el enfoque del consenso ha demostrado ser efectivo. (La Tabla n.º 5), muestra un nivel de severidad basado en la duración del paro producido por un evento de falla.

Tabla n.º5. Clasificación de severidad.

Duración del Paro (horas)		Clasificación
Igual o más que	Menor que	
24	-	10
12	24	9
6	12	8
3	6	5
1	3	2
>0	1	1

Fuente: Páez, F. (2014) El proceso FMEA para las fallas de lubricación, traducido por Páez, F. Noria Latín América 20 de agosto del 2014

Paso 6: Defina los mecanismos potenciales de falla. Algunas veces llamados “funciones forzadas”, los mecanismos de falla son el por qué un modo de falla particular ocurre, o la causa raíz subyacente de una falla. Por ejemplo, el mecanismo de falla por

cavitación puede producir el modo de falla de la bomba, que puede detener o disminuir la producción.

Paso 7: Asigne un nivel de ocurrencia para cada mecanismo de falla. De nuevo, usando la escala de uno a diez, (uno siendo el menos frecuente y diez el más frecuente), estime la probabilidad de ocurrencia de cada mecanismo de falla. (*La Tabla n.º 6.*) es un ejemplo de un sistema usado para clasificar la ocurrencia de falla.

Tabla n.º6. Clasificación de ocurrencia.

Ocurrencia (meses)		Clasificación
Igual o más que	Menor que	
12	-	10
9	12	9
6	9	8
3	6	5
2	3	2
1	2	1

Fuente: Páez. (2014).El proceso FMEA para las fallas de lubricación, Páez, F. Noria
Latín América 20 de agosto del 2014

Paso 8: Identifique técnicas predictivas. Alertas tempranas permiten disminuir el impacto de una falla al permitir administrar la programación de los paros, tener las piezas de repuesto y suministros a la mano, así como la lista del personal con las habilidades requeridas para implementar las acciones correctivas. Enumere las técnicas mediante las cuales se pueden detectar las diferentes fallas.

Paso 9: Asigne un nivel de detección para cada modo/mecanismo de falla. De nuevo usando la escala de uno a diez (*uno el más largo, diez el más corto*), evalúe la eficacia de los sistemas de detección temprana utilizadas (*por ejemplo: análisis de lubricante, vibraciones, etc.*)

En la (*Tabla n.º7.*) es un ejemplo de tabla donde se indica la clasificación por periodos de detección temprana.

Tabla n.º7. Clasificación de sistemas de detección temprana.

Periodo de Detección Temprana		Clasificación
Igual o más que	Menor que	
Ninguno	1 día	10
1 día	1 semana	9
1 semana	1 mes	8
1 mes	2 meses	5
2 meses	6 meses	2
6 meses	-	1

Fuente: Páez, F. (2014).El proceso FMEA para las fallas de lubricación, Páez. F. Alfonso, Noria Latín América 20 de agosto del 2014.

Paso 10: Asigne un Número de Prioridad de Riesgo (RPN por sus siglas en inglés). El RPN se calcula multiplicando el nivel de seguridad por el de ocurrencia y por el de detección (Severidad x Ocurrencia x Detección = RPN). El RPN valora la importancia de cada falla funcional potencial sobre una escala de uno a 1000, siendo uno la más baja prioridad y 1000 la más alta. Si bien esta metodología es pseudo-cuantitativa, es efectiva para los propósitos de comparación y priorización. Dado que está basada en el número de entradas que se producen utilizando el consenso, el RPN obtenido está basado también en el consenso.

Paso 11: Identifique las acciones de mantenimiento a recomendar. Basados en la naturaleza e importancia de los diferentes modos y mecanismos de falla, el costo de implementar las técnicas y tecnologías de detección y el RPN, recomiendan el uso de acciones de mantenimiento. Estas pueden ir desde modificar la maquinaria hasta procedimientos de inspección.

2.2.3.2. Aplicación del proceso FMEA en la lubricación

El proceso de FMEA en la lubricación comienza con una evaluación específica de las funciones del lubricante relacionadas con cada equipo, junto con una valoración de los mecanismos de falla que pueden impedir la efectiva funcionalidad de la lubricación. Utilice (la Tabla n º8) de Aplicación del proceso FMEA en la lubricación, para ejecutar el siguiente proceso:

Tabla n.º8. Aplicación del proceso FMEA en la lubricación.

EQUIPO	FUNCIÓN	POTENCIAL MODO DE FALLA	IMPACTO POTENCIAL	Severidad	Causa potencial del Mecanismo de Falla	Ocurrencia	Métodos Predictivos	Detección	RPN	Acciones Recomendadas
Bomba Hidráulica	Lubricante limpio (bajo conteo de partículas) previene el desgaste abrasivo dentro de la maquinaria.	Desgaste abrasivo severo.	El tiempo medio entre fallas es mas corto que el diseñado por el OEM.	10	Inadecuado programa de filtración para la maquinaria o de la contaminación medioambiental; Rotura o fugas en los sellos.	1	Obstrucción en los filtros, inspección en tapones magnéticos y de drenaje.	1	10	

Fuente: Cummins, J. (2015). en el artículo “lubrication FMEA:The Big Picture”,

Defina las funciones que el lubricante debe desempeñar en cada una de las máquinas bajo estudio (estas funciones están definidas en la Tabla de Funciones y de mecanismos de falla de la Lubricación). (Ver Tabla n.º 9.)

Identifique los mecanismos de falla específicos relacionados con la lubricación que puedan impedir la operación funcional de la máquina

Coloque un X en aquellos cuadrados donde la Función de la Lubricación y el Mecanismo de Falla por Lubricación se intersectan para una máquina en particular. Por ejemplo, la degradación del lubricante no puede disminuir la funcionalidad de transferir potencia y trabajo de un sistema de lubricación de cojinetes porque esta función es específica de las máquinas hidráulicas.

En las causas, o mecanismos de falla, identifique las fallas específicas relacionadas con la lubricación que son la causa raíz subyacente de los modos de falla que llevan a la pérdida de la funcionalidad del sistema. Por ejemplo, el mecanismo de falla específico de lubricación “la contaminación con partículas induce a una pérdida en la función de transferir potencia y trabajo” puede causar una pérdida de, o disminuir, el desempeño de un sistema hidráulico (modo de falla) que detiene la máquina de estampado, moldeado, etc.

Completar el proceso de FMEA como se indicó anteriormente.

Por tanto, el formato para la aplicación del FMEA en lubricación nos da una herramienta de uso general como marco de referencia del FMEA para definir con precisión las fallas relacionadas con la lubricación dentro del contexto funcional de la máquina y su contribución al logro de los objetivos comerciales de la compañía. Mediante la eliminación de la práctica de agrupar aleatoriamente fallas técnicas en la categoría de “fallas por

lubricación", se puede lograr un mejor nivel de precisión en mantenimiento y control sobre las principales causas raíz de fallas.

Numero de Prioridad de Riesgo

Es clasificado en función de un índice denominado **Número de Prioridad de riesgo** (*Risk priority number RPN*).

El RPN indica la prioridad con que deben ser seleccionadas actividades para prevenir estas ocurrencias de fallas que ocasionan estos efectos.


$$\text{Severidad} \times \text{Ourrencia} \times \text{Detección} = \text{RPN}$$

Tabla n. °9. Tabla de funciones de la lubricación y mecanismos de falla por lubricación (FMEA)

ANÁLISIS DE MODO Y EFECTO DE FALLA DE LUBRICACIÓN (FMEA)

Sistema: _____ Fecha _____

Efectuado por: _____

		FUNCIONES DE LA LUBRICACIÓN					
		Control de la Fricción	Control del desgaste	Control de la corrosión	Control de la temperatura	Control de la contaminación	Transmisión de potencia
MECANISMO DE FALLA DE LUBRICACIÓN	Disminución repentina del nivel de lubricante						
	No rellenar lubricante						
	Bajo nivel de lubricante						
	Lubricante incorrecto						
	Lubricante degradado						
	Contaminación con partículas						
	Contaminación con humedad						
	Dilución por combustible o químicos						
	Contaminación con refrigerante						
	Agotamiento de aditivos						
	Entrada de aire						
	Espuma						
	Falta o exceso de grasa						

COMENTARIOS

Elaborado: Tello Castro, G.; Espinoza Villaorduña, E.

2.2.4. Productividad

Definición

Es un indicador de la eficiencia productiva, es decir determina la capacidad de un sistema productivo para elaborar los productos requeridos y el grado en que los recursos empleados en el proceso productivo son aprovechados.

La productividad puede medirse en función del tiempo, mientras menos tiempo se realice en obtener un producto, significa que es más productivo.

2.2.5. Pala PC- 4000

Es una maquinaria de movimiento de tierra, además de ser una súper pala de alta productividad, de procedencia y tecnología japonesa el cual cuenta con un funcionamiento sencillo a pesar de tener un aspecto robusto.

Cuenta con un motor KOMATSU MITSUI, SDA 16V160, Turbocargado y post enfriado con inyección directa intercooler .La maquinaria tiene 1875 hp de máxima potencia y un filtro de aceite que posee auto limpieza , de esa forma los intervalos de cambio de aceite pueden extenderse a 4000 horas.

El radiador cuenta con un sistema de enfriamiento que hace uso de un ventilador hidráulico que garantiza una mayor eficiencia del enfriado y ventilación.

Sus orugas se reparten en 47 a cada lado. También se dividen en dos grupos los rodillos superiores (3 por lado) e inferiores (7 por lado).

El desplazamiento de la unidad es posible gracias a dos pedales con una velocidad máxima de 2.1 km/h.

El sistema de giro funciona con dos motores hidráulicos adoptan una velocidad máxima de 4 rpm.

El sistema hidráulico puede ser aplicado con un motor diésel o electrónico, además el circuito hidráulico abierto entrega el máximo enfriamiento y filtrado para movimientos más uniformes y suaves.

La capacidad del cucharón soporta hasta 32.5 toneladas de peso. Respecto a los depósitos de líquidos son de grandes proporciones. puede citarse al contenedor de combustible es de 6400 galones, el de aceite hidráulico tiene una capacidad de 3900 galones y el de refrigerante es de 420 galones.

La pala PC4000 presenta una cabina, tipo FOPS, de acero que está montada sobre almohadillas que reducen las sensaciones de vibración y ruido .la cabina presurizada con aire filtrado, cuenta con sistema de aire acondicionado y un asiento con suspensión neumática y soporte lumbar. con los controles joystick de mínimo esfuerzo, se facilitan las tareas del operador.

La pala PC4000 cuenta con un sistema de monitoreo VHMS, donde el usuario recibe información al instante.

Actualmente hay ocho Palas PC4000 que están operando en el Perú, seis están en la minera MISKI MAYO las que son sujeto de estudio en la presente tesis y las otras dos están en LAGUNAS NORTE - BARRICK.

Parte de la presente información fue obtenida de la página principal de komatsu mitsui además revisar la ficha técnica del equipo que puede visualizarse en los anexos.

Figura n.º13. Imagen de pala PC4000 KOMATSU MITSUI.



Fuente: Imagen de PALA PC4000- página web de KOMATSU MITSUI.

2.3. Definiciones y términos básicos.

FMEA

El Análisis de Modo y Efecto de Fallos, es un conjunto de directrices, un método y una forma de identificar problemas potenciales (errores) y sus posibles efectos en un Sistema para priorizarlos y poder concentrar los recursos en planes de prevención, supervisión y respuesta.

Fricción

Rozamiento entre dos cuerpos en contacto, uno de los cuales está inmóvil.

Desgaste

Se puede considerar como la pérdida de material que sufre un elemento, en este caso mecánico, que hace que su forma geométrica cambie y que su funcionamiento se vuelva errático y anti funcional.

Mantenimiento

Conjunto de acciones que tienen como objetivo mantener un artículo o restaurarlo a un estado en el cual el mismo pueda desplegar la función requerida o las que venía desplegando hasta el momento en que se dañó, en caso que haya sufrido alguna rotura o deterioro.

Viscosidad

Conocida como la resistencia de un líquido a fluir. La viscosidad es la más importante propiedad física de un lubricante, ya que deben tener y conservar su habilidad de fluir y proteger las partes de la maquinaria a diferentes temperaturas y condiciones.

Es uno de los factores responsables de la formación de la capa de lubricación, bajo distintas condiciones de espesor de esta capa. La viscosidad afecta la generación de calor en rodamientos, cilindros y engranajes debido a la fricción interna del aceite. Esto afecta las propiedades sellantes del aceite y la velocidad de su consumo.

Podemos distinguir dos clasificaciones de la viscosidad: Viscosidad dinámica o absoluta y viscosidad cinemática.

Tiempo medio entre fallas (MTBF)– Mean Time Between Failures.

El Tiempo medio entre fallas indica el intervalo de tiempo más probable entre un arranque y la aparición de un fallo; es decir, es el tiempo medio transcurrido hasta la llegada del evento “fallo”. Mientras mayor sea su valor, mayor es la confiabilidad del componente o equipo. Uno de los parámetros más importantes utilizados en el estudio de la confiabilidad constituye el MTBF, es por esta razón que debe ser tomado como un indicador más que represente de alguna manera el comportamiento de un equipo específico. Asimismo, para determinar el valor de este indicador se deberá utilizar la data primaria histórica almacenada en los sistemas de información.

Tiempo promedio para reparar (MTTR) – Mean Time To Repair.

Es la medida de la distribución del tiempo de reparación de un equipo o sistema. Este indicador mide la efectividad en restituir la unidad a condiciones óptimas de operación una vez que la unidad se encuentra fuera de servicio por un fallo, dentro de un período de tiempo determinado. El tiempo promedio para reparar es un parámetro de medición asociado a la mantenibilidad, es decir, a la ejecución del mantenimiento.

Mantenibilidad.

Definida como la probabilidad de devolver el equipo a condiciones operativas en un cierto tiempo utilizando procedimientos prescritos, es una función del diseño del equipo (factores tales como accesibilidad, modularidad, estandarización y facilidades de diagnóstico, facilitan enormemente el mantenimiento).

Disponibilidad.

La disponibilidad es una función que permite estimar en forma global el porcentaje de tiempo total en que se puede esperar que un equipo esté disponible para cumplir la función para la cual fue destinado. A través del estudio de los factores que influyen sobre

la disponibilidad, el MTBF y el MTTR, es posible para la gerencia evaluar distintas alternativas de acción para lograr los aumentos necesarios de disponibilidad.

Utilización.

La utilización también llamada factor de servicio, mide el tiempo efectivo de operación de un activo durante un período determinado.

Análisis de Criticidad

Es una Metodología que permite jerarquizar sistemas, instalaciones y equipos, en función de su impacto global, con el fin de optimizar el proceso de asignación de recursos (económicos, humanos y técnicos).

Confiabilidad.

Es la probabilidad de que un equipo cumpla una misión específica bajo condiciones de uso determinadas en un período determinado. El estudio de confiabilidad es el estudio de fallos de un equipo o componente. Si se tiene un equipo sin fallo, se dice que el equipo es ciento por ciento confiable o que tiene una probabilidad de supervivencia igual a uno. Al realizar un análisis de confiabilidad a un equipo o sistema, obtenemos información valiosa acerca de la condición del mismo: probabilidad de fallo, tiempo promedio para fallo, etapa de la vida en que se encuentra el equipo.

La confiabilidad de un sistema y sus componentes es de suma importancia si queremos conocer la confiabilidad de los activos. El dato suministrado por los indicadores de confiabilidad debe darnos la distribución de fallos para una o más combinaciones de esfuerzos y ambientes.

Gestión de Mantenimiento

Son todas las actividades de gestión que determinan los objetivos, las metas, estrategias, planificación, recursos humanos, funciones y las responsabilidades, (entre otras) de mantenimiento.

Mantenimiento Mayor (Overhaul)

Es el mantenimiento aplicado a un equipo o instalación donde su alcance en cuanto a la cantidad de trabajos incluidos, el tiempo de ejecución, nivel de inversión o costo del mantenimiento y requerimientos de planificación y programación son de elevada magnitud, dado que la razón de este tipo de mantenimiento reside en la restitución general de las condiciones de servicio del activo, bien desde el punto de vista de diseño o para satisfacer un periodo de tiempo considerable con la mínima probabilidad de falla o interrupción del servicio y dentro de los niveles de desempeño o eficiencia requeridos.

Productividad

Capacidad de la naturaleza o la industria para producir en un determinado tiempo o periodo

Corrosión.

Se define como el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno.

Equipo Crítico.

Es aquel que cuando falla, produce una parada total o suspensión drástica de la producción. Es decir, afecta substancialmente el funcionamiento normal del sistema productivo.

Vida útil

La vida útil es la duración estimada que un objeto puede tener, cumpliendo correctamente con la función para el cual ha sido creado.

Demoras Mecánicas

Es el retraso en tiempo que tiene el equipo debido a sus fallas mecánicas

Demoras Operativas

Es el retraso en tiempo que tiene el equipo debido al abastecimiento y controles de seguridad.

Falla

Es el defecto del equipo ya sea por fábrica , desgaste y operación.

Número de Fallas

Es la cantidad fallas reportadas y detectadas por cada sistema.

CAPÍTULO 3. HIPÓTESIS

3.1. Formulación de la hipótesis

Con la implementación de un programa de tribología centrada en confiabilidad se mejoraría la productividad de las PALAS PC4000 en el área de mantenimiento de la minera MISKIMAYO, en el año 2016.

3.2. Operacionalización de variables

Variable Independiente

Programa de Tribología Centrada en confiabilidad

Variable Dependiente

Productividad

En la *tabla* n.º10. se realiza la operacionalización de la variable independiente y dependiente.

Tabla n.º 10. Operacionalización de variables.

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Programa de tribología centrada en confiabilidad.	Actividades de mantenimiento, que utiliza la tribología centrada en confiabilidad para incrementar la confiabilidad de un equipo, centrándose en la lubricación y el grado de contaminación del lubricante.	Mantenimiento.	Nº de paradas.
			Demoras mecánicas .
			% Confiabilidad.
Productividad.	Capacidad la industria para producir	Producción.	Valor de MTBF.
			Valor de MTTR.
			% Incremento de producción.

Elaborado: Tello Castro, G.; Espinoza Villaorduña, E.

Tabla n.º 11. Resumen de análisis de hipótesis.

ITEM	VARIABLE	INDICADOR	SIMBOLO	PERIODO N°1 Sin RCT	PERIODO N°2 Con RCT	VARIACIÓN %	RESULTADO
1		Demoras Mecánicas.	HDM=	204.6 H	96.2 H	52,98%	POSITIVO
2	Mantenimiento	Tiempo Operativo efectivo.	Ho=	5661.4 H	5769.8 H	1,91%	POSITIVO
3		Número de paradas.	Np=	44	16,2	63,18%	POSITIVO
4		Número de fallas.	Nf=	315	116	63,17%	POSITIVO
5		Tiempo medio entre fallas.	MTBF	3,43	9,31	171%	POSITIVO
6	Producción	Tiempo medio para reparar.	MTRR=	0,035	0,0034	90,29%	POSITIVO
7		Confabilidad	C=	98,99%	99,64%	0,66%	POSITIVO
8		% Incremento de Producción	P=	12,726.666,67 TON	12,810.234,03 TON	0,65%	POSITIVO

Elaborado: Tello Castro, G.; Espinoza Villaorduña, E.

CAPÍTULO 4. MATERIAL Y MÉTODOS

4.1. Tipo de diseño de investigación.

Por su finalidad, esta investigación es de tipo **aplicada tecnológica**, por ser una propuesta práctica, al implementar un programa de tribología centrada en la confiabilidad, resolviendo un problema específico, la productividad de las PALAS PC4000 a través de su óptima lubricación, los mismos que son de uso inmediato, en concordancia por lo planteado por Caballero Romero (2000).

Dentro de este enfoque, al aplicar este sistema a un conjunto de equipos PALA PC4000 de KOMATSU MITSUI en particular, nos lleva a convalidar esta teoría y analizar los parámetros cuantitativos de su confiabilidad y resultados correspondientes, además está dirigido al sector productivo de bienes y servicios que tiene como objetivo optimizar la funcionabilidad de los equipos PALA PC4000 de KOMATSU MITSUI , haciéndolos más eficientes y competitivos cuyos resultados podrán ser publicables por su utilidad.

El diseño de investigación, por el control de las variables, es **no experimental** porque no se controla la variable independiente, por ser esta una propuesta pre establecida ya que la tribología es la lubricación y el control del grado de contaminación del lubricante, además de no ser el interés principal de este estudio.

Así mismo, de acuerdo a la factibilidad y proyección de las variables, es una propuesta de solución a un problema tipo practico, (Hurtado 2002), pues se plantean actividades como: el muestreo, análisis, diagnóstico y la propuesta de mejora consistente en la aplicación de la tribología centrada en confiabilidad; finalmente responde a un estudio de carácter mixto.

En lo cualitativo se trata de demostrar la factibilidad de un programa cuyas características de análisis, optimización de procesos y proyección de resultados lo convierte en una verdadera hipótesis. En lo cuantitativo está dado por el estudio de viabilidad sustentado mediante resultados de sus indicadores como la confiabilidad y productividad, este último es un objetivo de la presente investigación.

En consecuencia, el diseño plantea que X permitirá optimizar Y

Así tenemos:



Donde, **X** representa al programa de tribología centrada en confiabilidad y **Y** representa el incremento de la productividad de los equipos PALA PC4000 de KOMATSU MITSUI.

4.2. Material.

4.2.1. Unidad de estudio.

La unidad de estudio o análisis, contiene sesenta (60) equipos de la empresa minera MISKI MAYO de la ciudad de Piura.

También se toma en cuenta al personal de la empresa Lubeman que proporcionó información relevante a los investigadores en las tareas de campo.

Personal de Lubeman

- Gerente de Proyecto / Ingeniero Mecánico /UNAC CIP 66366
- Jefe de proyectos / Ingeniero Químico / UNI
- Técnico Mecánico / SENATI
- Técnico Mecánico / SENATI
- Técnico Mecánico / SENATI

4.2.2. Población.

La población está constituida por 60 equipos de carguío y movimiento de tierras.

Flota de equipos que cuenta la empresa Minera MISKI MAYO de la ciudad de Piura en el 2016.

En la *Tabla* n° 12, se listan los 60 equipos de la Flota de la empresa minera MISKI MAYO.

Tabla n. °12. Equipos de carguío y movimiento de tierras en la operación de MISKI MAYO

LISTA DE EQUIPOS DE MISKIMAYO			
Nº	TIPO DE EQUIPO	MODELO	SERIE
1	PALA PC4000	PC4000-6 FS	8199
2		PC4000-6 FS	8200
3		PC4000-6 BH	8201
4		PC4000-6 FS	8210
5		PC4000-6 BH	8211
6		PC4000-6 FS	85120
7	CARGADOR F. WA800-3	WA800-3E0	70031
8		WA800-3E0	70032
9		WA800-3E0	70033
10		WA800-3E0	70034
11		WA800-3E0	70035
12	CAMIONES 730E	730E	A30573
13		730E	A30581
14		730E	A30582
15		730E	A30583

16		730E	A30585
17		730E	A30586
18		730E	A30587
19	CAMIONES 730E	730E	A30588
20		730E	A30592
21		730E	A30593
22		730E	A30597
23		730E	A30598
24		730E	A30599
25		730E	A30606
26		730E	A30607
27		730E	A30608
28		730E	A30609
29		730E	A30656
30		730E	A30657
31		730E	A30658
32		TRACTOR DE ORUGAS D375A-5	D375A-5
33	D375A-5		19297
34	D375A-5		19298
35	D375A-5		19300
36	D375A-5		19196
37	D375A-5		19581
38	D375A-6R		65410
39	D375A-6R	65411	
40	TRACTOR DE ORUGAS D275A-6 E0	D275AX-5E0	30123
41		D275AX-5E0	30258
42		D275AX-5E0	40009
43	TORITO WD600-3	WD600-3	50215
44		WD600-3	50221
45		WD600-3	50291
46		WD600-3	50292
47	CAMION	HD785-7	7869
48		HD785-7	7871
49	MOTONIVELADORA GD825A-3	GD825A-2	12471
50		GD825A-2	12476
51		GD825A-2	12647
52		GD825A-2	12755
53	EXCAVADORA PC300LC-8	PC300LC-8	A90830
54		PC300LC-8	A90906
55	MANIPULADOR	WA600-6	60628

56	CARGADOR F. WA470	WA470-6	85309
57	TRACTOR ORUGAS	D65EX-15E0	71012
58	EXC. PC200LC-8	PC200LC-8	310527
59	RODILLO BOMAG	BW211D-40	10158221748
60	RODILLO BOMAG	BW211D-40	101582421750

Fuente: Data de registro de mantenimiento de LUBEMAN PERÚ E.I.R.L.

4.2.3. Muestra.

De los 60 equipos de carguío y movimiento de tierras (ver tabla n.º12) con que cuenta la empresa minera MISKI MAYO de la ciudad de Piura en el Año 2016, se tomó como muestra de estudio los seis (06) equipos PALA PC4000, considerados equipos críticos, de acuerdo al análisis de criticidad de la metodología RCT materia del estudio.

Análisis de Criticidad

- Criticidad Total: Frecuencia de Falla Relativa x Consecuencia
- Criticidad Total: Frecuencia de Falla relativa x Consecuencia
- Consecuencia = [(Imp Operacional x Riesgo i) + (Costo Reparación x Riesgo i) + (Imp Seguridad x Riesgo i) + (Imp. Ambiental x Riesgo i)]

El equipo de trabajo determinó los siguientes pesos en los criterios de criticidad:

Tabla n.º13. Valoración de criticidad por tipo de impacto.

Impacto Operacional	0.3
Costo de Reparación	0.1
Impacto en la Seguridad	0.3
Impacto Ambiental	0.3

- El Riesgo i, es el riesgo intrínseco por cada criterio y varía entre 1, 3, 5, 7 y 9
- La Frecuencia de Falla relativa también va a variar entre 1, 3, 5, 7 y 9
- El equipo de trabajo determinó lo siguiente en la frecuencia de fallas relativas:

Frecuencia de fallas:

Fuente: Data del área de confiabilidad de Chinallco.

Tabla n.º14. Valoración de criticidad por ocurrencia.

Muy alto: Mayor a 9 fallas / mes	9
Pobre: 5 - 8 Fallas / mes	7
Promedio 2 - 5 Fallas / mes	5
Buena 1 - 2 Fallas / mes	3
Excelente menos de 1 Falla / mes	1

Fuente: Data del área de confiabilidad de Chinallco

La criticidad total del equipo se define según:

Tabla n.º15. Clasificación por nivel de criticidad.

Critico	> 20
Semi Critico	(> 12 - 20)
No Critico	(0 - 12)

Fuente: Data del área de confiabilidad de Chinalco.

Equipo de trabajo: Estuvo conformado por:

- Gerencia de Lubeman: Ing. Luz Soto.
Ing. Mecánico. Especialista en lubricación de maquinarias pesadas
Egresado de la Universidad nacional del callao con CIP 66366.
- Jefe de Proyecto Lubeman : Félix Vicuña.
Ing. Químico. Especialista en análisis de aceites lubricantes
Diplomado en confiabilidad.
Egresado de la Universidad de nacional de ingeniería.
- Técnico Mecánico: Juan Rojas, Juan Senador y Cristhian Meléndez,
Egresados del Instituto técnico de SENATI.
Especialistas en lubricación y control de contaminación.

El equipo de trabajo se reunió en 6 oportunidades.

1ra Reunión: 1 Octubre del 2014 operación Bayovar..

- Se delinea los aspectos que impactan en las paradas por fallas de los equipos.
- Se trabajó la *Tabla n.º 9 de funciones de la lubricación y mecanismos de falla por lubricación (FMEA)*

2da Reunión: 15 octubre del 2014 operación Bayovar.

- Se determinó los pesos y criticidades relativas y como afectan en la elección de los equipos críticos
- Se trabajó tabla n.º 13 de Criterios de criticidad según equipos.

3ra Reunión 1 noviembre del 2014 Oficina Lubeman lima

- Se definió y eligió los equipos críticos materia del estudio.
- Se trabajó tabla n.º 16 Equipos críticos de la muestra.

4ta Reunión 15 noviembre Oficina Lubeman lima

- Presentación de los formatos elaborados por bachilleres para el registro de la información de tomas de muestra.
- Se Presentaron los formatos y check list para la toma de muestras

5ta Reunión 1 diciembre 2014 operación bayovar.

- Consolidación de información recopilada por el personal técnico.

6ta Reunión 15 de diciembre 2014 Oficina Lima

- Procesamiento de información para la implementación de mejoras.

El muestreo no puede ser aleatorio ya que los equipos a los que se aplica la metodología son todos de distintas aplicaciones y distintas capacidades o sea no son homogéneas.

La elección de la metodología del análisis de criticidades se hizo ya que es una de las metodologías que más se usa en las operaciones de mantenimiento y es una que permite jerarquizar sistemas, instalaciones y equipos, en función de su impacto global sea a nivel operativo, en costos operativos, a nivel de seguridad o por aspectos ambientales.

En la *Tabla n. °16.* se muestra los criterios de criticidad que se tuvieron en cuenta en esta metodología.

Tabla n. ° 16. Criterios de criticidad según equipos.

Item	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	CÓDIGO	MODELO	Cantidad Equipos	CRITERIOS DE CRITICIDAD					Criticidad del equipo	CRITICIDAD
					Frecuencia de Falla	Impacto Operacional	Costo de Reparación	Impacto en la Seguridad	Impacto Ambiental		
					1.00	0.30	0.10	0.30	0.30		
1	PALA PC4000	8A6101	PC4000-6 FS	1	7.00	7.00	5.00	7.00	5.00	43.4	Crítico
2		8A6102	PC4000-6 FS	1	7.00	7.00	5.00	7.00	5.00	43.4	Crítico
3		8A6103	PC4000-6 BH	1	7.00	7.00	5.00	7.00	5.00	43.4	Crítico
4		8A6104	PC4000-6 FS	1	7.00	7.00	5.00	7.00	5.00	43.4	Crítico
5		8A6105	PC4000-6 BH	1	7.00	7.00	5.00	7.00	5.00	43.4	Crítico
6		8A6106	PC4000-6 FS	1	5.00	7.00	5.00	7.00	5.00	31.0	Crítico
7	CARGADOR F. WA800-3	8A5101	WA800-3E0	1	5.00	5.00	3.00	5.00	5.00	24.0	Crítico

8		8A5102	WA800-3E0	1	5.00	5.00	3.00	5.00	5.00	24.0	Crítico
9		8A5103	WA800-3E0	1	5.00	5.00	3.00	5.00	5.00	24.0	Crítico
10		8A5104	WA800-3E0	1	5.00	5.00	3.00	5.00	5.00	24.0	Crítico
11		8A5105	WA800-3E0	1	5.00	5.00	3.00	5.00	5.00	24.0	Crítico
12	CAMIONES 730E	8C5101	730E	1	5.00	5.00	3.00	3.00	3.00	18.0	Semi Crítico
13		8C5102	730E	1	5.00	5.00	3.00	3.00	3.00	18.0	Semi Crítico
14		8C5103	730E	1	5.00	5.00	3.00	3.00	3.00	18.0	Semi Crítico
15		8C5104	730E	1	5.00	5.00	3.00	3.00	3.00	18.0	Semi Crítico
16		8C5105	730E	1	5.00	5.00	3.00	3.00	3.00	18.0	Semi Crítico
17		8C5106	730E	1	5.00	5.00	3.00	3.00	3.00	18.0	Semi Crítico
18		8C5107	730E	1	5.00	5.00	3.00	3.00	3.00	18.0	Semi Crítico
19		8C5108	730E	1	5.00	5.00	3.00	3.00	3.00	18.0	Semi Crítico
20		8C5109	730E	1	5.00	5.00	3.00	3.00	3.00	18.0	Semi Crítico
21		8C5110	730E	1	5.00	5.00	3.00	3.00	3.00	18.0	Semi Crítico
22		8C5111	730E	1	5.00	5.00	3.00	3.00	3.00	18.0	Semi Crítico
23		8C5112	730E	1	5.00	5.00	3.00	3.00	3.00	18.0	Semi Crítico
24		8C5113	730E	1	5.00	5.00	3.00	3.00	3.00	18.0	Semi Crítico
25		8C5114	730E	1	5.00	5.00	3.00	3.00	3.00	18.0	Semi Crítico
26		8C5115	730E	1	5.00	5.00	3.00	3.00	3.00	18.0	Semi Crítico
27		8C5116	730E	1	5.00	5.00	3.00	3.00	3.00	18.0	Semi Crítico
28	8C5117	730E	1	5.00	5.00	3.00	3.00	3.00	18.0	Semi Crítico	
29	8C5118	730E	1	5.00	5.00	3.00	3.00	3.00	18.0	Semi Crítico	
30	8C5119	730E	1	5.00	5.00	3.00	3.00	3.00	18.0	Semi Crítico	
31	8C5120	730E	1	5.00	5.00	3.00	3.00	3.00	18.0	Semi Crítico	
32	TRACTOR DE ORUGAS D375A-5	8D4101	D375A-5	1	5.00	3.00	3.00	3.00	3.00	15.0	Semi Crítico
33		8D4102	D375A-5	1	5.00	3.00	3.00	3.00	3.00	15.0	Semi Crítico
34		8D4103	D375A-5	1	5.00	3.00	3.00	3.00	3.00	15.0	Semi Crítico
35		8D4104	D375A-5	1	5.00	3.00	3.00	3.00	3.00	15.0	Semi Crítico
36		8D4105	D375A-5	1	5.00	3.00	3.00	3.00	3.00	15.0	Semi Crítico
37		8D4106	D375A-5	1	5.00	3.00	3.00	3.00	3.00	15.0	Semi Crítico

38		8D4107	D375A-6R	1	5.00	3.00	3.00	3.00	3.00	15.0	Semi Crítico
39		8D4108	D375A-6R	1	5.00	3.00	3.00	3.00	3.00	15.0	Semi Crítico
40	TRACTOR DE ORUGAS D275A-6 E0	8D3101	D275AX- 5E0	1	5.00	3.00	3.00	3.00	3.00	15.0	Semi Crítico
41		8D3102	D275AX- 5E0	1	5.00	3.00	3.00	3.00	3.00	15.0	Semi Crítico
42		8D3103	D275AX- 5E0	1	5.00	3.00	3.00	3.00	3.00	15.0	Semi Crítico
43	TORITO WD600-3	8D5101	WD600-3	1	5.00	3.00	3.00	3.00	3.00	15.0	Semi Crítico
44		8D5102	WD600-3	1	5.00	3.00	3.00	3.00	3.00	15.0	Semi Crítico
45		8D5103	WD600-3	1	5.00	3.00	3.00	3.00	3.00	15.0	Semi Crítico
46		8D5104	WD600-3	1	5.00	3.00	3.00	3.00	3.00	15.0	Semi Crítico
47	CAMION	8C6101	HD785-7	1	5.00	3.00	3.00	3.00	3.00	15.0	Semi Crítico
48		8C6102	HD785-7	1	5.00	3.00	3.00	3.00	3.00	15.0	Semi Crítico
49	MOTONIVELAD ORA GD825A-3	8E2101	GD825A-2	1	5.00	3.00	3.00	3.00	3.00	15.0	Semi Crítico
50		8E2102	GD825A-2	1	5.00	3.00	3.00	3.00	3.00	15.0	Semi Crítico
51		8E2102	GD825A-2	1	5.00	3.00	3.00	3.00	3.00	15.0	Semi Crítico
52		8E2103	GD825A-2	1	5.00	3.00	3.00	3.00	3.00	15.0	Semi Crítico
53	EXCAVADORA PC300LC-8	8F4101	PC300LC- 8	1	5.00	3.00	3.00	3.00	3.00	15.0	Semi Crítico
54		8F4102	PC300LC- 8	1	5.00	3.00	3.00	3.00	3.00	15.0	Semi Crítico
55	MANIPULADOR	8A7101	WA600-6	1	3.00	3.00	3.00	3.00	1.00	7.2	No Crítico
56	CARGADOR FRONTAL. WA470	8A7102	WA470-6	1	5.00	3.00	3.00	3.00	3.00	15.0	Semi Crítico
57	TRACTOR ORUGAS	8A7103	D65EX- 15E0	1	5.00	3.00	3.00	3.00	3.00	15.0	Semi Crítico
58	EXCAVADORA PC200LC-8	8A7104	PC200LC- 8	1	5.00	3.00	3.00	3.00	3.00	15.0	Semi Crítico
59	RODILLO BOMAG	8A7105	BW211D- 40	1	5.00	3.00	3.00	3.00	3.00	15.0	Semi Crítico
60	RODILLO BOMAG	8A7106	BW211D- 40	1	5.00	3.00	3.00	3.00	3.00	15.0	Semi Crítico

Fuente: Data de registro de mantenimiento de LUBEMAN PERÚ E.I.R.L.

4.3. Métodos.

4.3.1. Técnicas de recolección de datos y análisis de datos

Se desarrolló en dos fases, secuencialmente:

La primera fase de la investigación es la recolección de información de los mantenimientos y/o datos de fallas en los equipos seleccionados, relacionados con la lubricación, información recolectada y proporcionada por personal de la empresa Lubeman.

Una Segunda fase de la investigación es la revisión documental de la información proporcionada por la empresa Lubeman y la teoría sobre la tribología centrada en confiabilidad para el análisis de los datos obtenidos.

4.3.2. Procedimientos.

Primera fase: recolección de la información.

- Selección del personal de Lubeman.
- Revisión documental.
- Identificación de los equipos de carguío y movimiento de tierras en la empresa minera MISKIMAYO año 2016.
- Identificación de criterios para la elaboración de la matriz de criticidad de equipos.
- Elaboración de matriz de criticidad de equipos.
- Selección de los equipos de muestra
- Codificación y tratamiento de la información

Segunda fase: Análisis de datos.

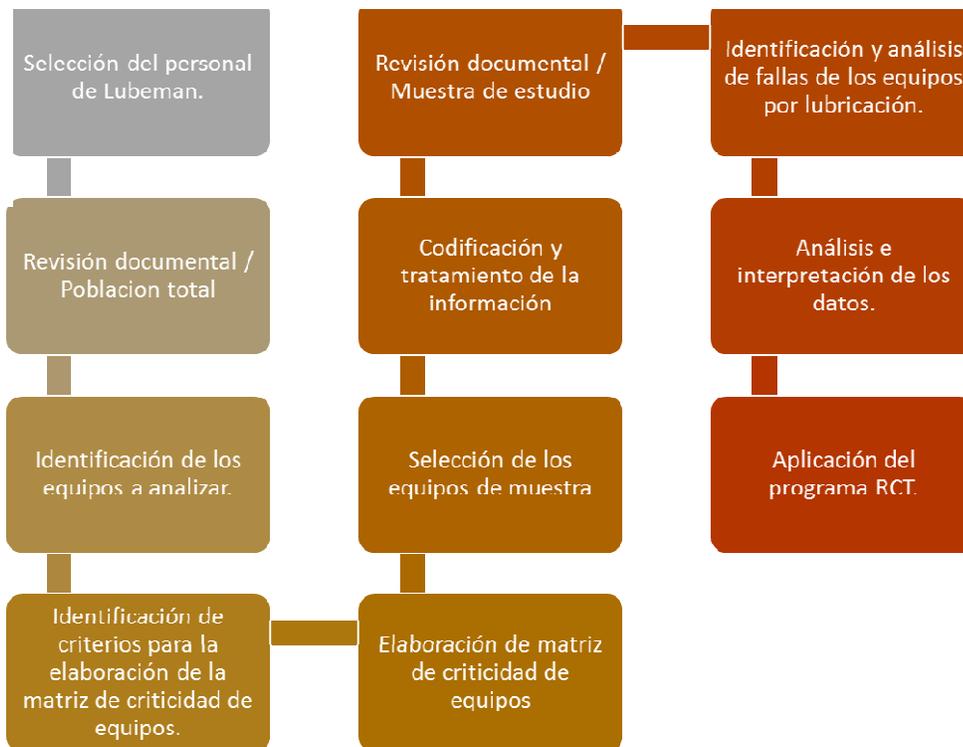
- Revisión documental.
- Identificación y análisis de fallas de los equipos por lubricación.
- Observación y grupo de discusión.
- Análisis e interpretación de los datos.
- Definición del programa RCT.
- La fiabilidad y la validez de la información.
- Contraste con la hipótesis.
- Conclusiones.
- Recomendaciones.

CAPÍTULO 5. DESARROLLO

La presente investigación se basa en la aplicación de una metodología de tribología centrada en la confiabilidad, que usa principalmente el análisis de modos y efectos de falla (FMEA), herramienta fundamental del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM). Dicha herramienta (FMEA) se aplica a los procesos tribológicos pues a través del reconocimiento de los modos de falla, de las funciones de lubricación del efecto de los modos de falla y su probabilidad de ocurrencia, se proponen las tareas de mantenimiento derivadas con el fin de contrarrestar sus efectos, una vez implementadas estas tareas logran controlar y reducir en forma lógica la tasa de fallas relacionadas a los procesos tribológicos , los paros no programados , extensión de los tiempos medios entre falla , incrementando la confiabilidad del equipo que en su conjunto mejora la productividad de las palas PC4000.

La investigación debió seguir los pasos descritos en la Figura 14 de tal modo garantice que los datos ingresados al análisis FMEA sean los idóneos para la aplicación de una metodología de tribología centrada en la Confiabilidad.

Figura n.º 14. Proceso de Investigación para Implementación de RCT.



Fuente: Información proporcionada de LUBEMAN PERÚ E.I.R.L

Selección del personal de Lubeman.

Para el desarrollo de esta tesis se contó con el apoyo del personal de LUBEMAN PERÚ: tres (3) técnicos mecánicos de lubricación en dos guardias, un (1) ingeniero mecánico y un (1) ingeniero químico, quienes proporcionaron y recopilaron datos en campo y gestión de mantenimiento de los equipos KOMATSU MITSUI necesarios para la presente investigación, (ver figura n°13)

Los datos y perfil del personal de Lubeman fue mencionado anteriormente. En la (figura n.º 15.)se puede validar el fotocheck del personal técnico.

Personal de Lubeman

Figura n.º 15. Fotocheck de personal de LUBEMAN PERÚ E.I.R.L



Fuente: Información proporcionada de LUBEMAN PERÚ E.I.R.L

Revisión documental

Se procedió a revisar, seleccionar y analizar toda la documentación proporcionada por el personal de la empresa Lubeman.

Documentos y formularios utilizados

- Formato de análisis de modo y efectos de falla de lubricación (*Anexo 3, Pág. 117*)
- Cuadro de eventos de falla de lubricación en las palas PC4000 (*Anexo 5, Pág. 119 a 128*)
- Formato de temperatura de pines PC4000 (*Anexo 7, Pág. 136*)

Identificación de los equipos a analizar.

Se procedió con la identificación de todos los equipos de carguío y movimiento de tierras en la empresa minera MISKIMAYO al año 2016.

En la (*Tabla n.º 13.*) se listan los 60 equipos de carguío y movimiento de tierras de la flota de equipos de la empresa minera MISKI MAYO de la ciudad de Piura al año 2016. Identificadas por tipo de equipo, modelo, número de serie y número de equipo.

Identificación de criterios para la elaboración de la matriz de criticidad de equipos.

Los criterios empleados para la elaboración de la matriz de criticidad fueron los siguientes: Frecuencia de falla, impacto operacional, costo de reparación, impacto en la seguridad e impacto ambiental.

En dicha matriz de criticidad, se ha considerado:

Criticidad del equipo = Frecuencia de falla*(Impacto operacional + costo de reparación + impacto en la seguridad + impacto ambiental), (Tabla n. ° 17.)

Tabla n. ° 17: Ejemplo de cálculo de criticidad del equipo.

Item	DESCRIPCION DEL EQUIPO	CODIGO	MODELO	Cantidad de equipos	CRITERIOS DE CRITICIDAD					Criticidad del equipo	CRITICIDAD
					Frecuencia de Falla	Impacto Operacional	Costo de Reparación	Impacto en la Seguridad	Impacto Ambiental		
					1.00	0.30	0.10	0.30	0.30		
1	PALA PC4000	8A6101	PC4000-6 FS	1	7.00	7.00	5.00	7.00	5.00	43.4	Critico

Fuente: Data de registro de mantenimiento de LUBEMAN PERÚ E.I.R.L.

En la (Tabla n° 18) Se puede observar la matriz de criticidad con la que se trabajó para calcular la criticidad de los 6 Equipos Críticos de la Muestra PALAS PC4000.

Tabla n° 18: Matriz de Criticidad para calcular criticidad de Equipos.

MATRIZ DE CRITICIDAD		PESO	VALORACIÓN DEL NIVEL DE RIESGO				
			MUY BAJO = 1	BAJO = 3	MEDIO = 5	ALTO = 7	MUY ALTO = 9
CRITERIOS	Frecuencia de Falla.	1	>=1 año	de 3 meses a 1 año	de 15 días a 3 meses	1 día a 2 semanas	1 día
	Impacto en Producción (por falla)	0.30	1 hora	6 horas	12 horas	1 día	< = a 3 días
	Costo de Reparación	0.10	Gasto Irrelevante, <1K\$	Gasto Bajo, 1K\$-10K\$	Gasto Razonable, 10K\$-50K\$	Gasto Importante, 50K\$-100K\$	Gastos Altos, >100K\$
	Impacto en la Seguridad.	0.30	No existe riesgo para las personas.	Puede producir daños leves, que desaparecen con tratamiento.	Pueden producir daños graves, que desaparecen con tratamiento.	Pueden producir daños muy graves que dejan secuela despues de un tratamiento.	Riesgo de muerte inminente.
	Impacto Ambiental y comunidades	0.30	No provoca ningun daño.	Produce daños medio ambientales reversibles	Produce daños medioambientales cuyos efectos no violan las normativas	Provoca daños medioambientales irreversibles dentro de la mina.	Provoca daños medioambientales irreversibles fuera de la mina.

Fuente: Data de área de confiabilidad de la Compañía minera Chinalco.

Elaboración de matriz de criticidad de equipos.

Utilizando los criterios de la matriz de criticidad, se determinó la criticidad de los 60 equipos de carguío y movimiento de tierras de la flota de equipos con que cuenta la empresa minera MISKI MAYO de la Ciudad de Piura en el Año 2016.

En la (*Tabla n°13*), se muestran los valores de criticidad obtenidos en los 60 equipos de carguío y movimiento de tierras de la flota.

Selección de los equipos de muestra

De los 60 equipos de carguío y movimiento de tierras de la flota de equipos con que cuenta la empresa Minera MISKI MAYO de la Ciudad de Piura en el Año 2016, se tomó como muestra de estudio los seis (06) equipos PALA PC4000, considerados como equipos críticos, de acuerdo al análisis de criticidad de la metodología RCT materia del estudio. Siendo las palas hidráulicas las de mayor importancia, ya que inciden directamente y en mayor grado en los niveles de productividad.

En la (*Tabla n° 19*), se muestran los equipos críticos de la muestra de estudio.

Tabla n.° 19. Equipos Críticos de la Muestra.

Item	DESCRIPCION DEL EQUIPO	CODIGO	MODELO	Cantidad de equipos	CRITERIOS DE CRITICIDAD					Criticidad del equipo	CRITICIDAD
					Frecuencia de Falta	Impacto Operacional	Costo de Reparación	Impacto en la Seguridad	Impacto Ambiental		
					1.00	0.30	0.10	0.30	0.30		
1	PALA PC4000	8A6101	PC4000-6 FS	1	7.00	7.00	5.00	7.00	5.00	43.4	Crítico
2		8A6102	PC4000-6 FS	1	7.00	7.00	5.00	7.00	5.00	43.4	Crítico
3		8A6103	PC4000-6 BH	1	7.00	7.00	5.00	7.00	5.00	43.4	Crítico
4		8A6104	PC4000-6 FS	1	7.00	7.00	5.00	7.00	5.00	43.4	Crítico
5		8A6105	PC4000-6 BH	1	7.00	7.00	5.00	7.00	5.00	43.4	Crítico
6		8A6106	PC4000-6 FS	1	5.00	7.00	5.00	7.00	5.00	31.0	Crítico

Fuente: Data de registro de mantenimiento de LUBEMAN PERÚ E.I.R.L

Codificación y tratamiento de la información

En la (*Tabla n.° 19*), se muestran los seis (06) equipos PALA PC4000 identificados con Ítem del 1 al 6 y codificados de la siguiente manera: 8A6101, 8A6102, 8A6103, 8A6104, 8A6105 y 8A6106, que serán materia de estudio para esta tesis.

Revisión documental sobre la muestra

Se procedió a revisar toda la documentación proporcionada por el personal de la empresa Lubeman sobre los seis (06) equipos PALA PC4000 identificados con los siguientes códigos: 8A6101, 8A6102, 8A6103, 8A6104, 8A6105 y 8A6106.

Documentos y formularios utilizados

- Formato de análisis de modo y efectos de falla de lubricación (*Anexo 3, Pág. 118*)
- Cuadro de eventos de falla de lubricación en las palas PC4000 (*Anexo 5, Pág. 120 a 129*)
- Formato de temperatura de pines PC4000 (*Anexo 7, Pág. 137*)

Identificación y análisis de fallas de los equipos por lubricación.

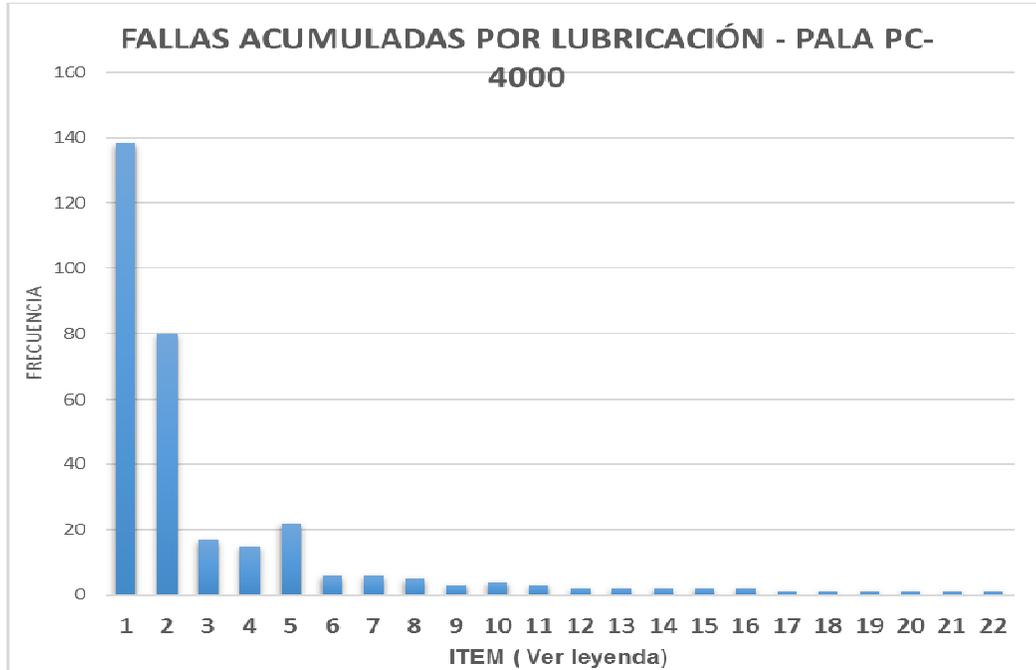
En la *Tabla n. °20* se indica las fallas de lubricación de los seis (06) equipos PALA PC4000 identificados con códigos 8A6101, 8A6102, 8A6103, 8A6104, 8A6105 y 8A6106. (Información obtenida en los primeros 6 meses del año 2015.)

Tabla n°. 20. Lista de fallas de lubricación de las PALAS PC4000 en el sistema hidráulico (2015).

ITEM	FALLAS DE LUBRICACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	FREC
1	Bajo nivel de aceite en el tanque Hidráulico	18	25	26	30	22	17	138
2	Se rellenó por fuga en manguera de bomba principal alta presión	11	21	6	10	19	13	80
3	Bajo nivel por fuga.	4	1	5	5	2		17
4	Rotura en manguera hidráulica de baja presión	2		11			2	15
5	Aceite Degradado	5	2	4	3	4	4	22
6	Fuga en los enfriadores	4			2			6
7	Fuga en manifold de retorno.					1	5	6
8	Fuga de manguera rota del cilindro del Clan.			4		1		5
9	Fuga en fisura de tubería hidráulica.						3	3
10	Fuga en tapa de Spool del bloque de válvulas de control # 04.		1	3				4
11	Fuga de niple de bomba		3					3
12	Fuga en cañería del bloque de control # 3 del implemento del Bucket			2				2
13	Fuga en cuerpo de manguera de Bucket (accionamiento) lado Rh.			2				2
14	Fuga en el cilindro del Clan		1	1				2
15	Fuga en tapa de spool del bloque # 03.					2		2
16	Fuga por tapa 06, spool bloque 2.						2	2
17	Cambio de manguera de pilotaje de sistema de flotación de Boom		1					1
18	Fuga en manguera de enfriamiento del PTO.					1		1
19	Fuga en el bloque 1 y bloque de válvulas.						1	1
20	Fuga en manguera de alta presión en la bomba # 02.						1	1
21	Fuga en tapa spool número 2		1					1
22	Fuga en tubería de alta presión de bomba 3 al bloque principal 2				1			1
TOTAL GENERAL		44	56	64	51	52	48	315

Elaborado: Tello Castro, G.; Espinoza Villaorduña, E.

Figura n.º 16. Gráfico de Incidencias de fallas acumuladas por Lubricación.



LEYENDA - FALLAS DE LUBRICACIÓN	ITEM
Bajo nivel de aceite en el tanque Hidráulico	1
Se rellenó por fuga en manguera de bomba principal alta presión	2
Bajo nivel por fuga.	3
Rotura en manguera hidráulica de baja presión	4
Aceite Degradado	5
Fuga en los enfriadores	6
Fuga en manifold de retorno.	7
Fuga de manguera rota del cilindro del Clan.	8
Fuga en fisura de tubería hidráulica.	9
Fuga en tapa de Spool del bloque de válvulas de control # 04.	10
Fuga de niple de bomba	11
Fuga en cañería del bloque de control # 3 del implemento del Bucket	12
Fuga en cuerpo de manguera de Bucket (accionamiento) lado Rh.	13
Fuga en el cilindro del Clan	14
Fuga en tapa de spool del bloque # 03.	15
Fuga por tapa 06, spool bloque 2.	16
Cambio de manguera de pilotaje de sistema de flotación de Boom	17
Fuga en manguera de enfriamiento del PTO.	18
Fuga en el bloque 1 y bloque de válvulas.	19
Fuga en manguera de alta presión en la bomba # 02.	20
Fuga en tapa spool número 2	21
Fuga en tubería de alta presión de bomba 3 al bloque principal 2	22

Elaborado: Tello Castro, G.; Espinoza Villaorduña, E.

Análisis e interpretación de los datos.

La (Tabla n° 21.) se indica la ocurrencia relativa por el tipo de falla de lubricación de los seis (06) equipos PALA PC4000. Información obtenida en los primeros 6 meses del año 2015, antes de la implementación del programa de tribología centrado en la confiabilidad en la minera MISKI MAYO de la ciudad de Piura.

Tabla n° 21. Ocurrencia relativa en fallas de lubricación de las PALAS PC4000 en el sistema hidráulico (2015).

ITEM	FALLAS DE LUBRICACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	FREC	OCURENCIA RELATIVA
1	Bajo nivel de aceite en el tanque Hidráulico	18	25	26	30	22	17	138	10
2	Se rellenó por fuga en manguera de bomba principal alta presión	11	21	6	10	19	13	80	5.8
3	Bajo nivel por fuga.	4	1	5	5	2		17	1.2
4	Rotura en manguera hidráulica de baja presión	2		11			2	15	1.1
5	Aceite Degradado	5	2	4	3	4	4	22	1.6
6	Fuga de manguera rota del cilindro del Clan.			4		1		5	0.4
7	Fuga de aceite de equipos varios	4	7	8	3	4	12	38	2.8
8	Total general	44	56	64	51	52	48	315	

Elaborado: Tello Castro, G.; Espinoza Villaorduña, E.

Aplicación de programa RCT.

De la revisión y análisis de toda la documentación proporcionada por el personal de la empresa Lubeman de los seis (06) equipos PALA PC4000 identificados con códigos 8A6101, 8A6102, 8A6103, 8A6104, 8A6105 y 8A6106; se obtuvo que los sistemas hidráulicos de los equipos PALA PC4000 son los elegidos para aplicar la metodología del FMEA, debido a la mayor calidad y cantidad de información recopilada.

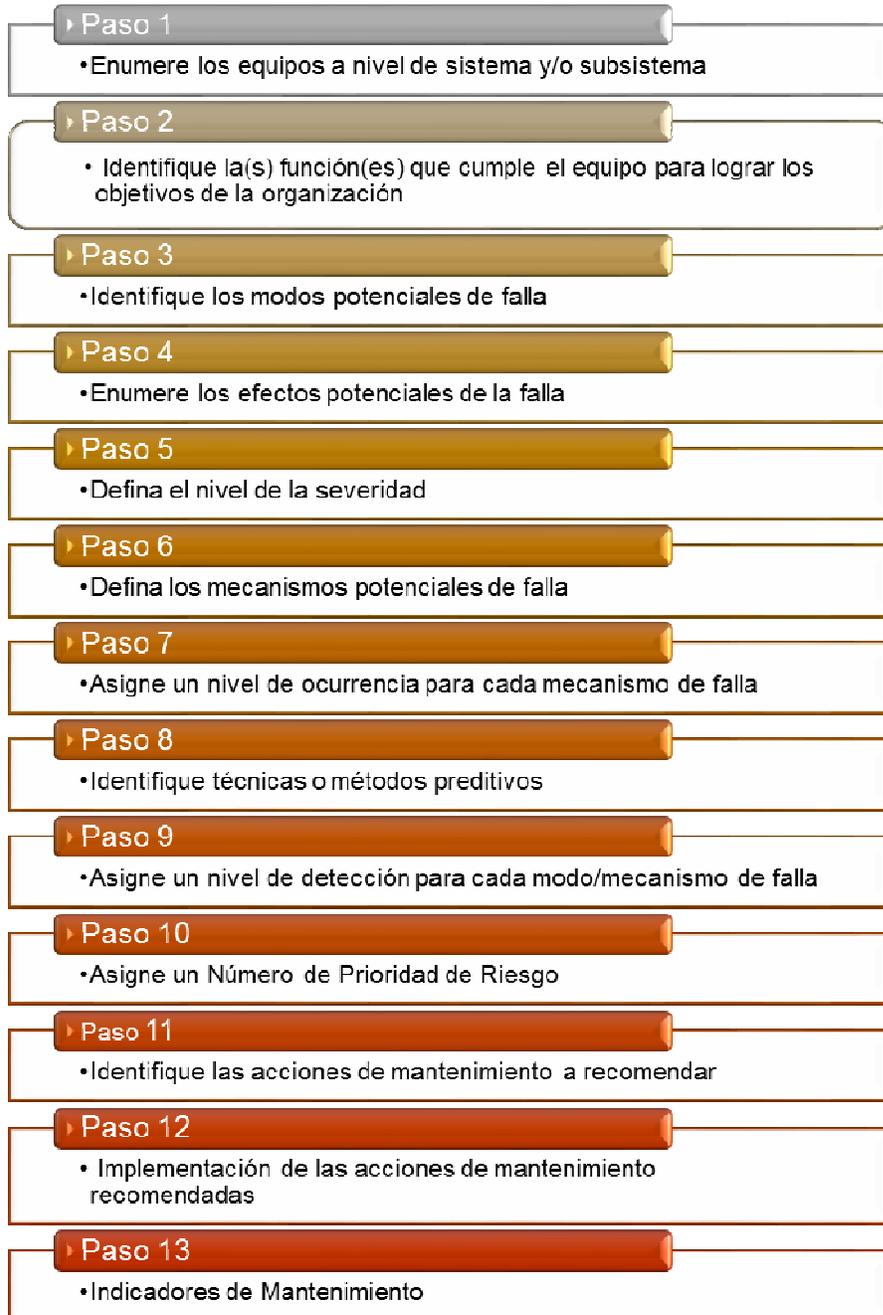
Las palas PC4000 cuentan con una complejidad en el sistema eléctrico, neumático, motor, transmisión y otros. Mas solo nos estamos enfocando en el sistema hidráulico.

Aplicación de la metodología del FMEA

La metodología del FMEA no es nueva. sin embargo, es nuevo cuando se aplica en la optimización del mantenimiento, y en los diferentes componentes y etapas del proceso básico del FMEA en tribología como se muestra en la (Figura n° 12.) Así también esta

metodología consta de pasos a seguir los que se muestran en la (Figura n°. 16.) y se detalla seguidamente.

Figura n.º 16. Pasos para la aplicación de Metodología FMEA.



Elaborado: Tello Castro, G.; Espinoza Villaorduña, E.

Paso 1. Enumere los equipos a nivel de sistema y/o subsistema. En la (*Tabla n° 16*). se muestran los seis (06) equipos PALA PC4000 identificados con Ítem del 1 al 6 y con códigos 8A6101, 8A6102, 8A6103, 8A6104, 8A6105 y 8A6106, que serán materia de estudio para esta tesis.

Paso 2. Identifique la(s) función(es) que cumple el equipo para lograr los objetivos de la organización.

Carguío y movimiento de tierras de la empresa minera MISKI MAYO, pues inciden directamente y en mayor grado en los niveles de productividad.

Paso 3. Identifique los modos potenciales de falla.

En la (*Tabla n° 18*) se indica las fallas de lubricación en el sistema hidráulico de los seis (06) equipos PALA PC4000 identificados con los siguientes códigos 8A6101, 8A6102, 8A6103, 8A6104, 8A6105 y 8A6106. Información obtenida los primeros 6 meses del año 2015.

En la (*Tabla n° 22*) se indican 14 potenciales modos de falla por lubricación, los siete primeros son fallas que han sucedido realmente y las demás son fallas que pueden suceder pero que se han incluido para tener una matriz FMEA más sólida y con mayores argumentos donde los niveles correspondientes a severidad, ocurrencia y detección han sido estimados en base a la referencia bibliográfica de John Cummins. Lubrication FMEA: The Big Picture.

Tabla n.º 22. Potenciales modos de falla por lubricación.

FALLAS DE LUBRICACIÓN	ITEM O EQUIPO	FUNCIÓN O PASO EN EL PROCESO	POTENCIAL MODO DE FALLA
Bajo nivel de aceite en el tanque Hidráulico	Carter de aceite	Componente provee la correcta cantidad de lubricante para prevenir los contactos metal-metal.	Desgaste adhesivo suave.
Fuga en manguera de bomba principal alta presión	Bomba principal alta presión	Transmisión de potencia hidráulica	Fuga hidráulica en manguera
Bajo nivel por fuga.	Carter de aceite	Componente provee la correcta cantidad de lubricante para prevenir los contactos metal-metal.	Desgaste adhesivo catastrófico.
Rotura en manguera hidraulica de baja presión	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Fuga de aceite hidráulico
Aceite Degradado	Aceite Hidráulico	Lubricante provee el control de la temperatura	Lubricante degradado
Fuga de manguera rota del cilindro del Clan.	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Fuga de aceite hidráulico
Fugas de aceite de equipos varios	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Fuga de aceite hidráulico
Fuga interna en cilindros	Cilindro hidráulico	Transfiere movimiento a las articulaciones de la pala.	Fuga de aceite hidráulico
Sobre Nivel de Aceite Tanque Hidraulico	Aceite Hidráulico	Lubricante provee el correcto espesor de película de lubricante para prevenir los contactos metal-metal.	Desgaste adhesivo catastrófico.
Restriccion en el sistema hidraulico	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Restriccion del flujo de aceite hidráulico
Baja Presion de Bomba por desgaste interno	Bomba de alta presión	Transmisión de potencia hidráulica	Excesivo desgaste abrasivo.
Cavitación de bomba hidráulica	Bomba de alta presión	Transmisión de potencia hidráulica	Aereación (entrada de aire)
Baja Presion de Bomba hidráulica del ventilador por desgaste interno	Bomba del ventilador	Transmisión de potencia hidráulica para mover el ventilador	Excesivo desgaste abrasivo interno de bomba hidráulica.
Valvula solenoide y compensadoras del fan atascada o con fuga interna	Valvulas solenoide y compensadoras	Direcciona el flujo de aceite a los implementos.	Bloqueo de válvula, fuga de aceite.

Fuente: Data de registro de mantenimiento de LUBEMAN PERÚ E.I.R.L.

Paso 4. Enumere los efectos potenciales de la falla.

En la (Tabla n. °23.) se indican los 14 potenciales modos de falla por lubricación y su respectivo impacto potencial.

Tabla n. °23. Potenciales modos de falla por lubricación y su respectivo impacto potencial.

FALLAS DE LUBRICACIÓN	ITEM O EQUIPO	FUNCIÓN O PASO EN EL PROCESO	POTENCIAL MODO DE FALLA	IMPACTO POTENCIAL
Bajo nivel de aceite en el tanque Hidráulico	Carter de aceite	Componente provee la correcta cantidad de lubricante para prevenir los contactos metal-metal.	Desgaste adhesivo suave.	Pérdida de la función de control de la fricción y el desgaste. Componente opera caliente
Fuga en manguera de bomba principal alta presión	Bomba principal alta presión	Transmisión de potencia hidráulica	Fuga hidráulica en manguera	Los implementos no pueden moverse por baja Presión de aceite, el equipo es detenido.
Bajo nivel por fuga.	Carter de aceite	Componente provee la correcta cantidad de lubricante para prevenir los contactos metal-metal.	Desgaste adhesivo catastrófico.	Daño (rotura) de componentes internos. Degradación del aceite.
Rotura en manguera hidráulica de baja presión	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos
Aceite Degradado	Aceite Hidráulico	Lubricante provee el control de la temperatura	Lubricante degradado	Oxidación del lubricante Formación de gomas, barnices y lodos.
Fuga de manguera rota del cilindro del Clan.	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos
Fugas de aceite de equipos varios	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos
Fuga interna en cilindros	Cilindro hidráulico	Transfiere movimiento a las articulaciones de la pala.	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos
Sobre Nivel de Aceite Tanque Hidraulico	Aceite Hidráulico	Lubricante provee el correcto espesor de película de lubricante para prevenir los contactos metal-metal.	Desgaste adhesivo catastrófico.	Daño (rotura) de componentes internos
Restricción en el sistema hidraulico	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Restricción del flujo de aceite hidráulico	Se para el equipo por señal de alarma de alta temperatura.
Baja Presion de Bomba por desgaste interno	Bomba de alta presión	Transmisión de potencia hidráulica	Excesivo desgaste abrasivo.	Falla catastrófica, equipo inoperativo sin presión por desgaste interno de bomba hidráulica
Cavitación de bomba hidráulica	Bomba de alta presión	Transmisión de potencia hidráulica	Aereación (entrada de aire)	Falla por desgaste de bomba hidráulica.
Baja Presion de Bomba hidráulica del ventilador por desgaste interno	Bomba del ventilador	Transmisión de potencia hidráulica para mover el ventilador	Excesivo desgaste abrasivo interno de bomba hidráulica.	Falla catastrófica de la bomba. El ventilador deja de funcionar y se para la pala por señal de alarma de alta temperatura.
Valvula solenoide y compensadoras del fan atascada o con fuga interna	Valvulas solenoide y compensadoras	Direcciona el flujo de aceite a los implementos.	Bloqueo de válvula, fuga de aceite.	Se para el equipo por señal de alarma de alta temperatura.

Fuente: Data de registro de mantenimiento de LUBEMAN PERÚ E.I.R.L

Paso 5. Defina el nivel de la severidad.

Con la finalidad de comparar y priorizar, es necesario asignar un nivel de severidad a la falla por cada ocurrencia. Esto se refiere al impacto relativo de la falla sobre la operación con respecto a los costos por paro por hora y por duración esperada, además de los costos de reparación, por lesiones del personal, por limpieza del ambiente entre otros.

En la **Tabla n° 24**, se muestra el nivel de severidad, tomado en cuenta en esta tesis, basado en la duración del paro producido por un evento de falla.

Tabla n.°24. Nivel de Severidad

Duración del Paro (horas)		Clasificación
Igual o más que	Menor que	
24	-	10
12	24	9
9	12	8
6	9	7
3	6	5
1	3	2
>0	1	1

Fuente: Páez. A. Siguiendo el modelo de la tabla n°5 según el proceso FMEA para las fallas de lubricación, traducido por Francisco J. Páez Alfonzo, Noria Latín América 20 de agosto del 2014

Paso 6. Defina los mecanismos potenciales de falla.

Algunas veces llamados "funciones forzadas", los mecanismos de falla son el por qué un modo de falla particular ocurre, o la causa raíz subyacente de una falla.

Tabla n.º 25. Potenciales modos de falla y su respectiva severidad.

FALLAS DE LUBRICACIÓN	ITEM O EQUIPO	FUNCIÓN O PASO EN EL PROCESO	POTENCIAL MODO DE FALLA	IMPACTO POTENCIAL	Severidad
Bajo nivel de aceite en el tanque Hidráulico	Carter de aceite	Componente provee la correcta cantidad de lubricante para prevenir los contactos metal-metal.	Desgaste adhesivo suave.	Pérdida de la función de control de la fricción y el desgaste. Componente opera caliente	7
Fuga en manguera de bomba principal alta presión	Bomba principal alta presión	Transmisión de potencia hidráulica	Fuga hidráulica en manguera	Los implementos no pueden moverse por baja Presion de aceite, el equipo es detenido.	5
Bajo nivel por fuga.	Carter de aceite	Componente provee la correcta cantidad de lubricante para prevenir los contactos metal-metal.	Desgaste adhesivo catastrófico.	Daño (rotura) de componentes internos. Degradación del aceite.	10
Rotura en manguera hidraulica de baja presión	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	8
Aceite Degradado	Aceite Hidráulico	Lubricante provee el control de la temperatura	Lubricante degradado	Oxidación del lubricante Formación de gomas, barnices y lodos.	9
Fuga de manguera rota del cilindro del Clan.	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	8
Fugas de aceite de equipos varios	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	8
Fuga interna en cilindros	Cilindro hidráulico	Transfiere movimiento a las articulaciones de la pala.	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	9
Sobre Nivel de Aceite Tanque Hidraulico	Aceite Hidráulico	Lubricante provee el correcto espesor de película de lubricante para prevenir los contactos metal-metal.	Desgaste adhesivo catastrófico.	Daño (rotura) de componentes internos	10
Restriccion en el sistema hidraulico	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Restriccion del flujo de aceite hidráulico	Se para el equipo por señal de alarma de alta temperatura.	9
Baja Presion de Bomba por desgaste interno	Bomba de alta presión	Transmisión de potencia hidráulica	Excesivo desgaste abrasivo.	Falla catastrófica, equipo inoperativo sin presion por desgaste interno de bomba hidráulica	10
Cavitación de bomba hidráulica	Bomba de alta presión	Transmisión de potencia hidráulica	Aereación (entrada de aire)	Falla por desgaste de bomba hidráulica.	9
Baja Presion de Bomba hidráulica del ventilador por desgaste interno	Bomba del ventilador	Transmisión de potencia hidráulica para mover el ventilador	Excesivo desgaste abrasivo interno de bomba hidráulica.	Falla catastrófica de la bomba. El ventilador deja de funcionar y se para la pala por señal de alarma de alta temperatura.	10
Valvula solenoide y compensadoras del fan atascada o con fuga interna	Valvulas solenoide y compensadoras	Direcciona el flujo de aceite a los implementos.	Bloqueo de válvula, fuga de aceite.	Se para el equipo por señal de alarma de alta temperatura.	10

Fuente: Data de registro de mantenimiento de LUBEMAN PERÚ E.I.R.L.

En la Tabla n. ° 26, se muestra los potenciales modos de falla y sus respectivos mecanismos potenciales de falla.

FALLAS DE LUBRICACIÓN	ITEM O EQUIPO	FUNCIÓN O PASO EN EL PROCESO	POTENCIAL MODO DE FALLA	IMPACTO POTENCIAL	Severidad	Causa potencial del Mecanismo de Falla
Bajo nivel de aceite en el tanque Hidráulico	Carter de aceite	Componente provee la correcta cantidad de lubricante para prevenir los contactos metal-metal.	Desgaste adhesivo suave.	Pérdida de la función de control de la fricción y el desgaste. Componente opera caliente	7	Bajo nivel de lubricante
Fuga en manguera de bomba principal alta presión	Bomba principal alta presión	Transmisión de potencia hidráulica	Fuga hidráulica en manguera	Los implementos no pueden moverse por baja Presión de aceite, el equipo es detenido.	5	Reblandecimiento de manguera por que el aceite está muy caliente (mas de 80°C)
Bajo nivel por fuga.	Carter de aceite	Componente provee la correcta cantidad de lubricante para prevenir los contactos metal-metal.	Desgaste adhesivo catastrófico.	Daño (rotura) de componentes internos. Degradación del aceite.	10	Disminución repentina del volumen de aceite
Rotura en manguera hidraulica de baja presión	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	8	Contaminación por partículas
Aceite Degradado	Aceite Hidráulico	Lubricante provee el control de la temperatura	Lubricante degradado	Oxidación del lubricante Formación de gomas, barnices y lodos.	9	Incremento de la temperatura de operación. Periodo sobreextendido de uso
Fuga de manguera rota del cilindro del Clan.	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	8	Contaminación por partículas
Fugas de aceite de equipos varios	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	8	Contaminación por partículas
Fuga interna en cilindros	Cilindro hidráulico	Transfiere movimiento a las articulaciones de la pala.	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	9	Contaminación por partículas
Sobre Nivel de Aceite Tanque Hidraulico	Aceite Hidráulico	Lubricante provee el correcto espesor de película de lubricante para prevenir los contactos metal-metal.	Desgaste adhesivo catastrófico.	Daño (rotura) de componentes internos	10	Variación súbita de la viscosidad del lubricante por contaminación cruzada.
Restriccion en el sistema hidraulico	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Restriccion del flujo de aceite hidráulico	Se para el equipo por señal de alarma de alta temperatura.	9	Lubricante degradado Formación de gomas, barnices y lodos.
Baja Presion de Bomba por desgaste interno	Bomba de alta presión	Transmisión de potencia hidráulica	Excesivo desgaste abrasivo.	Falla catastrófica, equipo inoperativo sin presion por desgaste interno de bomba hidráulica	10	Contaminación por partículas
Cavitación de bomba hidráulica	Bomba de alta presión	Transmisión de potencia hidráulica	Aereación (entrada de aire)	Falla por desgaste de bomba hidráulica.	9	Entrada de aire por cilindros por sellos dañados, filtros y respiradores en mal estado.
Baja Presion de Bomba hidráulica del ventilador por desgaste interno	Bomba del ventilador	Transmisión de potencia hidráulica para mover el ventilador	Excesivo desgaste abrasivo interno de bomba hidráulica.	Falla catastrófica de la bomba. El ventilador deja de funcionar y se para la pala por señal de alarma de alta temperatura.	10	Contaminación del aceite con partículas.
Valvula solenoide y compensadoras del fan atascada o con fuga interna	Valvulas solenoide y compensadoras	Direcciona el flujo de aceite a los implementos.	Bloqueo de válvula, fuga de aceite.	Se para el equipo por señal de alarma de alta temperatura.	10	Desgaste abrasivo por alta presencia de partículas contaminantes

Fuente: Data de registro de mantenimiento de LUBEMAN PERÚ E.I.R.L

Paso 7. Asigne un nivel de ocurrencia para cada mecanismo de falla.

Utilizando la escala de uno a diez, (uno siendo el menos frecuente y diez el más frecuente).

Para este caso la ocurrencia se ha determinado como:

OCURRENCIA = (Frecuencia de falla x 10) /frecuencia máxima.

Usando la escala de uno al 10, uno siendo el menos frecuente y diez el más frecuente.

En la (Tabla n° 27), se muestra los potenciales modos de falla y sus respectivos valores de ocurrencia de falla, observándose de la siguiente manera.

Tabla n.º 27. Potenciales modos de falla y sus respectivos valores de ocurrencia de falla.

FALLAS DE LUBRICACIÓN	ITEM O EQUIPO	FUNCIÓN O PASO EN EL PROCESO	POTENCIAL MODO DE FALLA	IMPACTO POTENCIAL	Severidad	Causa potencial del Mecanismo de Falla	Ocurrencia
Bajo nivel de aceite en el tanque Hidráulico	Carter de aceite	Componente provee la correcta cantidad de lubricante para prevenir los contactos metal-metal.	Desgaste adhesivo suave.	Pérdida de la función de control de la fricción y el desgaste. Componente opera caliente	7	Bajo nivel de lubricante	10
Fuga en manguera de bomba principal alta presión	Bomba principal alta presión	Transmisión de potencia hidráulica	Fuga hidráulica en manguera	Los implementos no pueden moverse por baja Presion de aceite, el equipo es detenido.	5	Reblandecimiento de manguera por que el aceite está muy caliente (mas de 80°C)	6
Bajo nivel por fuga.	Carter de aceite	Componente provee la correcta cantidad de lubricante para prevenir los contactos metal-metal.	Desgaste adhesivo catastrófico.	Daño (rotura) de componentes internos. Degradación del aceite.	10	Disminución repentina del volumen de aceite	1
Rotura en manguera hidraulica de baja presión	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	8	Contaminación por partículas	1
Aceite Degradado	Aceite Hidráulico	Lubricante provee el control de la temperatura	Lubricante degradado	Oxidación del lubricante Formación de gomas, barnices y lodos.	9	Incremento de la temperatura de operación. Periodo sobreextendido de uso	2
Fuga de manguera rota del cilindro del Clan.	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	8	Contaminación por partículas	1
Fugas de aceite de equipos varios	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	8	Contaminación por partículas	3
Fuga interna en cilindros	Cilindro hidráulico	Transfiere movimiento a las articulaciones de la pala.	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	9	Contaminación por partículas	3
Sobre Nivel de Aceite Tanque Hidraulico	Aceite Hidráulico	Lubricante provee el correcto espesor de película de lubricante para prevenir los contactos metal-metal.	Desgaste adhesivo catastrófico.	Daño (rotura) de componentes internos	10	Variación súbita de la viscosidad del lubricante por contaminación cruzada.	1
Restriccion en el sistema hidraulico	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Restriccion del flujo de aceite hidráulico	Se para el equipo por señal de alarma de alta temperatura.	9	Lubricante degradado Formación de gomas, barnices y lodos.	2
Baja Presion de Bomba por desgaste interno	Bomba de alta presión	Transmisión de potencia hidráulica	Excesivo desgaste abrasivo.	Falla catastrófica, equipo inoperativo sin presion por desgaste interno de bomba hidráulica	10	Contaminación por partículas	2
Cavitación de bomba hidráulica	Bomba de alta presión	Transmisión de potencia hidráulica	Aereación (entrada de aire)	Falla por desgaste de bomba hidráulica.	9	Entrada de aire por cilindros por sellos dañados, filtros y respiradores en mal estado.	2
Baja Presion de Bomba hidráulica del ventilador por desgaste interno	Bomba del ventilador	Transmisión de potencia hidráulica para mover el ventilador	Excesivo desgaste abrasivo interno de bomba hidráulica.	Falla catastrófica de la bomba. El ventilador deja de funcionar y se para la pala por señal de alarma de alta temperatura.	10	Contaminación del aceite con partículas.	2
Valvula solenoide y compensadoras del fan atascada o con fuga interna	Valvulas solenoide y compensadoras	Direcciona el flujo de aceite a los implementos.	Bloqueo de válvula, fuga de aceite.	Se para el equipo por señal de alarma de alta temperatura.	10	Desgaste abrasivo por alta presencia de partículas contaminantes	2

Fuente: Data de registro de mantenimiento de LUBEMAN PERÚ E.I.R.L

Paso 8. Identifique técnicas o métodos predictivos.

Alertas tempranas permiten disminuir el impacto de una falla al permitir administrar la programación de los paros, tener la8s piezas de repuesto y suministros a la mano así como la lista del personal con las habilidades requeridas para implementar las acciones correctivas.

A continuación, en la (Tabla n.º 28.), se muestran los potenciales modos de falla y sus respectivos métodos predictivos.

Tabla n.º 28. Potenciales modos de falla y sus respectivos métodos predictivos.

FALLAS DE LUBRICACIÓN	ITEM O EQUIPO	FUNCIÓN O PASO EN EL PROCESO	POTENCIAL MODO DE FALLA	IMPACTO POTENCIAL	Severidad	Causa potencial del Mecanismo de Falla	Ocurrencia	Métodos Predictivos o Modo de Detección
Bajo nivel de aceite en el tanque Hidráulico	Carter de aceite	Componente provee la correcta cantidad de lubricante para prevenir los contactos metal-metal.	Desgaste adhesivo suave.	Pérdida de la función de control de la fricción y el desgaste. Componente opera caliente	7	Bajo nivel de lubricante	10	Alarma de bajo nivel.
Fuga en manguera de bomba principal alta presión	Bomba principal alta presión	Transmisión de potencia hidráulica	Fuga hidráulica en manguera	Los implementos no pueden moverse por baja Presion de aceite, el equipo es detenido.	5	Reblandecimiento de manguera por que el aceite está muy caliente (mas de 80°C)	6	Análisis de TAN y nivel de oxidación. Medición continua de la temperatura.
Bajo nivel por fuga.	Carter de aceite	Componente provee la correcta cantidad de lubricante para prevenir los contactos metal-metal.	Desgaste adhesivo catastrófico.	Daño (rotura) de componentes internos. Degradación del aceite.	10	Disminución repentina del volumen de aceite	1	Alarma de bajo nivel.
Rotura en manguera hidraulica de baja presión	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	8	Contaminación por partículas	1	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico
Aceite Degradado	Aceite Hidráulico	Lubricante provee el control de la temperatura	Lubricante degradado	Oxidación del lubricante Formación de gomas, barnices y lodos.	9	Incremento de la temperatura de operación. Periodo sobreextendido de uso	2	Análisis de aceites: medición de la Oxidación o del Número Acido Total TAN.
Fuga de manguera rota del cilindro del Clan.	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	8	Contaminación por partículas	1	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico
Fugas de aceite de equipos varios	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	8	Contaminación por partículas	3	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico
Fuga interna en cilindros	Cilindro hidráulico	Transfiere movimiento a las articulaciones de la pala.	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	9	Contaminación por partículas	3	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico
Sobre Nivel de Aceite Tanque Hidraulico	Aceite Hidráulico	Lubricante provee el correcto espesor de película de lubricante para prevenir los contactos metal-metal.	Desgaste adhesivo catastrófico.	Daño (rotura) de componentes internos	10	Variación súbita de la viscosidad del lubricante por contaminación cruzada.	1	Mida la temperatura de operación con termómetro láser.
Restricción en el sistema hidraulico	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Restricción del flujo de aceite hidráulico	Se para el equipo por señal de alarma de alta temperatura.	9	Lubricante degradado Formación de gomas, barnices y lodos.	2	Análisis de aceites: Oxidación ó Número Acido Total TAN.
Baja Presion de Bomba por desgaste interno	Bomba de alta presión	Transmisión de potencia hidráulica	Exceso desgaste abrasivo.	Falla catastrófica, equipo inoperativo sin presion por desgaste interno de bomba hidráulica	10	Contaminación por partículas	2	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico
Cavitación de bomba hidráulica	Bomba de alta presión	Transmisión de potencia hidráulica	Aereación (entrada de aire)	Falla por desgaste de bomba hidráulica.	9	Entrada de aire por cilindros por sellos dañados, filtros y respiradores en mal estado.	2	Operador escucha el ruido de cavitación de las bombas y para el equipo.
Baja Presion de Bomba hidráulica del ventilador por desgaste interno	Bomba del ventilador	Transmisión de potencia hidráulica para mover el ventilador	Exceso desgaste abrasivo interno de bomba hidráulica.	Falla catastrófica de la bomba. El ventilador deja de funcionar y se para la pala por señal de alarma de alta temperatura.	10	Contaminación del aceite con partículas.	2	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico. Análisis ferográfico.
Valvula solenoide y compensadoras del fan atascada o con fuga interna	Valvulas solenoide y compensadoras	Direcciona el flujo de aceite a los implementos.	Bloqueo de válvula, fuga de aceite.	Se para el equipo por señal de alarma de alta temperatura.	10	Desgaste abrasivo por alta presencia de partículas contaminantes	2	Análisis de TAN y de conteo de partículas

Fuente: Data de registro de mantenimiento de LUBEMAN PERÚ E.I.R.L

Paso 9. Asigne un nivel de detección para cada modo/mecanismo de falla.

En la *Tabla* n° 29, se indica los niveles de detección, que se utilizan para la presente tesis.

Tabla n.° 29. Niveles de detección.

DETECCIÓN	RANKING
Indetectable	10
Muy remoto	9
Remoto	8
Muy bajo	7
Bajo	6
Moderado	5
Moderada -Alta	4
Alta	3
Muy Alta	2
Con seguridad	1

Fuente: Páez. A. Siguiendo el modelo de la tabla n°5 según el proceso FMEA para las fallas de lubricación, traducido por Francisco J. Páez Alfonzo, Noria Latín América 20 de agosto del 2014

Tabla n.º 30. Potenciales modos de falla y sus niveles de detección.

FALLAS DE LUBRICACIÓN	ITEM O EQUIPO	FUNCIÓN O PASO EN EL PROCESO	POTENCIAL MODO DE FALLA	IMPACTO POTENCIAL	Severidad	Causa potencial del Mecanismo de Falla	Ocurrencia	Métodos Predictivos o Modo de Detección	Detección Actual
Bajo nivel de aceite en el tanque Hidráulico	Carter de aceite	Componente provee la correcta cantidad de lubricante para prevenir los contactos metal-metal.	Desgaste adhesivo suave.	Pérdida de la función de control de la fricción y el desgaste. Componente opera caliente	7	Bajo nivel de lubricante	10	Alarma de bajo nivel.	7
Fuga en manguera de bomba principal alta presión	Bomba principal alta presión	Transmisión de potencia hidráulica	Fuga hidráulica en manguera	Los implementos no pueden moverse por baja Presion de aceite, el equipo es detenido.	5	Reblandecimiento de manguera por que el aceite está muy caliente (mas de 80°C)	6	Análisis de TAN y nivel de oxidación. Medición continua de la temperatura.	9
Bajo nivel por fuga.	Carter de aceite	Componente provee la correcta cantidad de lubricante para prevenir los contactos metal-metal.	Desgaste adhesivo catastrófico.	Daño (rotura) de componentes internos. Degradación del aceite.	10	Disminución repentina del volumen de aceite	1	Alarma de bajo nivel.	7
Rotura en manguera hidraulica de baja presión	Lineas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	8	Contaminación por partículas	1	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico	8
Aceite Degradado	Aceite Hidráulico	Lubricante provee el control de la temperatura	Lubricante degradado	Oxidación del lubricante Formación de gomas, barnices y lodos.	9	Incremento de la temperatura de operación. Periodo sobreextendido de uso	2	Análisis de aceites: medición de la Oxidación o del Número Acido Total TAN.	9
Fuga de manguera rota del cilindro del Clan.	Lineas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	8	Contaminación por partículas	1	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico	8
Fugas de aceite de equipos varios	Lineas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	8	Contaminación por partículas	3	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico	8
Fuga interna en cilindros	Cilindro hidráulico	Transfiere movimiento a las articulaciones de la pala.	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	9	Contaminación por partículas	3	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico	8
Sobre Nivel de Aceite Tanque Hidraulico	Aceite Hidráulico	Lubricante provee el correcto espesor de película de lubricante para prevenir los contactos metal-metal.	Desgaste adhesivo catastrófico.	Daño (rotura) de componentes internos	10	Variación súbita de la viscosidad del lubricante por contaminación cruzada.	1	Mida la temperatura de operación con termómetro láser.	8
Restricción en el sistema hidraulico	Lineas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Restricción del flujo de aceite hidráulico	Se para el equipo por señal de alarma de alta temperatura.	9	Lubricante degradado Formación de gomas, barnices y lodos.	2	Análisis de aceites: Oxidación ó Número Acido Total TAN.	9
Baja Presion de Bomba por desgaste interno	Bomba de alta presión	Transmisión de potencia hidráulica	Excesivo desgaste abrasivo.	Falla catastrófica, equipo inoperativo sin presion por desgaste interno de bomba hidráulica	10	Contaminación por partículas	2	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico	8
Cavitación de bomba hidráulica	Bomba de alta presión	Transmisión de potencia hidráulica	Aereación (entrada de aire)	Falla por desgaste de bomba hidráulica.	9	Entrada de aire por cilindros por sellos dañados, filtros y respiradores en mal estado.	2	Operador escucha el ruido de cavitación de las bombas y para el equipo.	6
Baja Presion de Bomba hidráulica del ventilador por desgaste interno	Bomba del ventilador	Transmisión de potencia hidráulica para mover el ventilador	Excesivo desgaste abrasivo interno de bomba hidráulica.	Falla catastrófica de la bomba. El ventilador deja de funcionar y se para la pala por señal de alarma de alta temperatura.	10	Contaminación del aceite con partículas.	2	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico. Análisis ferrográfico.	8
Valvula solenoide y compensadoras del fan atascada o con fuga interna	Valvulas solenoide y compensadoras	Direcciona el flujo de aceite a los implementos.	Bloqueo de válvula, fuga de aceite.	Se para el equipo por señal de alarma de alta temperatura.	10	Desgaste abrasivo por alta presencia de partículas contaminantes	2	Análisis de TAN y de conteo de partículas	10

Fuente: Data de registro de mantenimiento de LUBEMAN PERÚ E.I.R.L.

Paso 10. Asigne un Número de Prioridad de Riesgo (RPN por sus siglas en inglés).

El RPN se calcula multiplicando el nivel de severidad, por el de ocurrencia y por el de detección (Severidad x Ocurrencia x Detección = RPN).

El RPN valora la importancia de cada falla funcional potencial sobre una escala de uno a 1000, siendo uno la más baja prioridad y 1000 la más alta.

La (Tabla n.º 31), se indica niveles de criticidad de RPN, según Patiño Carmen, del Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad de Antioquia, Colombia.

Tabla n.º31. Niveles de criticidades para RPN.

500 - 1000	Alto riesgo de falla.
125 - 499	Riesgo de Falla medio.
1 - 124	Riesgo de fallo bajo.
0	No existe riesgo de falla.

Fuente: Páez. (2014). El proceso FMEA para las fallas de lubricación, Páez, F. Noria Latín
América 20 de agosto del 2014

En la Tabla n° 32, se observa los potenciales modos de falla y su RPN, Mostrados líneas abajo.

Tabla n.º 32. Potenciales modos de falla y su RPN.

FALLAS DE LUBRICACIÓN	ITEM O EQUIPO	FUNCIÓN O PASO EN EL PROCESO	POTENCIAL MODO DE FALLA	IMPACTO POTENCIAL	Severidad	Causa potencial del Mecanismo de Falla	Ocurrencia	Métodos Predictivos o Modo de Detección	Detección Actual	RPN
Bajo nivel de aceite en el tanque Hidráulico	Carter de aceite	Componente provee la correcta cantidad de lubricante para prevenir los contactos metal-metal.	Desgaste adhesivo suave.	Pérdida de la función de control de la fricción y el desgaste. Componente opera caliente	7	Bajo nivel de lubricante	10	Alarma de bajo nivel.	7	490
Fuga en manguera de bomba principal alta presión	Bomba principal alta presión	Transmisión de potencia hidráulica	Fuga hidráulica en manguera	Los implementos no pueden moverse por baja Presión de aceite, el equipo es detenido.	5	Reblandecimiento de manguera por que el aceite está muy caliente (mas de 80°C)	6	Análisis de TAN y nivel de oxidación. Medición continua de la temperatura.	9	270
Bajo nivel por fuga.	Carter de aceite	Componente provee la correcta cantidad de lubricante para prevenir los contactos metal-metal.	Desgaste adhesivo catastrófico.	Daño (rotura) de componentes internos. Degradación del aceite.	10	Disminución repentina del volumen de aceite	1	Alarma de bajo nivel.	7	70
Rotura en manguera hidráulica de baja presión	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	8	Contaminación por partículas	1	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico	8	64
Aceite Degradado	Aceite Hidráulico	Lubricante provee el control de la temperatura	Lubricante degradado	Oxidación del lubricante Formación de gomas, barnices y lodos.	9	Incremento de la temperatura de operación. Periodo sobreextendido de uso	2	Análisis de aceites: medición de la Oxidación o del Número Acido Total TAN.	9	162
Fuga de manguera rota del cilindro del Clan.	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	8	Contaminación por partículas	1	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico	8	64
Fugas de aceite de equipos varios	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	8	Contaminación por partículas	3	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico	8	192
Fuga interna en cilindros	Cilindro hidráulico	Transfiere movimiento a las articulaciones de la pala.	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	9	Contaminación por partículas	3	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico	8	216
Sobre Nivel de Aceite Tanque Hidraulico	Aceite Hidráulico	Lubricante provee el correcto espesor de película de lubricante para prevenir los contactos metal-metal.	Desgaste adhesivo catastrófico.	Daño (rotura) de componentes internos	10	Variación súbita de la viscosidad del lubricante por contaminación cruzada	1	Mida la temperatura de operación con termómetro láser.	8	80
Restricción en el sistema hidráulico	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Restricción del flujo de aceite hidráulico	Se para el equipo por señal de alarma de alta temperatura.	9	Lubricante degradado Formación de gomas, barnices y lodos.	2	Análisis de aceites: Oxidación ó Número Acido Total TAN.	9	162
Baja Presion de Bomba por desgaste interno	Bomba de alta presión	Transmisión de potencia hidráulica	Excesivo desgaste abrasivo.	Falla catastrófica, equipo inoperativo sin presión por desgaste interno de bomba hidráulica	10	Contaminación por partículas	2	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico	8	160
Cavitación de bomba hidráulica	Bomba de alta presión	Transmisión de potencia hidráulica	Aeración (entrada de aire)	Falla por desgaste de bomba hidráulica.	9	Entrada de aire por cilindros por sellos dañados, filtros y respiradores en mal estado.	2	Operador escucha el ruido de cavitación de las bombas y para el equipo.	6	108
Baja Presion de Bomba hidráulica del ventilador por desgaste interno	Bomba del ventilador	Transmisión de potencia hidráulica para mover el ventilador	Excesivo desgaste abrasivo interno de bomba hidráulica.	Falla catastrófica de la bomba. El ventilador deja de funcionar y se para la pala por señal de alarma de alta temperatura.	10	Contaminación del aceite con partículas.	2	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico. Análisis ferográfico.	8	160
Valvula solenoide y compensadoras del fan atascada o con fuga interna	Valvulas solenoide y compensadoras	Direcciona el flujo de aceite a los implementos.	Bloqueo de válvula, fuga de aceite.	Se para el equipo por señal de alarma de alta temperatura.	10	Desgaste abrasivo por alta presencia de partículas contaminantes	2	Análisis de TAN y de conteo de partículas	10	200

Fuente: Data de registro de mantenimiento de LUBEMAN PERÚ E.I.R.L

Paso 11. Identifique las acciones de mantenimiento a recomendar.

Basados en la naturaleza e importancia de los diferentes modos y mecanismos de falla, el costo de implementar las técnicas y tecnologías de detección y el RPN, se recomienda las acciones de mantenimiento indicadas en la (Tabla n° 33.)

Tabla n. ° 33. Potenciales modos de falla y sus acciones de mantenimiento recomendadas.

FALLAS DE LUBRICACIÓN	ITEM O EQUIPO	FUNCIÓN O PASO EN EL PROCESO	POTENCIAL MODO DE FALLA	IMPACTO POTENCIAL	Severidad	Causa potencial del Mecanismo de Falla	Ocurrencia	Métodos Predictivos o Modo de Detección	Detección Actual	RPN	Acciones Recomendadas
Bajo nivel de aceite en el tanque Hidráulico	Carter de aceite	Componente provee la correcta cantidad de lubricante para prevenir los contactos metal-metal.	Degaste adhesivo suave.	Pérdida de la función de control de la fricción y el desgaste. Componente opera caliente	7	Bajo nivel de lubricante	10	Alarma de bajo nivel.	7	490	Reparar alarma y poner sistema redundante
Fuga en manguera de bomba principal alta presión	Bomba principal alta presión	Transmisión de potencia hidráulica	Fuga hidráulica en manguera	Los implementos no pueden moverse por baja Presion de aceite, el equipo es detenido.	5	Reblandimiento de manguera por que el aceite está muy caliente (mas de 80°C)	6	Análisis de TAN y nivel de oxidación. Medición continua de la temperatura.	9	270	Monitoreo Mensual del aceite. Instalación de alarmas de alta temperatura.
Bajo nivel por fuga.	Carter de aceite	Componente provee la correcta cantidad de lubricante para prevenir los contactos metal-metal.	Degaste adhesivo catastrófico.	Daño (rotura) de componentes internos. Degradación del aceite.	10	Disminución repentina del volumen de aceite	1	Alarma de bajo nivel.	7	70	Reparar alarma y poner sistema redundante
Rotura en manguera hidraulica de baja presión	Lineas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	8	Contaminación por partículas	1	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico	8	64	Usar filtros de mayor eficiencia con tasa beta al menos de 200. Cambiar sellos dañados.
Aceite Degradado	Aceite Hidráulico	Lubricante provee el control de la temperatura	Lubricante degradado	Oxidación del lubricante Formación de gomas, barnices y lodos.	9	Incremento de la temperatura de operación. Periodo sobreextendido de uso	2	Análisis de aceites: medición de la Oxidación o del Número Acido Total TAN.	9	162	Monitoreo Mensual del aceite. Cambio de aceites por condición, no por tiempo.
Fuga de manguera rota del cilindro del Clan.	Lineas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	8	Contaminación por partículas	1	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico	8	64	Usar filtros de mayor eficiencia con tasa beta al menos de 200. Cambiar sellos dañados.
Fugas de aceite de equipos varios	Lineas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	8	Contaminación por partículas	3	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico	8	192	Usar filtros de mayor eficiencia con tasa beta al menos de 200. Cambiar sellos dañados.
Fuga interna en cilindros	Cilindro hidráulico	Transfiere movimiento a las articulaciones de la pala.	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	9	Contaminación por partículas	3	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico	8	216	Usar filtros de mayor eficiencia con tasa beta al menos de 200. Cambiar sellos dañados.
Sobre Nivel de Aceite Tanque Hidraulico	Aceite Hidráulico	Lubricante provee el correcto espesor de película de lubricante para prevenir los contactos metal-metal.	Degaste adhesivo catastrófico.	Daño (rotura) de componentes internos	10	Variación súbita de la viscosidad del lubricante por contaminación cruzada.	1	Mida la temperatura de operación con termómetro láser.	8	80	Implemente acciones de control de la contaminación
Restricción en el sistema hidraulico	Lineas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Restricción del flujo de aceite hidráulico	Se para el equipo por señal de alarma de alta temperatura.	9	Lubricante degradado Formación de gomas, barnices y lodos.	2	Análisis de aceites: Oxidación ó Número Acido Total TAN.	9	162	Mejorar los limites del análisis
Baja Presion de Bomba por desgaste interno	Bomba de alta presión	Transmisión de potencia hidráulica	Excesivo desgaste abrasivo.	Falla catastrófica, equipo inoperativo sin presión por desgaste interno de bomba hidráulica	10	Contaminación por partículas	2	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico	8	160	Usar filtros de mayor eficiencia con tasa beta al menos de 200. Mejorar los objetivos de limpieza.
Cavitación de bomba hidráulica	Bomba de alta presión	Transmisión de potencia hidráulica	Aereación (entrada de aire)	Falla por desgaste de bomba hidráulica.	9	Entrada de aire por cilindros por sellos dañados, filtros y respiradores en mal estado.	2	Operador escucha el ruido de cavitación de las bombas y para el equipo.	6	108	Revisar la frecuencia de cambio de sellos hidráulicos. Revisar condición de sellos durante su cambio para ajustar la frecuencia de cambio. Revisar condición de respiradores y filtros.
Baja Presion de Bomba hidráulica del ventilador por desgaste interno	Bomba del ventilador	Transmisión de potencia hidráulica para mover el ventilador	Excesivo desgaste abrasivo interno de bomba hidráulica.	Falla catastrófica de la bomba. El ventilador deja de funcionar y se para la pala por señal de alarma de alta temperatura.	10	Contaminación del aceite con partículas.	2	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico. Análisis ferográfico.	8	160	Usar filtros de mayor eficiencia con tasa beta al menos de 200
Valvula solenoide y compensadoras del fan atascada o con fuga interna	Valvulas solenoide y compensadoras	Direcciona el flujo de aceite a los implementos.	Bloqueo de válvula, fuga de aceite.	Se para el equipo por señal de alarma de alta temperatura.	10	Degaste abrasivo por alta presencia de partículas contaminantes	2	Análisis de TAN y de conteo de partículas	10	200	Usar filtros de mayor eficiencia con tasa beta al menos de 200. Reparar o reemplazar válvula.

Fuente: Data de registro de mantenimiento de LUBEMAN PERÚ. E.I.R.L

Por tanto, el formato para la aplicación del FMEA en lubricación nos da una herramienta de uso general como marco de referencia del FMEA para definir con precisión las fallas relacionadas con la lubricación dentro del contexto funcional de la máquina y su contribución al logro de los objetivos comerciales de la compañía.

Paso 12. Implementación de las acciones de mantenimiento recomendadas.

Basados en las acciones de mantenimiento recomendadas e indicadas en la (*Tabla n° 33*, se realizaron las siguientes acciones:

- Entrenamiento al personal de Mantenimiento en diversas materias como, técnicas de muestreo de aceites, lubricación básica, filtración y los fundamentos del control de la contaminación.
- Se reparó alarma y se puso un sistema redundante de control de nivel de lubricante.
- Se monitoreó mensualmente el estado del lubricante.
- Se Instalaron alarmas de alta temperatura en el lubricante.
- Se usó filtros de mayor eficiencia.
- Se cambió los sellos dañados.
- Se implementó el control de la contaminación del lubricante.
- Se mejoraron los límites del análisis del lubricante.
- Se revisó la frecuencia de cambio de sellos hidráulicos.
- Se revisó la condición de sellos durante su cambio para ajustar la frecuencia de cambio de sellos.
- Se reparó la válvula solenoide.

Figura n.º 18. Implementación de las acciones de mantenimiento recomendadas.



Fuente: Imágenes proporcionada por LUBEMAN PERÚ E.I.R.L

Como resultado de la implementación de estas acciones se obtuvieron los siguientes datos, ver
(Tabla n° 34.)

Tabla n. ° 34. Resultados de la implementación del RCT.

FALLAS DE LUBRICACIÓN	ITEM O EQUIPO	FUNCIÓN O PASO EN EL PROCESO	POTENCIAL MODO DE FALLA	IMPACTO POTENCIAL	Severidad	Causa potencial del Mecanismo de Falla	Ocurrencia	Métodos Predictivos o Modo de Detección	Detección Actual	RPN
Bajo nivel de aceite en el tanque Hidráulico	Carter de aceite	Componente provee la correcta cantidad de lubricante para prevenir los contactos metal-metal.	Desgaste adhesivo suave.	Pérdida de la función de control de la fricción y el desgaste. Componente opera caliente	7	Bajo nivel de lubricante	2	Alarma de bajo nivel.	1	14
Fuga en manguera de bomba principal alta presión	Bomba principal alta presión	Transmisión de potencia hidráulica	Fuga hidráulica en manguera	Los implementos no pueden moverse por baja Presión de aceite, el equipo es detenido.	5	Reblandecimiento de manguera por que el aceite está muy caliente (mas de 80°C)	2	Análisis de TAN y nivel de oxidación. Medición continua de la temperatura.	9	90
Bajo nivel por fuga.	Carter de aceite	Componente provee la correcta cantidad de lubricante para prevenir los contactos metal-metal.	Desgaste adhesivo catastrófico.	Daño (rotura) de componentes internos. Degradación del aceite.	10	Disminución repentina del volumen de aceite	1	Alarma de bajo nivel.	2	20
Rotura en manguera hidráulica de baja presión	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	8	Contaminación por partículas	1	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico	2	16
Aceite Degradado	Aceite Hidráulico	Lubricante provee el control de la temperatura	Lubricante degradado	Oxidación del lubricante Formación de gomas, barnices y lodos.	9	Incremento de la temperatura de operación. Periodo sobreextendido de uso	1	Análisis de aceites: medición de la Oxidación o del Número Ácido Total TAN.	3	27
Fuga de manguera rota del cilindro del Clan.	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	8	Contaminación por partículas	1	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico	2	16
Fugas de aceite de equipos varios	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	8	Contaminación por partículas	1	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico	2	16
Fuga interna en cilindros	Cilindro hidráulico	Transfiere movimiento a las articulaciones de la pala.	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	9	Contaminación por partículas	1	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico	2	18
Sobre Nivel de Aceite Tanque Hidraulico	Aceite Hidráulico	Lubricante provee el correcto espesor de película de lubricante para prevenir los contactos metal-metal.	Desgaste adhesivo catastrófico.	Daño (rotura) de componentes internos	10	Variación súbita de la viscosidad del lubricante por contaminación cruzada.	1	Mida la temperatura de operación con termómetro láser.	2	20
Restricción en el sistema hidráulico	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Restricción del flujo de aceite hidráulico	Se para el equipo por señal de alarma de alta temperatura.	9	Lubricante degradado Formación de gomas, barnices y lodos.	2	Análisis de aceites: Oxidación ó Número Ácido Total TAN.	2	36
Baja Presion de Bomba por desgaste interno	Bomba de alta presión	Transmisión de potencia hidráulica	Excesivo desgaste abrasivo.	Falla catastrófica, equipo inoperativo sin presión por desgaste interno de bomba hidráulica	10	Contaminación por partículas	1	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico	2	20
Cavitación de bomba hidráulica	Bomba de alta presión	Transmisión de potencia hidráulica	Aereación (entrada de aire)	Falla por desgaste de bomba hidráulica.	9	Entrada de aire por cilindros por sellos dañados, filtros y respiradores en mal estado.	2	Operador escucha el ruido de cavitación de las bombas y para el equipo.	4	72
Baja Presion de Bomba hidráulica del ventilador por desgaste interno	Bomba del ventilador	Transmisión de potencia hidráulica para mover el ventilador	Excesivo desgaste abrasivo interno de bomba hidráulica.	Falla catastrófica de la bomba. El ventilador deja de funcionar y se para la pala por señal de alarma de alta temperatura.	10	Contaminación del aceite con partículas.	2	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico. Análisis ferrográfico.	2	40
Valvula solenoide y compensadoras del fan atascada o con fuga interna	Valvulas solenoide y compensadoras	Direcciona el flujo de aceite a los implementos.	Bloqueo de válvula, fuga de aceite.	Se para el equipo por señal de alarma de alta temperatura.	10	Desgaste abrasivo por alta presencia de partículas contaminantes	2	Análisis de TAN y de conteo de partículas	2	40

En la Tabla n° 35 se puede observar los valores de RPN anteriores y actuales, después de aplicar RCT (tribología centrada en confiabilidad), durante los primeros 6 meses del año 2016.

Tabla n.º 35. RPN antes y después del RCT.

FALLAS DE LUBRICACIÓN	ITEM O EQUIPO	FUNCIÓN O PASO EN EL PROCESO	POTENCIAL MODO DE FALLA	IMPACTO POTENCIAL	Severidad	Causa potencial del Mecanismo de Falla	Ocurrencia	Métodos Predictivos o Modo de Detección	Detección Actual	RPN Antes	Acciones Recomendadas	¿Se ejecutó?	Severidad	Ocurrencia	Detección Final	RPN Actual
Bajo nivel de aceite en el tanque Hidráulico	Carter de aceite	Componente provee la correcta cantidad de lubricante para prevenir los contactos metal-metal.	Desgaste adhesivo suave.	Pérdida de la función de control de la fricción y el desgaste. Componente opera caliente	7	Bajo nivel de lubricante	10	Alarma de bajo nivel.	7	490	Reparar alarma y poner sistema redundante	Si	7	2	1	14
Fuga en manguera de bomba principal alta presión	Bomba principal alta presión	Transmisión de potencia hidráulica	Fuga hidráulica en manguera	Los implementos no pueden moverse por baja Presión de aceite, el equipo es detenido.	5	Reblandecimiento de manguera por que el aceite está muy caliente (mas de 80°C)	6	Análisis de TAN y nivel de oxidación. Medición continua de la temperatura.	9	270	Monitoreo Mensual del aceite. Instalación de alarmas de alta temperatura.	Si	5	2	9	90
Bajo nivel por fuga.	Carter de aceite	Componente provee la correcta cantidad de lubricante para prevenir los contactos metal-metal.	Desgaste adhesivo catastrófico.	Daño (rotura) de componentes internos. Degradación del aceite.	10	Disminución repentina del volumen de aceite	1	Alarma de bajo nivel.	7	70	Reparar alarma y poner sistema redundante	Si	10	1	2	20
Rotura en manguera hidráulica de baja presión	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	8	Contaminación por partículas	1	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico	8	64	Usar filtros de mayor eficiencia con tasa beta al menos de 200. Cambiar sellos dañados.	Si	8	1	2	16
Aceite Degradado	Aceite Hidráulico	Lubricante provee el control de la temperatura	Lubricante degradado	Oxidación del lubricante Formación de gomas, barnices y lodos.	9	Incremento de la temperatura de operación. Periodo sobreentendido de uso	2	Análisis de aceites: medición de la Oxidación o del Número Acido Total TAN.	9	162	Monitoreo Mensual del aceite. Cambio de aceites por condición, no por tiempo.	Si	9	1	3	27
Fuga de manguera rota del cilindro del Clan.	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	8	Contaminación por partículas	1	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico	8	64	Usar filtros de mayor eficiencia con tasa beta al menos de 200. Cambiar sellos dañados.	Si	8	1	2	16
Fugas de aceite de equipos varios	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	8	Contaminación por partículas	3	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico	8	192	Usar filtros de mayor eficiencia con tasa beta al menos de 200. Cambiar sellos dañados.	Si	8	1	2	16
Fuga interna en cilindros	Cilindro hidráulico	Transfiere movimiento a las articulaciones de la pala.	Fuga de aceite hidráulico	Pérdida de potencia para mover implementos	9	Contaminación por partículas	3	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico	8	216	Usar filtros de mayor eficiencia con tasa beta al menos de 200. Cambiar sellos dañados.	Si	9	1	2	18
Sobre Nivel de Aceite Tanque Hidraulico	Aceite Hidráulico	Lubricante provee el correcto espesor de película de lubricante para prevenir los contactos metal-metal.	Desgaste adhesivo catastrófico.	Daño (rotura) de componentes internos	10	Variación súbita de la viscosidad del lubricante por contaminación cruzada.	1	Mida la temperatura de operación con termómetro láser.	8	80	Implemente acciones de control de la contaminación	Si	10	1	2	20
Restricción en el sistema hidráulico	Líneas hidráulicas	Transporta aceite a los implementos	Restricción del flujo de aceite hidráulico	Se para el equipo por señal de alarma de alta temperatura.	9	Lubricante degradado Formación de gomas, barnices y lodos.	2	Análisis de aceites: Oxidación ó Número Acido Total TAN.	9	162	Mejorar los límites del análisis	Si	9	2	2	36
Baja Presion de Bomba por desgaste interno	Bomba de alta presión	Transmisión de potencia hidráulica	Excesivo desgaste abrasivo.	Falla catastrófica, equipo inoperativo sin presión por desgaste interno de bomba hidráulica	10	Contaminación por partículas	2	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico	8	160	Usar filtros de mayor eficiencia con tasa beta al menos de 200. Mejorar los objetivos de limpieza.	Si	10	1	2	20
Cavitación de bomba hidráulica	Bomba de alta presión	Transmisión de potencia hidráulica	Aereación (entrada de aire)	Falla por desgaste de bomba hidráulica.	9	Entrada de aire por cilindros por sellos dañados, filtros y respiradores en mal estado.	2	Operador escucha el ruido de cavitación de las bombas y para el equipo.	6	108	Revisar la frecuencia de cambio de sellos hidráulicos. Revisar condición de sellos durante su cambio para ajustar la frecuencia de cambio. Revisar condición de respiradores y filtros.	Si	9	2	4	72
Baja Presion de Bomba hidráulica del ventilador por desgaste interno	Bomba del ventilador	Transmisión de potencia hidráulica para mover el ventilador	Excesivo desgaste abrasivo interno de bomba hidráulica.	Falla catastrófica de la bomba. El ventilador deja de funcionar y se para la pala por señal de alarma de alta temperatura.	10	Contaminación del aceite con partículas.	2	Análisis de conteo de partículas, análisis espectrométrico. Análisis ferrográfico.	8	160	Usar filtros de mayor eficiencia con tasa beta al menos de 200	Si	10	2	2	40
Valvula solenoide y compensadoras del fan atascada o con fuga interna	Valvulas solenoide y compensadoras	Direcciona el flujo de aceite a los implementos.	Bloqueo de válvula, fuga de aceite.	Se para el equipo por señal de alarma de alta temperatura.	10	Desgaste abrasivo por alta presencia de partículas contaminantes	2	Análisis de TAN y de conteo de partículas	10	200	Usar filtros de mayor eficiencia con tasa beta al menos de 200. Reparar o reemplazar válvula.	Si	10	2	2	40

Fuente: Data de mantenimiento proporcionada por Lubeman Servicios Generales E.I.R.L

Paso 13. Indicadores de Mantenimiento.

En la Tabla n° 36, se muestran las frecuencias de falla inicial y final en un periodo de 6 meses, es decir antes de la implementación del RCT y después de la implementación del RCT. Véase también referencia en tabla n° 21

Tabla n. ° 36. Frecuencia de fallas inicial y final.

FALLAS DE LUBRICACIÓN	Frecuencia Inicial	Frecuencia Final
Bajo nivel de aceite en el tanque Hidraulico	138	28
Se rellenó por fuga en manguera de bomba principal alta presión	80	27.0
Bajo nivel por fuga.	17	17.0
Rotura en manguera hidraulica de baja presión	15	15.0
Aceite Degradado	22	11.0
Fuga de manguera rota del cilindro del Clan.	5	5.0
Fuga de aceite de equipos varios	38	13.0
Total general	315	116

Elaborado: Tello Castro, G.; Espinoza Villaorduña, E.

Con los datos de la *Tabla n°36* mostradas líneas arriba, se determinan los valores de:

Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF)

MTBF= (6 equipos) *(6 meses o 180 días) / Frecuencia o número de fallas.

MTBF Inicial = $6 \times 180 \text{ días} / 315 \text{ fallas} = 3.43 \text{ días/falla}$

MTBF Final = $6 \times 180 \text{ días} / 116 \text{ fallas} = 9.31 \text{ días/falla}$

El resultado indica que la compañía sin implementar un programa de tribología centrada en confiabilidad tenía un MTBF de 3.43 días /falla por las seis palas, luego de la implementación aumentó a 9.31 días /falla, incrementando así a un 171.42%.

Tasa de Fallas (N° Paradas no programadas de equipos).

Con los datos reales podemos observar que se obtiene la tasa de fallas por lubricación actual y la nueva tasa de fallas se obtiene al implementar efectivamente las acciones encaminadas a reducir los modos y efectos de las fallas de lubricación. Ver Tablas n° 37 y 38.

Tabla n° 37. Tasa de Falla Inicial.

FALLAS DE LUBRICACIÓN	Frecuencia	Ocurrencia Relativa
Bajo nivel de aceite en el tanque Hidraulico	138	10
Se rellenó por fuga en manguera de bomba principal alta presión	80	5.8
Bajo nivel por fuga.	17	1.2
Rotura en manguera hidraulica de baja presión	15	1.1
Aceite Degradado	22	1.6
Fuga de manguera rota del cilindro del Clan.	5	0.4
Fuga de aceite de equipos varios	38	2.8
Total general	315	

TASA DE FALLAS DE LUBRICACIÓN	8.75	Fallas por mes por pala
--------------------------------------	-------------	--------------------------------

Elaborado: Tello Castro, G.; Espinoza Villaorduña, E.

Tabla n° 38. Tasa de Falla Final

FALLAS DE LUBRICACIÓN	Frecuencia	Ocurrencia Relativa	Ocurrencia Actual	Ocurrencia Final	Frecuencia Final Fallas
Bajo nivel de aceite en el tanque Hidraulico	138	10	10	2	28
Se rellenó por fuga en manguera de bomba principal alta presión	80	5.8	6	2	27
Bajo nivel por fuga.	17	1.2	1	1	17
Rotura en manguera hidraulica de baja presión	15	1.1	1	1	15
Aceite Degradado	22	1.6	2	1	11
Fuga de manguera rota del cilindro del Clan.	5	0.4	1	1	5
Fuga de aceite de equipos varios	38	2.8	3	1	13
Total general	315				116

TASA DE FALLAS DE LUBRICACIÓN x mes por pala	8.75	3.22
---	-------------	-------------

Elaborado: Tello Castro, G.; Espinoza Villaorduña, E.

El resultado indica que la compañía sin implementar un programa de tribología centrada en la confiabilidad tenía una tasa de fallas de lubricación de 8.75 fallas al mes por cada pala y luego de la implementación tiene sólo 3.22 fallas al mes por pala, reduciendo así un 63.2% del valor inicial de las fallas iniciales.

Tiempo Medio para Reparar (MTTR)

De lo datos tenemos:

Sin RCT:

Tiempo de Intervención= 261.4 horas = 10.9 días.

Número de fallas= 315

MTTR Inicial = 10.9 días/315 fallas =0.035 días/falla.

Con RCT:

Tiempo de Intervención= 96.2 horas = 4.0 días.

Número de fallas= 116.

MTTR Final = 4.0 días/116 fallas = 0.034 días/falla.

Nota: Datos de la tabla n°31.

Cuadro comparativo:

Tabla n°39. Cuadro comparativo de MTTR aplicando RCT

VARIABLE	UNIDAD	SIN RCT	CON RCT
Tiempo de Intervención	días	10.9	4
Numero de fallas	Cant.	315	116
MTTR final	días/falla	0.035	0.034

Elaborado: Tello Castro, G.; Espinoza Villaorduña, E.

El resultado indica que la compañía sin implementar un programa de tribología centrada en confiabilidad tenía un MTTR de 0.035 días /falla por las seis palas y luego de la implementación esto ha disminuido a unos 0.034 días /falla.

Confiabilidad (C)

De lo datos tenemos:

Sin RCT:

MTBF= 3.43 días/falla.

MTTR= 0.035 días/falla.

$C = (MTBF) * 100 / (MTBF + MTTR)$

$C = 3.43 * 100 / (3.43 + 0.035) = 98.99\%$

Con RCT:

MTBF= 9.31 días/falla.

MTTR= 0.034 días/falla.

$C = (MTBF) * 100 / (MTBF + MTTR)$

$C = 9.31 * 100 / (9.31 + 0.034) = 99.64\%$

Cuadro comparativo:

Tabla n.º40. Cuadro comparativo de confiabilidad aplicando RCT

VARIABLE	UNIDAD	SIN RCT	CON RCT
MTBF	días/falla	3.43	9.31
MTTR	días/falla	0.035	0.034
C (confiabilidad)	%	98.990	99.64

Elaborado: Tello Castro, G.; Espinoza Villaorduña, E.

Tabla nº41: Indicadores de mantenimiento.

INDICADOR	SIMBOLO	Sin RCT
Datos operativos promedio de una pala		
Horas Totales Calendarios	TT =	6935
Horas de Paradas Programadas	Dsch =	114
Horas Programadas	HP =	6821
Demoras Mecánicas	HDM =	204.6
Demoras Operativas	HDOP =	341.1
Demoras No Operativas	HDNOP =	613.9
Tiempo Operativo Efectivo	Ho =	5661.4

*horas de trabajo por día de pala 19 horas

*Horas por mantenimiento TM1 - Cada 250 horas - 8 horas de mantenimiento (al año 9 veces)

*Horas por mantenimiento TM2 - Cada 1000 horas - 10 horas de mantenimiento (al año 2 veces)

*Horas por mantenimiento TM3 - Cada 2000 horas - 22 horas de mantenimiento (al año 1 vez)

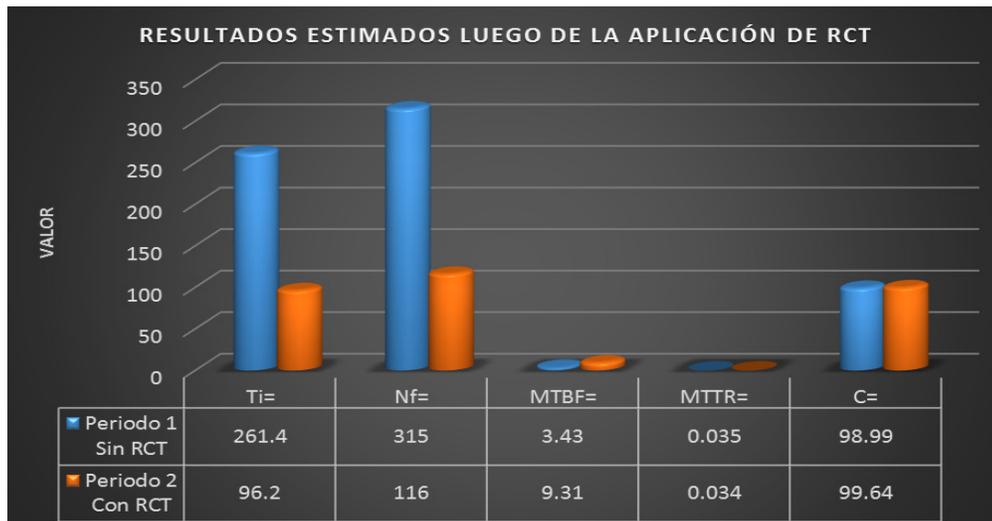
Elaborado: Tello Castro, G.; Espinoza Villaorduña, E.

Tabla n.º42. Resultados estimados luego de aplicación de sistema RCT.

INDICADOR	SIMBOLO	Periodo 1 Sin RCT	Periodo 2 Con RCT
Tiempo de Intervención	Ti =	261.4 horas	96.2 horas
Número de Fallas	Nf =	315	116
Tiempo Medio Entre Fallas	MTBF =	3.43	9.31
Tiempo Medio Para Reparar	MTTR =	0.035	0.034
Confiabilidad	C =	98.99%	99,64%

Elaborado: Tello Castro, G.; Espinoza Villaorduña, E.

Figura n° 19. Gráfica de comparativo de mejoras en Indicadores de mantenimiento.



Nota: - Valores mostrados de tiempo de inversión en Horas.

- Valores mostrados de confiabilidad en porcentaje.

Elaborado: Tello Castro, G.; Espinoza Villaorduña, E.

Productividad

Porcentaje de incremento de la producción

Este incremento de la producción se menciona en base al aumento de la confiabilidad de los equipos críticos identificados (ver Tabla n° 19). y en base a los datos de producción ya registrados en el año 2015 que fue de 3 818 000,00 Toneladas, producción obtenida sin la implementación de RCT.

Según la presente investigación la aplicación de RCT nos arrojaría para el año 2016 un mayor volumen de producción (3 843 070,21) con los mismos equipos (seis palas PC4000) y el mismo

periodo de tiempo (anual), este incremento de la producción sería de 25.070,21 Toneladas el cual representa un 0,65% mayor con respecto al año 2015 evidenciando un aumento en la productividad de dichas palas. (Ver tabla n. °43.)

Ingreso Económico

El Ingreso económico por el incremento de producción de concentrado de roca fosfórica al año 2016, tomando como referencia el año 2015 es de 2 883 074,05 dólares americanos. (Ver tabla n°43).

Tabla n. °43. Producción de roca fosfórica por año e incremento por nivel de productividad.

	2015	2016	
Producción Anual de Mineral y Desmonte	12,726.666,67	12.810.234,03	TON
Producción concentrado Roca Fosfórica	3.818.000,00	3.843.070,21	TON
Precio Internacional Roca Fosfórica	115,00	115,00	US\$/TON
Confiabilidad	98,99%	99,64%	
Producción adicional		25.070,21	TON
INCREMENTO POR NIVEL DE PRODUCTIVIDAD		2.883.074,05	US\$

Elaborado: Tello Castro, G.; Espinoza Villaorduña, E.

AHORRO ECONÓMICO EN ACEITE

Evaluación de pérdida de aceite hidráulico por fallas de lubricación.

Tabla n. °44. Datos de consumo de aceite Shell Tellus ISO 68

MES	PALA PC4000						Total
	PALA 1	PALA 2	PALA 3	PALA 4	PALA 5	PALA 6	
ENERO	465	757	352	565	340	23	2502
FEBRERO	653	344	1729	272	287.5	500	4345.5
MARZO	503	963.6	828	564	552	560	3410.6
ABRIL	656	425	549	303	392		2325
MAYO	1395	769	1655	339	330		4488
JUNIO	237	1196	757	235	71		2496
Total general	3909	4454.6	5870	2278	1972.5	1083	19651.1

Elaborado: Tello Castro, G.; Espinoza Villaorduña, E.

Capacidad del Tanque Hidráulico	1030	Gal
Periodo de cambio de aceite	3000	h
Consumo mínimo gal/h	0.3433	Gal/h
Tasa de Evaporación	0.1550	Gal/h
Consumo Teórico gal/h	0.4983	Gal/h

NOTA: Fórmulas de resultados obtenidos:

- **Capacidad del Tanque Hidráulico:** Dato del fabricante.
- **Periodo de cambio de aceite:** Recomendación de fabricante.
- **Consumo mínimo gal/h = (Capacidad del Tanque Hidráulico) / (Periodo de cambio de aceite)**
- **Tasa de Evaporación =** Data del Proveedor de lubricante.
- **Consumo Teórico gal/h: (Consumo mínimo gal/h) + (Tasa de Evaporación)**

Tabla n.º45. Horas acumuladas de operación de las palas.

HOROMETROS DE PALA PC4000 N°						
MES	PALA 1	PALA 2	PALA 3	PALA 4	PALA 5	PALA 6
ENERO (inicio)	28794	28532	28764	18457	18586	6685
ENERO	29276	29037	28955	18976	18595	6750
FEBRERO	29734	29388	29590	19479	19292	6900
MARZO	30356	29928	30192	20115	19870	6966
ABRIL	31011	30488	30814	20803	20113	6966
MAYO	31328	31021	31236	21444	20574	6966
JUNIO	31791	31548	31913	21847	20777	6966
Tiempo de Operación (h) x semestre)	2997	3016	3149	3390	2191	281

**Tasa de consumo Real = Consumo Real / Tiempo
operativo por cada pala**

Tasa de consumo Real gal/h	1.30	1.48	1.86	0.67	0.90	3.85
-------------------------------	------	------	------	------	------	------

**Tasa de consumo en exceso = Tasa de consumo Real
- Consumo Teórico**

Tasa Consumo en Exceso gal/h	0.806	0.979	1.366	0.174	0.402	3.36
---------------------------------	-------	-------	-------	-------	-------	------

**Consumo en Exceso = Tasa de Consumo en exceso * Tiempo
de operación.**

Consumo en Exceso (gal)	2415	2952	4301	589	881	943	12080
------------------------------------	------	------	------	-----	-----	-----	--------------

Elaborado: LUBEMAN PERÚ E.I.R.L y Tello Castro, G.; Espinoza Villaorduña, E.

Tabla n°46: Valorización de la pérdida anual de aceite hidráulico.

CONSUMOS DE PALA PC4000						
PALAS	1	2	3	4	5	6
Tasa de consumo Real Gal/h	1.30	1.48	1.86	0.67	0.90	
Tasa Consumo en Exceso Gal/h	0.806	0.979	1.366	0.174	0.402	
Consumo en Exceso Gal	2415	2952	4301	589	881	
Consumo Estimado en Exceso Semestral	11138	Gal				
Consumo Estimado en Exceso Anual	22276	Gal				

Costo de Aceite Hidráulico	850.0	US\$/55 Gal
-----------------------------------	--------------	-------------

Elaborado: LUBEMAN PERÚ E.I.R.L y Tello Castro, G.; Espinoza Villaorduña, E.

Trabajando la productividad a detalles de las PALAS PC4000 para mejorar de la producción de roca fosfórica aplicando RCT.

Tabla n.º47. Datos operativos promedio de una PALA PC4000.

ITEM	INDICADOR	SIMBOLO	Sin RCT
1	Total Horas Calendarías.	TT=	6935
2	Horas de Paradas Programadas.	Dsch=	114
3	Horas Programadas.	HP=	6821
4	Demoras Mecánicas.	HDM=	204.6
5	Demoras Operativas.	HDOP=	341.1
6	Demoras no Operativas.	HDNOP=	613.9
7	Tiempo Operativo Efectivo.	Ho=	5661.4

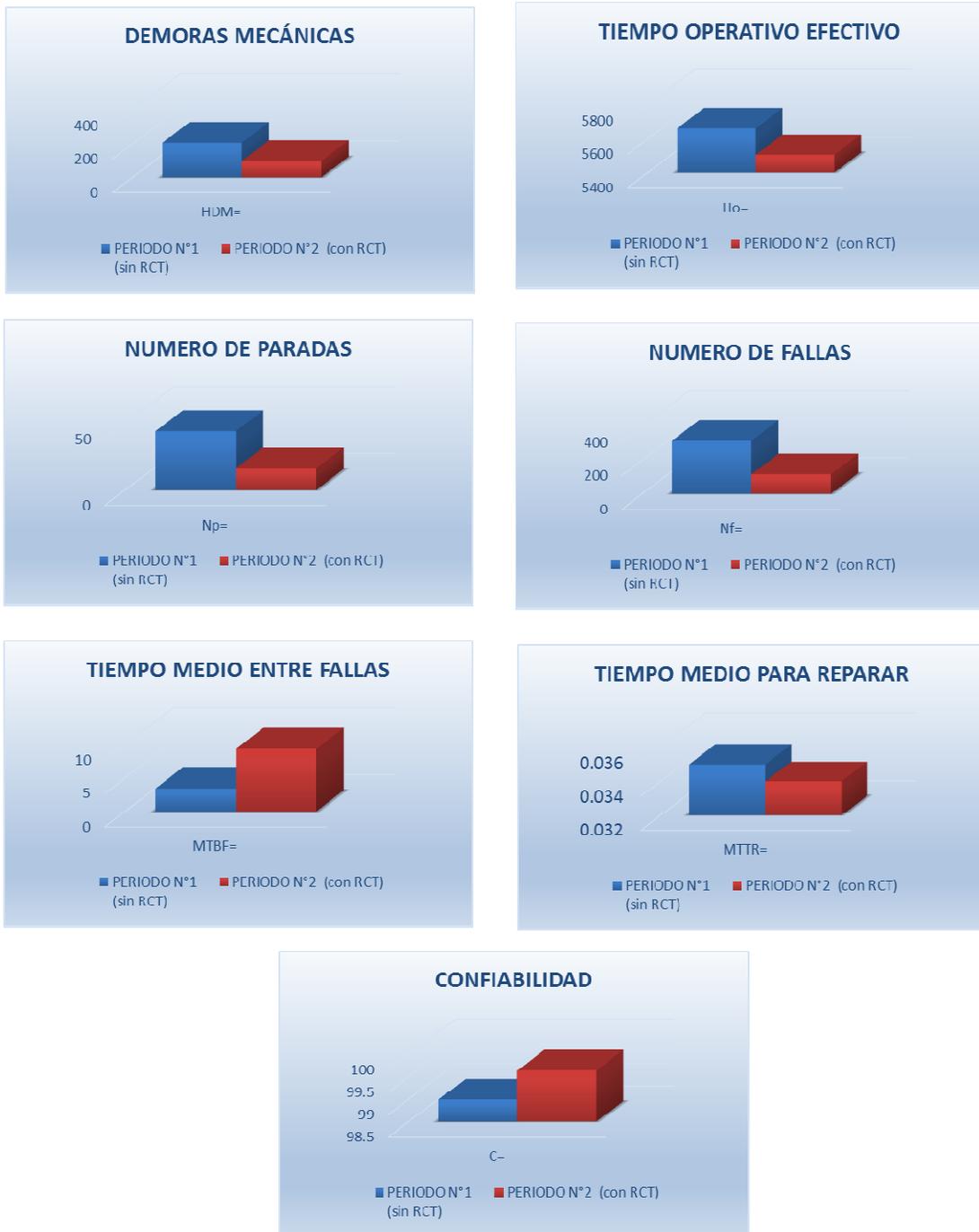
Elaborado: Tello Castro, G.; Espinoza Villaorduña, E.

Tabla n.º48. Resultados estimados de aplicación de sistema RCT.

	ITEM	INDICADOR	SIMBOLO	PERIODO N°1 Sin RCT	PERIODO N°2 Con RCT	VARIACIÓN %	DESCRIPCIÓN	RESULTADO
DATOS DE OPERACIÓN/FABRICANTE	1	Total de horas calendarías.	TT=	6935	6935		SE MANTIENE	
	2	Horas de Parada Programadas. ***MANTENIMIENTO RECOMENDADO POR FABRICANTE	Dsch=	114	114		SE MANTIENE	
	3	Horas Programadas .	HP=	6821	6821		SE MANTIENE	
	4	Demoras Operativas. ***ABASTECIMIENTO DE COMBUSTIBLE / ACEITE	HDOP=	341.1	341.1		SE MANTIENE	
	5	Demoras no Operativas. ***CAMBIO DE GUARDIA / CARGAS DE SEGURIDAD	HDNOP	613.9	613.9		SE MANTIENE	
INDICADORES DE MEJORA	6	Demoras Mecánicas.	HDM=	204.6	96.2	52.98%	SE REDUCE	POSITIVO
	7	Tiempo Operativo efectivo.	Ho=	5661.4	5769.8	1.91%	AUMENTA	POSITIVO
	8	Número de paradas.	Np=	44	16.2	63.18%	SE REDUCE	POSITIVO
	9	Número de fallas.	Nf=	315	116	63.17%	SE REDUCE	POSITIVO
	10	Tiempo medio entre fallas.	MTBF	3.43	9.31	171%	AUMENTA	POSITIVO
	11	Tiempo medio para reparar.	MTTR=	0.035	0.0034	90.29%	SE REDUCE	POSITIVO
	12	confiabilidad	C=	98.99%	99.64%	0.66%	AUMENTA	POSITIVO

Elaborado: Tello Castro, G.; Espinoza Villaorduña, E.

Figura nº 20: Gráfica de comparativo de mejoras en Indicadores de mantenimiento.



Elaborado: Tello Castro, G.; Espinoza Villaorduña, E.

Análisis de Inversión para aplicación de RCT

Inversión de equipos

Tabla n. °49. Costo total de equipos.

ITEM	DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS	CANTIDAD	P. UNIT \$	TOTAL \$
1	Contador de partículas de campo PAMAS.	3	\$8,500.0	\$25,500.0
2	Camión lubricador para palas.	1	\$200,000.0	\$200,000.0
3	Sistema de Microfiltrado KLEENOIL en tanque de lubricantes.	4	\$12,500.0	\$50,000.0
4	Test hidráulico STANFT con caudalímetro.	1	\$8,000.0	\$8,000.0
5	Equipo FLUSHING.	1	\$6,000.0	\$6,000.0
6	Dializadora de 400 gl para lubricantes usados.	2	\$5,000.0	\$10,000.0
TOTAL				\$299,500.0

Elaborado: Tello Castro, G.; Espinoza Villaorduña, E.

Instalación de equipos

Tabla n. °50. Costo de servicio de instalación.

ITEM	DESCRIPCIÓN DE INSTALACIÓN	CANTIDAD	P. UNIT \$	TOTAL \$
1	Contador de partículas de campo PAMAS.	0	\$0.0	\$0.0
2	Camión lubricador para palas.	0	\$0.0	\$0.0
3	Instalación de Sistema de Microfiltrado KLEENOIL en tanque de lubricantes.	4	\$600.0	\$2,400.0
4	Test hidráulico STANFT con caudalímetro.	0	\$0.0	\$0.0
5	Instalación de Equipo de FLUSHING.	1	\$800.0	\$800.0
6	Dializadora de 400 gl para lubricantes usados.	2	\$0.0	\$0.0
TOTAL				\$3,200.0

Elaborado: Tello Castro, G.; Espinoza Villaorduña, E.

Costos de operación y mantenimiento de equipos.

Tabla n.°51. Costo de servicio de mantenimiento.

ITEM	DETALLE DE SERVICIO	CANTIDAD	P. UNIT \$	TOTAL \$
1	Mantenimiento Contador de partículas de campo PAMAS	3	\$300.0	\$900.0
2	Mantenimiento de camión lubricador Incluye repuestos críticos	1	\$25,000.0	\$25,000.0
3	Cambio de elementos c/ 3 meses	16	\$620.0	\$9,920.0
4	Calibración c/2 años	1	\$0.0	\$0.0
5	Cambio de sellos motor y suministros	1	\$500.0	\$500.0
6	Cambio de filtros y mantenimiento	2	\$500.0	\$1,000.0
1	Servicio de análisis de aceite	144	\$13.0	\$1,872.0
2	Servicio de Operador de dializador y tomas de muestras de aceite para monitoreo	14	\$579.7	\$8,115.8
TOTAL				\$47,307.8

INVERSIÓN TOTAL PARA APLICACIÓN DE RCT	350,007.80	US\$	Aplicando RCT
---	-------------------	-------------	----------------------

Elaborado: Tello Castro, G.; Espinoza Villaorduña, E.

Resultado económico por incremento de productividad por aplicación de RCT

Tabla n.°52. 1 Resultado económico por productividad.

APLICANDO RCT EN 2016

Producción Adicional 2016	2 5070.21	TON
Precio de la roca fosfórica	115	US\$/TON
Incremento por nivel de Productividad (Subtotal)	2 883,074.15	US\$
Ahorro en aceite Anual	373,401.62	US\$
Inversión total para aplicación de RCT	350 007.80	US\$
PRODUCTIVIDAD (Total)	2 906,467.97	US\$

Elaborado: Tello Castro, G.; Espinoza Villaorduña, E.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS

Con la implementación del programa de tribología centrada en confiabilidad en la empresa minera MISKI MAYO de la ciudad de Piura en el año 2016 se han obtenido los siguientes resultados:

Incremento del Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) de los equipos de 3.43 días /falla por las seis palas a un valor de MTBF de 9.31 días /falla por las seis palas Komatsu PC4000.

El resultado indica que la compañía sin implementar un programa de tribología centrada en confiabilidad tenía una tasa de fallas de lubricación (paros no programados de los equipos) de 8.75 fallas al mes por cada pala, luego de la implementación tiene sólo 3.22 fallas al mes por cada pala Komatsu PC4000.

El resultado indica que la compañía sin implementar un programa de tribología centrada en confiabilidad tenía una confiabilidad mecánica de 98.99% y luego de la implementación tiene un 99.64% de confiabilidad mecánica.

La productividad de las palas PC4000 en el área de mantenimiento de la empresa MISKI MAYO ha mejorado debido a:

- El incremento de producción de concentrado de roca fosfórica en el año 2016 de 25 070,21 toneladas que representa un % de incremento del 0.65% con respecto al año 2015 (3 818 000 Toneladas al año 2015 sin RCT a 3 843 070,21 toneladas al año 2016 con RCT).
- Ingreso económico por el incremento de la producción de concentrado de roca fosfórica al año 2016, tomando como referencia el año 2015, que es de 2 883 074,05 dólares americanos.
- Ahorro económico en aceite de 344 265,45 dólares americanos por reducción de las fallas de lubricación.

Con los resultados obtenidos se ha cumplido con:

el objetivo general de implementar un programa de tribología centrada en confiabilidad para mejorar la productividad de las palas PC4000 en el área de mantenimiento de la minera MISKI MAYO en el año 2016.

Con los objetivos específicos de:

- Implementar un programa de tribología centrada en confiabilidad en la empresa minera MISKI MAYO.
- Incrementar el Tiempo Medio entre Fallas (MTBF) de los equipos.
- Minimizar la generación de paros no programados de los equipos.
- Mejorar la productividad.

Por lo tanto, de esta manera se demuestra la validez de la hipótesis, que con la implementación de un programa de tribología centrada en confiabilidad en los equipos de palas PC4000 en el área de mantenimiento de la minera MISKI MAYO en el año 2016, se mejorará la productividad en la empresa minera MISKI MAYO.

CAPÍTULO 7. DISCUSIÓN

Esta investigación tuvo como propósito identificar y describir aquellos factores que causan las fallas por lubricación asociado a los procesos tribológicos como son los modos de falla, las funciones de lubricación para cada modo de falla y los efectos de los modos falla que inciden en los bajos niveles de disponibilidad, alto consumo de lubricantes, reiteradas fallas de lubricación, paradas inesperadas, desgaste acelerado de los equipos traducándose en menores ingresos económicos para la empresa minera MISKI MAYO.

Como se puede observar en la matriz FMEA los eventos que más se han desarrollado o tienen el potencial de desarrollarse son aquellos relacionados a la contaminación por partículas sólidas en el lubricante el cual puede traer efectos de diversa naturaleza como desgaste de sellos y fugas, desgaste abrasivo, entre otros.

De los resultados obtenidos en esta investigación, afirmamos que se puede incrementar el tiempo medio entre fallas desde 3.43 días/falla hasta los 9.31 días /falla; así también disminuir el tiempo medio para reparar desde 0.035 días/falla hasta los 0.034 días /falla y lo que es muy importante el logro del incremento de la confiabilidad mecánica que logra aumentar en 0.65 % lo que es en el ámbito del mantenimiento un logro muy significativo.

En esta investigación sólo se aplicó la implementación del programa de tribología centrada en confiabilidad en seis (06) equipos críticos de la flota de equipos de la minera MISKI MAYO de la ciudad de Piura.

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos se ha cumplido con el objetivo general de implementar un programa de tribología centrada en confiabilidad para mejorar la productividad de las palas PC4000 en el área de mantenimiento de la minera MISKI MAYO en el año (2016) logrando detectar fallos incipientes antes que constituyan en fallos mayores, reduciendo su incidencia (ocurrencia).

Se demuestra la validez de la hipótesis, que con la implementación de un programa de tribología centrada en confiabilidad en los equipos se mejora productividad de las palas PC 4000 en el área de mantenimiento de la minera MISKI MAYO.

Los resultados indican que la compañía sin implementar un programa de tribología centrada en confiabilidad tenía un incremento de producción de 12,726.666,67 TON y luego de la implementación tiene 12,810.234,03 TON

El resultado económico final por incremento de la productividad y la reducción de fallas de lubricación en las palas PC 4000 de la empresa minera MISKI MAYO al año 2015 es de dos millones ochocientos setenta y siete mil trescientos setenta y siete con 70/100 dólares americanos (U\$\$ 2 877 377,70).

CAPÍTULO 9. RECOMENDACIONES

Continuar con la implementación del programa de tribología centrada en confiabilidad en los demás equipos críticos y semicríticos de la minera MISKI MAYO de la Ciudad de Piura.

Se recomienda a Minera MISKI MAYO realizar una auditoría de lubricación para que logre identificar las oportunidades de mejora de la lubricación a través de inspecciones trimestrales por medio de la revisión de la metodología actual de sus prácticas de lubricación.

Adicionalmente se sugiere a ingenieros y técnicos de diversas disciplinas que desarrollen y adquieran habilidades en el campo de la tribología y la lubricación a fin de ir cerrando la brecha que existe entre la industria y la poca difusión de los centros de enseñanza superior para contrarrestar los dañinos efectos que tienen la mala o nula aplicación de prácticas de lubricación. Esto sin duda es una oportunidad a la comunidad académica para diseñar e implementar la base de conocimiento necesaria en formar personal idóneo y multidisciplinario en un campo muy poco aplicado como es la tribología y el mantenimiento centrado en la confiabilidad.

Se recomienda igualmente por medio del presente a la Minera MISKI MAYO a formar entre su personal a líderes en el campo de la tribología y el mantenimiento centrado en confiabilidad que actúen en forma proactiva diseñando programas de control de la contaminación fluida, que rediseñen sus programas de análisis de aceites y también implemente programas de gestión de lubricación para medir los indicadores que le permitan mejorar continuamente su desempeño en los niveles de disponibilidad, mantenibilidad y confiabilidad exigidos en una operación minera de gran envergadura.

CAPÍTULO 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Moubray, Jhon (s/a). RCM II

Vicuña, F. (2009). *Diseño e Implementación de un efectivo programa de análisis de aceites para el mantenimiento de maquinarias minero industriales*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.

Páramo, J. (noviembre,2012). *Tribología Centrada en Confiabilidad, RCT. XIV*. Congreso de Confiabilidad, España.

Castañeda, V. (2006). *Metodología para integrar la tecnología del análisis de aceite a los programas de mantenimiento predictivo en sistemas hidráulicos de potencia*. (Tesis de Maestría). Instituto Politécnico nacional, Querétaro.

Reliability web. *Control de Contaminación en Sistemas hidráulicos y lubricantes*. Recuperado de <http://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/control-de-contaminacion-en-sistemas-hidraulicos-y-lubricantes>

Páez A. (20 de agosto de 2014) *El proceso FMEA para las fallas de lubricación*". Noria Latín América. Recuperado de <http://noria.mx/lublearn/el-proceso-fmea-para-las-fallas-de-lubricacion/>

Cajas, C. (2008). Realizó un trabajo de grado titulado "*Automatización del análisis de modos de falla y efectos FMEA en la ingeniería de mantenimiento aplicado para la industria ecuatoriana*" (Tesis para optar al título de Ingeniero mecánico). Escuela Politécnica Nacional del Ecuador. Recuperado de [http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/889/1/CD-1771\(2008-11-05-11-33-01\).pdf](http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/889/1/CD-1771(2008-11-05-11-33-01).pdf)

Pérez, E. (2010). *Diseño de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad (MCC) para una paletizadora de sacos de cemento*. (Tesis para optar al título de Ingeniero mecánico). Universidad de Oriente, Venezuela. Recuperado de <http://ri.biblioteca.udo.edu.ve/bitstream/123456789/3101/1/35-TESIS.IM010P63.pdf>

RCT® – RELIABILITY CENTERED TRIBOLOGY. Recuperado de http://appliancegnosis.com/wpcontent/uploads/2012/02/Techgnosis_Art%C3%ADculo-RCT.pdf

KOMATSU PC4000. Recuperado de
<http://www.komatsu.com.au/Specification%20Library/Face%20Shovels/PC4000/PC4000-6.pdf>

Tribología centrada en confiabilidad. Recuperado de
http://aplitechgnosis.com/wpcontent/uploads/2012/02/Techgnosis_Art%C3%ADculo-RCT.pdf

Córdova, C. (2005). *Implantación del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) a los hornos convertidores Peirce Smith de la fundición de cobre de Souther Perú Copper Corporation*". (Tesis para optar al Título de Ingeniero Mecánico) Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.
Recuperado de
https://www.google.com.pe/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahukewjwil7tqm_pahxcrcykhascaywqfggimae&url=http%3a%2f%2fcybertesis.uni.edu.pe%2fbitstream%2funi%2f744%2f1%2fcordova_mc.pdf&usq=afqjcnf96qx2g-iig6toh9niqtc1anezsa

Costa, M. (2010). *Aplicación del mantenimiento centrado en la confiabilidad a motores a gas de dos tiempos en pozos de alta producción*. (Tesis para optar al Título de Ingeniero Mecánico). Pontificia Universidad Católica, Perú. Recuperado de
http://tesis.pucp.edu.pe:8080/repositorio/bitstream/handle/123456789/567/DA_COSTA_BURGA_M_ART%C3%8DN_MANTENIMIENTO_MOTORES_GAS.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

CAPÍTULO 11. ANEXOS

ANEXO 1. ESPECIFICACIONES DE LAS PALAS PC4000 KOMATSU



DIESEL DRIVE

Model..... Komatsu SDA16V160E-2 Tier 2
 Type.....Water-cooled, 4-cycle, direct injection
 Aspiration..... Turbocharged and aftercooled
 Number of cylinders..... 16
 Rated power 1400 kW **1875 HP**
 SAE J1995 (Gross)
 Rated rpm..... 1800
 Governor..... All-speed control, electronic
 The integrated engine oil and filter system combining the oil stabilizing systems, Reserve and Sentinel, with Eliminator oil filter extends the oil change interval up to 4000 hours based on oil analysis. The high capacity Mesabi engine radiators are cooled by a hydraulically driven fan for superior cooling efficiency.



HYDRAULIC SYSTEM

The power train consists of one main drive. One gearbox drives four identical pumps which draw hydraulic oil from an unpressurized hydraulic tank. Open circuit hydraulics provide maximum cooling and filtering efficiency.
 Rated flow (total output)..... 4140 ltr/min **1,096 gal/min**
 Relief valve setting 310 bar **4,495 psi**
 Swing flow rate..... 1590 ltr/min **420 gal/min**
 High pressure in line filters 200 microns
 one per pump located at the valve blocks
 Full flow return line filters (4 elements) 10 microns
 at head of hydraulic tank
 Case drain/by-pass return line filters 3 microns
 The four-circuit system features a load-limiting governor with oil delivery summation to the working circuits and incorporates pressure cut-off control. Hydro-pilot prioritizes hydraulic flow giving smooth hydraulic response, simple hydraulic system layout, and a reduced number of components. The hydraulic system includes large swing-out vertical air-to-oil hydraulic coolers with temperature regulated hydraulically driven fans.



TRAVEL AND BRAKE SYSTEMS

Travel control..... 2 foot pedals
 Gradeability..... Up to 50%
 Maximum travel speed..... 2.1 km/h **1.3 mph**
 Service brake.....Hydraulic brake
 Parking brake..... Wet multiple-disc brake



SWING SYSTEM

Hydraulic motors and drives 2
 Swing brake, service.....Hydraulic brake
 Swing brake, parking Wet multiple-disc
 Swing ring teeth External
 Swing speed (maximum) 4.0 rpm



UNDERCARRIAGE

Undercarriage consists of one center carbody and two track frames, each side attached by high torque bolts.
 Center frame..... H-type
 Track frame..... Steel box-section



CRAWLER ASSEMBLY

Track adjustment Automatic hydraulic type
 Number of track shoes (each side) 49
 Number of top rollers (each side)..... 3
 Number of bottom rollers (each side)..... 7



ELECTRIC SYSTEM (DIESEL VERSION)

System 24 V
 Batteries (series/parallel) 2 x 3 x 12 V
 Alternator 260 A
 Standard working lights 14 Xenon lights
 Standard service lights throughout platform



ELECTRIC SYSTEM (ELECTRIC VERSION)

System 24 V
 Batteries (series/parallel) 2 x 2 x 12 V
 Standard working lights 14 Xenon lights
 Standard service lights throughout platform



ELECTRIC DRIVE

Type Squirrel-cage induction motor
 Power output 1350 kW
 Voltage 6,000 – 7,200 V*
 Amperage (approximate) 145 A – 120 A
 Start-up..... Soft start
 Frequency standard 60 Hz @ 1800 rpm
 Frequency option 50 Hz @ 1500 rpm
 * Other voltages available on request



AUTOMATIC CENTRALIZED LUBRICATION

Two hydraulically powered Lincoln single line automatic lubrication systems are provided as standard, complete with time and volume variable controls. The central lube grease system is supplied from a refillable 200 liter **53 gal** barrel. A second, identical system supplies open gear lubricant to the swing ring teeth through a lube pinion. Replenishment of the containers is through the Wiggins connections on the service arm.



SERVICE CAPACITIES

Hydraulic oil tank..... 3900 ltr **1,030 U.S. gal**
 Hydraulic system..... 5900 ltr **1,559 U.S. gal**
 Fuel..... 6400 ltr **1,691 U.S. gal**
 Engine coolant..... 475 ltr **125 U.S. gal**
 Engine oil 290 ltr **77 U.S. gal**
 Reserve engine oil make up tank..... 460 ltr **122 U.S. gal**

ANEXO 2. LA ROCA FOSFÓRICA

La International Fertilizer Association (IFA) asegura que la mayoría de plantas requiere de 16 nutrientes esenciales para garantizar un adecuado crecimiento y desarrollo. Asimismo, cada nutriente cumple un rol específico en el crecimiento de las plantas y el rendimiento de los suelos. Por otro lado, cada suelo reúne características únicas debido a la influencia de diversas condiciones climáticas alrededor del mundo. Por consiguiente, en muy pocas ocasiones se encuentran presentes todos los nutrientes esenciales en un suelo y es por eso que se requiere el uso de fertilizantes que contengan nitrógeno, fósforo y potasio para corregir las deficiencias.

El fósforo es un macronutriente vital en la transferencia de energía, la fotosíntesis y la división de células. Asimismo, su aporte es esencial para el crecimiento de las plantas ya que promueve tanto el desarrollo de la raíz como la resistencia a las sequías. La gran mayoría de suelos naturales y agrícolas son deficientes en fósforo y, por lo tanto, requieren de la aplicación de fertilizantes que contengan dicho elemento al menos una vez al año.

La roca fosfórica es la principal fuente de fósforo, el cual aparece en forma de fosfato tricálcico. La composición química y física de una roca fosfórica es definida por la formación geológica del yacimiento, las condiciones climáticas a las que ha sido expuesto el mineral, los contaminantes del suelo, entre otras variables. Asimismo, esta composición determina la calidad de la roca y la aceptación de la misma en el mercado internacional.

Si bien las reservas globales de roca fosfórica son amplias, su explotación no siempre resulta económicamente viable. En la actualidad, resulta difícil encontrar grandes yacimientos de roca fosfórica de alta ley con infraestructura disponible y de fácil acceso.

Históricamente la roca fosfórica de Bayóvar ha sido mundialmente conocida por su buen contenido de P_2O_5 , su alta solubilidad y su bajo nivel de impurezas. Esto la posiciona como una roca fácilmente comercializable en el mercado internacional.

EL MERCADO DE LA ROCA FOSFÓRICA

La industria de fertilizantes consume en promedio el 80% de la producción global de roca fosfórica. Asimismo, dentro de esta industria, la mayor parte de roca se utiliza como materia prima en la fabricación de ácido fosfórico que permite la producción de fertilizantes tales como: Fosfato Diamónico (DAP), Fosfato Monoamónico (MAP), Nitrofosfatos, Superfosfato Triple (TSP) y para el tratamiento de tierras ácidas (fertilizante de aplicación directa).

También se produce Superfosfato Simple (SSP) usando como materia prima la roca fosfórica y ácido sulfúrico. En consecuencia, la demanda de roca fosfórica depende en gran medida de los factores que afectan la demanda de los fertilizantes de fosfatos.

Por otra parte, el mercado de roca fosfórica concentra su producción en pocos países. Es así que los principales cinco países productores concentran el 80% de la producción global.

Sin embargo, mientras que países como Rusia y Marruecos tienen sólo una o dos importantes empresas productoras, EE.UU. y China poseen un mayor número de empresas productoras.

ANEXO 3. ANÁLISIS DE MODO Y EFECTO DE FALLA DE LUBRICACIÓN EN PALAS PC4000

ANALISIS DE MODO Y EFECTO DE FALLA DE LUBRICACIÓN (FMEA)

Sistema: Sistema Hidráulico

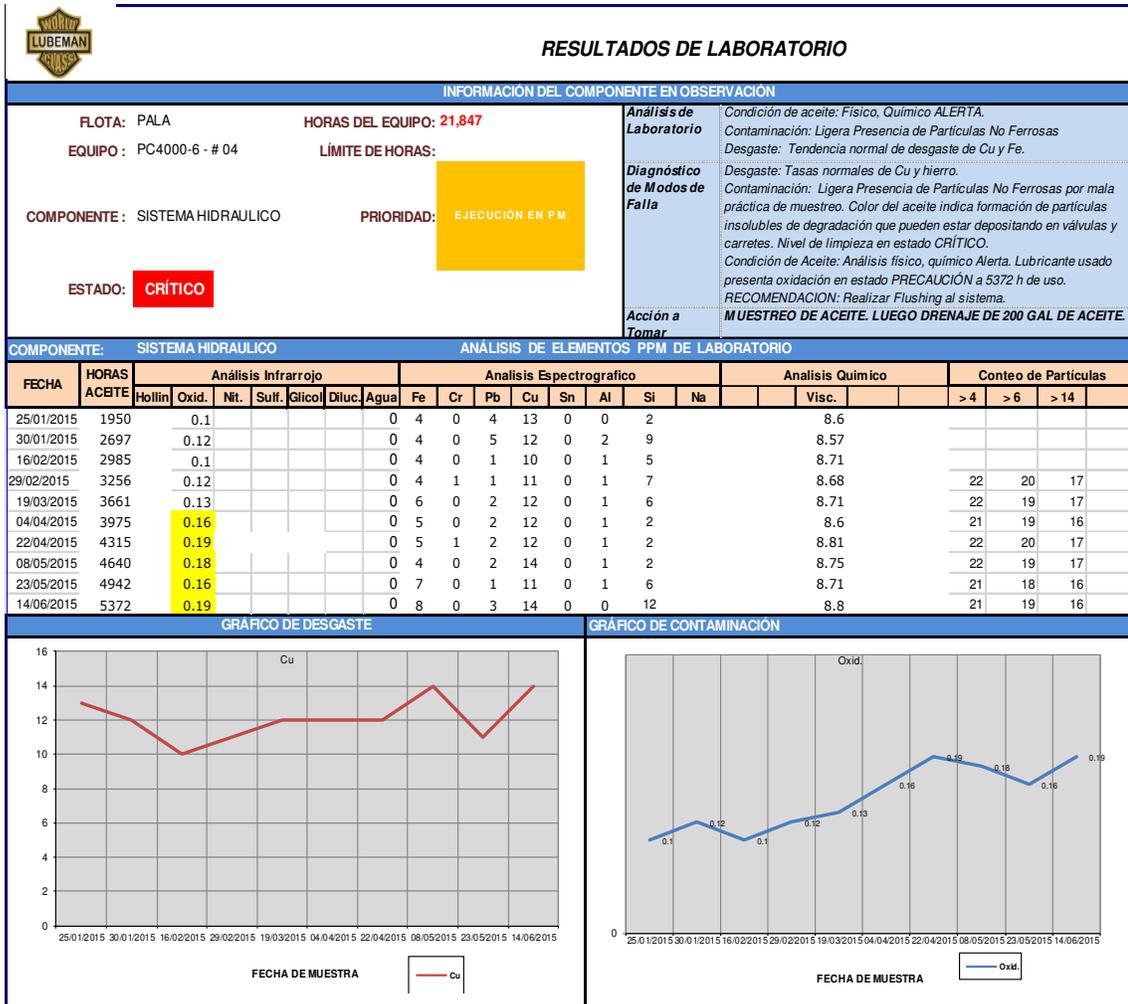
Fecha 10/05/2016

Efectuado por: Tello Castro Guadalupe / Espinoza Villaorduña Edwin

		FUNCIONES DE LA LUBRICACIÓN					
		Control de la Fricción	Control del desgaste	Control de la corrosión	Control de la temperatura	Control de la contaminación	Transmisión de potencia
MECANISMO DE FALLA DE LUBRICACIÓN	Disminución repentina del nivel de lubricante	X	X		X		X
	No rellenar lubricante	X	X		X		X
	Bajo nivel de lubricante	X	X		X		
	Lubricante degradado	X		X	X		X
	Contaminación con partículas		X			X	
	Contaminación con humedad		X	X			
	Agotamiento de aditivos	X	X	X			
	Entrada de aire			X	X		X
	Espuma			X	X		X

COMENTARIOS

ANEXO 4. ANÁLISIS DE ACEITE HIDRÁULICO EN PALA PC4000-04



Fuente: Reporte proporcionado por Lubeman Laboratorios.

ANEXO 5. CUADROS DE EVENTOS DE FALLA DE LUBRICACIÓN EN PALAS PC4000-04

MODELO DE EQUIPO	PALA HIDRÁULICA
FLOTA DE EQUIPO	PC4000
COMPARTIMIENTO	SIST. HIDRÁULICO
EVENTO	RELLENO EN CAMPO
TIPO DE LUBRICANTE	TELLUS 68
UNIDAD	GLN

FECHA	MES	FLOTA DE EQUIPO	N° DE EQ	HORAS	Vol Gal	MOTIVO
01/01/2014	ENERO	PC4000	4	18457	130	Se rellenó por fuga
04/01/2015	ENERO	PC4000	4	18515	30	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
04/01/2015	ENERO	PC4000	2	28532	150	Se rellenó por fuga en manguera suelta de Manifold de retorno.
05/01/2015	ENERO	PC4000	4	18535	40	Se rellenó por ruptura en manguera hidráulica
06/01/2015	ENERO	PC4000	1	28794	40	SE RELLENÓ POR BAJO NIVEL
07/01/2015	ENERO	PC4000	3		5	Bajo nivel de aceite en el tanque de Hidráulico
08/01/2015	ENERO	PC4000	2	28609	75	Se rellenó por fuga de enfriador del aceite hidráulico
08/01/2015	ENERO	PC4000	1	28823	48	Se rellenó por fuga de enfriador del aceite hidráulico
09/01/2015	ENERO	PC4000	4	18622	65	Se rellenó por fuga del enfriador del hidráulico
09/01/2015	ENERO	PC4000	2		37	Bajo nivel por cambio de manguera
11/01/2015	ENERO	PC4000	1	28889	45	Se rellenó por fuga de enfriador del aceite hidráulico
13/01/2015	ENERO	PC4000	2	28713	120	Se rellenó por fuga
13/01/2015	ENERO	PC4000	4		20	SE RELLENÓ POR BAJO NIVEL
14/01/2015	ENERO	PC4000	4	18741	100	Se rellenó por fuga
15/01/2015	ENERO	PC4000	1	28973	60	Se rellenó por fuga en manguera hidráulica
16/01/2015	ENERO	PC4000	3	28764	50	Bajo nivel de aceite en el tanque de Hidráulico
17/01/2015	ENERO	PC4000	2	28786	35	Se rellenó por fuga
18/01/2015	ENERO	PC4000	3	28810	36	Bajo nivel de aceite en el tanque de Hidráulico
18/01/2015	ENERO	PC4000	4	18821	40	SE RELLENÓ POR BAJO NIVEL
18/01/2015	ENERO	PC4000	3	28819	60	Bajo nivel de aceite en el tanque de Hidráulico
18/01/2015	ENERO	PC4000	5	18586	160	Bajo nivel por fuga.
19/01/2015	ENERO	PC4000	1	29057	80	Se rellenó por fuga en manguera hidráulica
19/01/2015	ENERO	PC4000	2	28798	138	Se rellenó por fuga
19/01/2015	ENERO	PC4000	5	18592	60	Bajo nivel por fuga.
20/01/2015	ENERO	PC4000	4	18862	40	SE RELLENÓ POR BAJO NIVEL

20/01/2015	ENERO	PC4000	5	18595	60	Bajo nivel por fuga.
21/01/2015	ENERO	PC4000	1	29096	20	SE RELLENÓ POR BAJO NIVEL
22/01/2015	ENERO	PC4000	3	28899	50	Bajo nivel de aceite en el tanque de Hidráulico
22/01/2015	ENERO	PC4000	1	29119	44	SE RELLENÓ POR BAJO NIVEL
24/01/2015	ENERO	PC4000	2	28898	40	Se rellenó por bajo nivel
26/01/2015	ENERO	PC4000	1	29179	48	Se rellenó por bajo nivel
26/01/2015	ENERO	PC4000	3		50	Bajo nivel de aceite en el tanque de Hidráulico
26/01/2015	ENERO	PC4000	5		60	Bajo nivel por fuga.
27/01/2015	ENERO	PC4000	2	28952	73	Se rellenó por fuga
27/01/2015	ENERO	PC4000	3	28955	101	Se rellenó por fuga
27/01/2015	ENERO	PC4000	6		23	Se rellenó aceite por bajo nivel
29/01/2015	ENERO	PC4000	4	18976	100	SE RELLENÓ POR BAJO NIVEL
30/01/2015	ENERO	PC4000	1	29276	80	Se rellenó por bajo nivel
31/01/2015	ENERO	PC4000	2	29037	89	Se rellenó por fuga de manguera hidráulica
01/02/2015	FEBRERO	PC4000	2	29057	48	Se rellenó por fuga de manguera hidráulica
01/02/2015	FEBRERO	PC4000	1	29315	46	Se rellenó por bajo nivel
02/02/2015	FEBRERO	PC4000	3	29080	50	Se rellenó por fuga
02/02/2015	FEBRERO	PC4000	3	29083	40	Se rellenó por fuga
02/02/2015	FEBRERO	PC4000	3	29092	18	Se rellenó por fuga
03/02/2015	FEBRERO	PC4000	3	29099	15	Se rellenó por fuga en tapa Spool número 2
03/02/2015	FEBRERO	PC4000	1	29359	35	Se releno por cambio de manguera de pilotaje de sistema de flotacion de Boom
03/02/2015	FEBRERO	PC4000	2	29110	49	Se rellenó por cambio de Oring de tapa de Spool de bloque principal IV
04/02/2015	FEBRERO	PC4000	3	29120	30	Se rellenó por fuga en manguera hidráulica de cilindro de Bucket
05/02/2015	FEBRERO	PC4000	2	29139	35	Se rellenó por fuga
06/02/2015	FEBRERO	PC4000	6	6966	550	Se llenó tellus 68 por cambio programado y horas de aceite
06/02/2015	FEBRERO	PC4000	6	6966	148	Se llenó tellus 68 por cambio programado y horas de aceite
07/02/2015	FEBRERO	PC4000	3	29194	40	Se rellenó por fuga
07/02/2015	FEBRERO	PC4000	6	6966	342	Se llenó tellus 68 por cambio programado y horas de aceite
08/02/2015	FEBRERO	PC4000	2	29200	57	Se rellenó por fuga
08/02/2015	FEBRERO	PC4000	3	29215	60	Se rellenó por fuga
09/02/2015	FEBRERO	PC4000	2	29220	25	Se rellenó por fuga en manguera hidráulica
09/02/2015	FEBRERO	PC4000	4	19203	50	SE RELLENÓ POR BAJO NIVEL
09/02/2015	FEBRERO	PC4000	3	29235	35	Se rellenó por fuga
09/02/2015	FEBRERO	PC4000	1	29475	50	Se rellenó por fuga

10/02/2015	FEBRERO	PC4000	5		65	Se rellenó por bajo nivel
10/02/2015	FEBRERO	PC4000	5	19028	100	Se rellenó por bajo nivel
11/02/2015	FEBRERO	PC4000	5	19030	30	Se rellenó por bajo nivel
11/02/2015	FEBRERO	PC4000	3		28	Se rellenó por bajo nivel
11/02/2015	FEBRERO	PC4000	3	29251	103	Se rellenó por bajo nivel
11/02/2015	FEBRERO	PC4000	4		31	SE RELLENÓ POR BAJO NIVEL
12/02/2015	FEBRERO	PC4000	3	29271	30	Se rellenó por bajo nivel
13/02/2015	FEBRERO	PC4000	6		20	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
14/02/2015	FEBRERO	PC4000	3	29306	91	Se rellenó por fuga
15/02/2015	FEBRERO	PC4000	2	29298	44	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
16/02/2015	FEBRERO	PC4000	2	29325	30	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
16/02/2015	FEBRERO	PC4000	1	29630	66	Se rellenó por bajo nivel
16/02/2015	FEBRERO	PC4000	3	29352	41	Se rellenó por bajo nivel
16/02/2015	FEBRERO	PC4000	5	19143	20	Se rellenó por bajo nivel
17/02/2015	FEBRERO	PC4000	4	19360	35	SE RELLENÓ POR BAJO NIVEL
17/02/2015	FEBRERO	PC4000	4	19375	31	SE RELLENÓ POR BAJO NIVEL
17/02/2015	FEBRERO	PC4000	3	29373	50	Se rellenó por fuga
18/02/2015	FEBRERO	PC4000	1	29659	25	Se rellenó por bajo nivel
18/02/2015	FEBRERO	PC4000	1	29661	27	Se rellenó por bajo nivel
18/02/2015	FEBRERO	PC4000	3	29396	23	Se rellenó por fuga
19/02/2015	FEBRERO	PC4000	5	19193	22.5	Se rellenó por bajo nivel
20/02/2015	FEBRERO	PC4000	3	29429	25	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
20/02/2015	FEBRERO	PC4000	2	29388	56	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
20/02/2015	FEBRERO	PC4000	3	29437	79	Se rellenó por fuga por manguera
22/02/2015	FEBRERO	PC4000	1	29734	75	Se rellenó por bajo nivel
22/02/2015	FEBRERO	PC4000	3		114	Se rellenó por fuga por manguera
23/02/2015	FEBRERO	PC4000	3	29490	65	Se rellenó por fuga de niple de bomba
23/02/2015	FEBRERO	PC4000	3	29504	113	Se rellenó por fuga de niple de bomba
24/02/2015	FEBRERO	PC4000	5	19292	50	Se rellenó por bajo nivel
24/02/2015	FEBRERO	PC4000	4	19479	60	SE RELLENÓ POR BAJO NIVEL
24/02/2015	FEBRERO	PC4000	1		89	Se rellenó por fuga
24/02/2015	FEBRERO	PC4000	3		193	Se rellenó por fuga de niple de bomba
25/02/2015	FEBRERO	PC4000	3	29547	120	Se rellenó aceite por fugas en mangueras hidráulicas
26/02/2015	FEBRERO	PC4000	3	29561	113	Se rellenó aceite por fugas en mangueras hidráulicas
27/02/2015	FEBRERO	PC4000	3	29589	120	Se rellenó aceite por fugas en mangueras hidráulicas
28/02/2015	FEBRERO	PC4000	3	29590	133	Se rellenó aceite hidráulico por cambio de componentes

28/02/2015	FEBRERO	PC4000	1		240	Se rellenó por fuga de manguera en la sala de bomba
28/02/2015	FEBRERO	PC4000	4		65	Se rellenó por fuga en el cilindro del Clan
01/03/2015	MARZO	PC4000	4	19574	200	Se rellenó por fuga de manguera rota del cilindro del Clan.
01/03/2015	MARZO	PC4000	2	29465	150	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
02/03/2015	MARZO	PC4000	2	29465	111	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
02/03/2015	MARZO	PC4000	2	29465	20	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
02/03/2015	MARZO	PC4000	1	29911	45	Se rellenó por bajo nivel
03/03/2015	MARZO	PC4000	5	19447	40	Se rellenó por bajo nivel
03/03/2015	MARZO	PC4000	1	29915	25	Se rellenó por bajo nivel
05/03/2015	MARZO	PC4000	2	29510	70	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
05/03/2015	MARZO	PC4000	5	19497	25	Se rellenó por bajo nivel
05/03/2015	MARZO	PC4000	3	29711	35	Se rellenó aceite hidráulico por bajo nivel
06/03/2015	MARZO	PC4000	4	19688	17	Se rellenó por fuga de manguera rota del cilindro del Clan.
07/03/2015	MARZO	PC4000	3	29738	75	Se rellenó por fuga en tapa de Spool del bloque de válvulas de control # 04.
08/03/2015	MARZO	PC4000	2	29544	25	Se rellenó por fuga en cañería hidráulica del bloque de control # 3 correspondiente al implemento del Bucket
08/03/2015	MARZO	PC4000	3	29750	28	Se rellenó por fuga en tapa de Spool del bloque de válvulas de control # 04.
09/03/2015	MARZO	PC4000	1	30020	40	Se rellenó por fuga rotura en mangueras del sistema.
09/03/2015	MARZO	PC4000	1	30025	124	Se rellenó por fuga rotura en mangueras del sistema.
09/03/2015	MARZO	PC4000	4	19744	37	Se rellenó por fuga de manguera rota del cilindro del Clan.
10/03/2015	MARZO	PC4000	3	29811	46	Se rellenó por fuga en tapa de Spool del bloque de valvulas de control # 04.
11/03/2015	MARZO	PC4000	1	30072	20	Se rellenó por fuga rotura en mangueras del sistema.
11/03/2015	MARZO	PC4000	4	19783	30	Se rellenó por fuga de manguera rota del cilindro del Clan.
11/03/2015	MARZO	PC4000	2	29615	60	Se rellenó por fuga en cañeria hidráulica del bloque de control # 3 correspondiente al implemento del Bucket
12/03/2015	MARZO	PC4000	5	19645	60	Se rellenó por bajo nivel
12/03/2015	MARZO	PC4000	4	19801	35	Se rellenó por fuga de manguera rota del cilindro del Clan.
13/03/2015	MARZO	PC4000	5	19656	49	Se rellenó por bajo nivel
13/03/2015	MARZO	PC4000	5	19656	71	Se rellenó por fuga en cuerpo de manguera de Bucket (accionamiento) lado Rh.
14/03/2015	MARZO	PC4000	1	30116	50	Se rellenó por fuga
14/03/2015	MARZO	PC4000	4	19843	120	Se rellenó por fuga de manguera rota del cilindro del Clan.
14/03/2015	MARZO	PC4000	2	29677	160	Se rellenó aceite por rotura de manguera hidráulica.
15/03/2015	MARZO	PC4000	3	29904	58	Se rellenó por fuga en manguera hidráulica.
16/03/2015	MARZO	PC4000	2	29700	45	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección

16/03/2015	MARZO	PC4000	4		30	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
17/03/2015	MARZO	PC4000	4	19890	15	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
19/03/2015	MARZO	PC4000	2	29746	75	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
20/03/2015	MARZO	PC4000	5		36	Se rellenó por fuga en cuerpo de manguera de Bucket (accionamiento) lado Rh.
21/03/2015	MARZO	PC4000	2		35	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
21/03/2015	MARZO	PC4000	3	30016	50	Se rellenó por rotura de manguera hidráulica
22/03/2015	MARZO	PC4000	3	30011	85	Se rellenó por fuga
22/03/2015	MARZO	PC4000	3	30012	20	Se rellenó por fuga
22/03/2015	MARZO	PC4000	3	30013	110	Se rellenó por rotura de manguera hidráulica
22/03/2015	MARZO	PC4000	4	20008	10	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
20/03/2015	MARZO	PC4000	5	19802	80	Se rellenó por fuga en manguera hidráulica
22/03/2015	MARZO	PC4000	2		76	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
22/03/2015	MARZO	PC4000	3		68	Se rellenó por rotura de manguera bomba
23/03/2015	MARZO	PC4000	1	30289	37	Se rellenó por fuga
23/03/2015	MARZO	PC4000	3	30026	10	Se rellenó por rotura de manguera bomba
23/03/2015	MARZO	PC4000	2	29807	76.6	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
24/03/2015	MARZO	PC4000	5	19870	38	Se rellenó por fuga en manguera hidráulica
24/03/2015	MARZO	PC4000	3		60	Se rellenó por rotura de manguera bomba
24/03/2015	MARZO	PC4000	4	20040	30	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
26/03/2015	MARZO	PC4000	1	32356	30	Se rellenó por fuga
26/03/2015	MARZO	PC4000	5		80	Se rellenó por fuga en cuerpo de manguera hidráulica
27/03/2015	MARZO	PC4000	3	30095	125	Se rellenó por rotura de manguera bomba
27/03/2015	MARZO	PC4000	4	20115	40	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
28/03/2015	MARZO	PC4000	5		73	Se rellenó por fuga en manguera hidráulica
28/03/2015	MARZO	PC4000	1	30395	29	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
29/03/2015	MARZO	PC4000	1	30412	45	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
29/03/2015	MARZO	PC4000	2	29928	60	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
29/03/2015	MARZO	PC4000	3	30137	25	Se rellenó por rotura de manguera bomba
30/03/2015	MARZO	PC4000	1	30446	58	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
31/03/2015	MARZO	PC4000	3	30192	33	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
01/04/2015	ABRIL	PC4000	1	30449	100	Se rellenó aceite tellus 68 por fuga en mangueras hidráulicas
01/04/2015	ABRIL	PC4000	1	30452	35	Se rellenó aceite tellus 68 por fuga en mangueras hidráulicas
01/04/2015	ABRIL	PC4000	1	30454	65	Se rellenó aceite tellus 68 por fuga en mangueras hidráulicas
01/04/2015	ABRIL	PC4000	4	20218	40	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
02/04/2015	ABRIL	PC4000	2	30025	20	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección

03/04/2015	ABRIL	PC4000	3	30242	102	Se rellenó por fuga
04/04/2015	ABRIL	PC4000	2	30046	30	Se rellenó aceite hidráulico por fuga en los enfriadores
04/04/2015	ABRIL	PC4000	1		40	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
04/04/2015	ABRIL	PC4000	3	30283	35	Se rellenó por fuga
05/04/2015	ABRIL	PC4000	3		59	Se rellenó por fuga. Rotura dee manguera hidráulica
06/04/2015	ABRIL	PC4000	2		45	Se rellenó aceite hidráulico por fuga en los enfriadores
09/04/2015	ABRIL	PC4000	3		53	Se rellenó aceite hidráulico por bajo nivel
09/04/2015	ABRIL	PC4000	4	20364	23	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
11/04/2015	ABRIL	PC4000	2	30181	20	Se rellenó aceite hidráulico por bajo nivel
11/04/2015	ABRIL	PC4000	1	30675	32	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
12/04/2015	ABRIL	PC4000	2	30188	58	Se rellenó aceite hidráulico por bajo nivel
12/04/2015	ABRIL	PC4000	1	30686	15	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
12/04/2015	ABRIL	PC4000	3	30443	70	Se rellenó aceite hidráulico por bajo nivel
12/04/2015	ABRIL	PC4000	1	30697	35	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
13/04/2015	ABRIL	PC4000	3	30448	10	Se rellenó aceite hidráulico por bajo nivel
15/04/2015	ABRIL	PC4000	1	30754	70	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
15/04/2015	ABRIL	PC4000	4		40	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
16/04/2015	ABRIL	PC4000	2	30261	36	Se rellenó aceite hidráulico por bajo nivel
17/04/2015	ABRIL	PC4000	4	20536	80	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
17/04/2015	ABRIL	PC4000	1	30778	79	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
18/04/2015	ABRIL	PC4000	3	30517	40	Se rellenó por fuga de manguera
19/04/2015	ABRIL	PC4000	2	30308	40	Se rellenó aceite hidráulico por bajo nivel
19/04/2015	ABRIL	PC4000	3		50	Se rellenó por fuga de manguera
20/04/2015	ABRIL	PC4000	2	30329	40	Se rellenó aceite hidráulico por fuga
20/04/2015	ABRIL	PC4000	2	30329	35	Se rellenó aceite hidráulico por fuga
20/04/2015	ABRIL	PC4000	4	20621	25	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
21/04/2015	ABRIL	PC4000	1	30848	103	Se rellenó por fuga.
21/04/2015	ABRIL	PC4000	5	19940	99	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
22/04/2015	ABRIL	PC4000	1	30877	47	Se rellenó por fuga.
22/04/2015	ABRIL	PC4000	5	19940	90	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
22/04/2015	ABRIL	PC4000	5	19940	80	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
22/04/2015	ABRIL	PC4000	3	30642	78	Se rellenó por fuga de manguera
23/04/2015	ABRIL	PC4000	5	19940	25	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
24/04/2015	ABRIL	PC4000	5		78	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
24/04/2015	ABRIL	PC4000	4	20713	35	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
25/04/2015	ABRIL	PC4000	2	30433	55	Se rellenó aceite hidráulico por fuga

26/04/2015	ABRIL	PC4000	3	30728	22	Se rellenó por falta de nivel
27/04/2015	ABRIL	PC4000	4	20777	10	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
28/04/2015	ABRIL	PC4000	2	30488	46	Se rellenó aceite hidráulico por fuga en manguera hidráulica
28/04/2015	ABRIL	PC4000	1	31011	35	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
29/04/2015	ABRIL	PC4000	4	20803	50	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
30/04/2015	ABRIL	PC4000	5	20113	20	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
30/04/2015	ABRIL	PC4000	3	30814	30	Se rellenó por fuga en tubería de alta presión de bomba 3 al bloque principal 2
01/05/2015	MAYO	PC4000	1	31065	55	Se rellenó por fuga en tapa de spool del bloque # 03.
01/05/2015	MAYO	PC4000	1	31075	21	Se rellenó por fuga en tapa de spool del bloque # 03.
01/05/2015	MAYO	PC4000	4	20835	30	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
02/05/2015	MAYO	PC4000	2	30515	76	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
02/05/2015	MAYO	PC4000	3	30864	20	Se rellenó aceite por bajo nivel al momento de la inspección.
03/05/2015	MAYO	PC4000	2	30541	60	Se rellenó por fuga.
03/05/2015	MAYO	PC4000	3	30882	50	Se rellenó por fuga
03/05/2015	MAYO	PC4000	5	20148	25	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
04/05/2015	MAYO	PC4000	2	30556	45	Se rellenó por fuga.
05/05/2015	MAYO	PC4000	1	31124	78	Se rellenó aceite por fuga en mangueras
05/05/2015	MAYO	PC4000	5	20190	30	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
06/05/2015	MAYO	PC4000	2	30568	50	Se rellenó por fuga.
07/05/2015	MAYO	PC4000	3	30887	295	Se rellenó por cambio de aceite Hidráulico.
07/05/2015	MAYO	PC4000	3	30887	280	Se rellenó por cambio de aceite Hidráulico.
07/05/2015	MAYO	PC4000	4	20945	50	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
07/05/2015	MAYO	PC4000	2	30591	20	Se rellenó por fuga de manguera hidráulica
07/05/2015	MAYO	PC4000	3	30887	300	Se rellenó por cambio de aceite Hidráulico.
07/05/2015	MAYO	PC4000	3	30887	160	Se rellenó por cambio de aceite Hidráulico.
10/05/2015	MAYO	PC4000	1	31213	76	Se rellenó aceite por fuga en mangueras del bloque principal 03
10/05/2015	MAYO	PC4000	2	30659	65	Se rellenó por fuga de manguera de accionamiento de cilindro del clan
11/05/2015	MAYO	PC4000	3	30925	70	Se rellenó por aceite hidráulico fuga
11/05/2015	MAYO	PC4000	5	20263	130	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
11/05/2015	MAYO	PC4000	3	30935	120	Se rellenó por aceite hidráulico fuga
12/05/2015	MAYO	PC4000	4	20996	30	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
12/05/2015	MAYO	PC4000	2	30703	20	Se rellenó aceite por bajo nivel al momento de la inspección.
13/05/2015	MAYO	PC4000	3	30971	35	Se rellenó por aceite hidráulico fuga
13/05/2015	MAYO	PC4000	1	31286	25	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección

14/05/2015	MAYO	PC4000	3	30992	30	Se rellenó por aceite hidráulico fuga
14/05/2015	MAYO	PC4000	2	30735	90	Se rellenó aceite hidráulico por fuga en manifold de retorno.
14/05/2015	MAYO	PC4000	3	30992	35	Se rellenó por aceite hidráulico fuga en manguera de enfriamiento del pto.
15/05/2015	MAYO	PC4000	2	30750	70	Se rellenó aceite hidráulico por fuga.
16/05/2015	MAYO	PC4000	5	20369	15	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
16/05/2015	MAYO	PC4000	4	21166	126	Se rellenó por fuga de aceite en manguera hidráulica.
17/05/2015	MAYO	PC4000	2	30786	23	Se rellenó aceite hidráulico por fuga.
17/05/2015	MAYO	PC4000	3	31055	20	Se rellenó aceite hidráulico por fuga.
17/05/2015	MAYO	PC4000	5	20391	55	Se rellenó aceite por fuga de manguera hidráulicas.
18/05/2015	MAYO	PC4000	1	31305	60	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
19/05/2015	MAYO	PC4000	3	31104	60	Se rellenó aceite hidráulico por fuga.
20/05/2015	MAYO	PC4000	4	21243	25	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
21/05/2015	MAYO	PC4000	2	30858	20	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
21/05/2015	MAYO	PC4000	4	21264	18	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
21/05/2015	MAYO	PC4000	3	31139	160	Se rellenó aceite hidráulico por fuga de hidráulico.
22/05/2015	MAYO	PC4000	5	20472	55	Se rellenó aceite por fuga de manguera hidráulicas.
23/05/2015	MAYO	PC4000	2	30904	25	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
24/05/2015	MAYO	PC4000	1	31313	100	Se rellenó por cambio de aceite Hidráulico.
24/05/2015	MAYO	PC4000	1	31313	80	Se rellenó por cambio de aceite Hidráulico.
25/05/2015	MAYO	PC4000	1	31313	180	Se rellenó por cambio de aceite Hidráulico.
25/05/2015	MAYO	PC4000	3	31236	20	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
26/05/2015	MAYO	PC4000	2	30947	60	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
26/05/2015	MAYO	PC4000	1	31313	150	Se rellenó por cambio de aceite Hidráulico.
26/05/2015	MAYO	PC4000	4	21335	40	Se rellenó aceite hidráulico por fuga.
27/05/2015	MAYO	PC4000	1	31313	202	Se rellenó por cambio de aceite Hidráulico.
27/05/2015	MAYO	PC4000	1	31313	328	Se rellenó por cambio de aceite Hidráulico.
27/05/2015	MAYO	PC4000	5	20574	20	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
28/05/2015	MAYO	PC4000	2	31009	25	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
28/05/2015	MAYO	PC4000	1	31328	40	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección.
28/05/2015	MAYO	PC4000	2	31021	120	Se rellenó por fuga. Manguera rota en el rotary.
31/05/2015	MAYO	PC4000	4	21444	20	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección.
01/06/2015	JUNIO	PC4000	2	31039	50	Se rellenó aceite por cambio de manguera rota.
01/06/2015	JUNIO	PC4000	2	31056	110	Se rellenó aceite por cambio de manguera rota.
01/06/2015	JUNIO	PC4000	3	31363	25	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
02/06/2015	JUNIO	PC4000	1	31408	30	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección.

03/06/2015	JUNIO	PC4000	1	31417	40	Se rellenó por fuga en el bloque 1 y bloque de válvulas.
03/06/2015	JUNIO	PC4000	5	20699	21	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
03/06/2015	JUNIO	PC4000	4	21474	80	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección.
03/06/2015	JUNIO	PC4000	3	31408	20	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
06/06/2015	JUNIO	PC4000	3	31452	90	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
07/06/2015	JUNIO	PC4000	2	31173	45	Se rellenó aceite por bajo nivel al momento de la inspección.
08/06/2015	JUNIO	PC4000	2	31176	30	Se rellenó aceite por bajo nivel al momento de la inspección.
08/06/2015	JUNIO	PC4000	5	20777	50	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
09/06/2015	JUNIO	PC4000	4	21530	25	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección.
09/06/2015	JUNIO	PC4000	1	31497	50	Se rellenó por bajo nivel.
10/06/2015	JUNIO	PC4000	3	31539	25	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección
14/06/2015	JUNIO	PC4000	3	31619	50	Se rellenó por fuga.
17/06/2015	JUNIO	PC4000	2	31314	27	Se rellenó por bajo nivel.
19/06/2015	JUNIO	PC4000	4	21650	40	Se rellenó por bajo nivel al momento de la inspección.
20/06/2015	JUNIO	PC4000	2	31368	50	Se rellenó por fuga.
21/06/2015	JUNIO	PC4000	3	31730	101	Se rellenó por fuga.
21/06/2015	JUNIO	PC4000	2	31383	50	Se rellenó por fuga.
21/06/2015	JUNIO	PC4000	2	31388	180	Se rellenó por fuga.
21/06/2015	JUNIO	PC4000	1	31627	25	Se rellenó por bajo nivel.
22/06/2015	JUNIO	PC4000	2	31395	22	Se rellenó por fuga.
23/06/2015	JUNIO	PC4000	2	31420	160	Se rellenó por fuga.
23/06/2015	JUNIO	PC4000	3		30	Se rellenó por bajo nivel.
24/06/2015	JUNIO	PC4000	3	31807	30	Se rellenó por fuga.
24/06/2015	JUNIO	PC4000	3	31807	30	Se rellenó por fuga.
25/06/2015	JUNIO	PC4000	2	31443	125	Se rellenó por fuga por tapa 06, spool bloque 2.
25/06/2015	JUNIO	PC4000	3	31828	10	Se rellenó por fuga.
25/06/2015	JUNIO	PC4000	1	31695	20	Se rellenó por bajo nivel.
25/06/2015	JUNIO	PC4000	2	31453	30	Se rellenó por fuga por tapa 06, spool bloque 2.
28/06/2015	JUNIO	PC4000	3	31860	90	Se rellenó por fuga en manifold de retorno del sistema hidráulico.
28/06/2015	JUNIO	PC4000	1	31726	50	Se rellenó por fuga en mangueras hidráulicas.
28/06/2015	JUNIO	PC4000	3	31880	75	Se rellenó por fuga en manifold de retorno del sistema hidráulico.
29/06/2015	JUNIO	PC4000	3	31886	46	Se rellenó por fuga en manifold de retorno del sistema hidráulico.
29/06/2015	JUNIO	PC4000	2	31540	80	Se rellenó por fuga en manguera de alta presión en la bomba # 02.

29/06/2015	JUNIO	PC4000	4	21847	90	Se rellenó por fuga.
30/06/2015	JUNIO	PC4000	3	31908	70	Se rellenó por fuga en manifold de retorno del sistema hidráulico.
30/06/2015	JUNIO	PC4000	2	31548	65	Se rellenó por fuga en fisura de tubería hidráulica.
30/06/2015	JUNIO	PC4000	3	31913	65	Se rellenó por fuga en manifold de retorno del sistema hidráulico.
30/06/2015	JUNIO	PC4000	2	31539	152	Se rellenó por fuga en fisura de tubería hidráulica.
30/06/2015	JUNIO	PC4000	2	31544	20	Se rellenó por fuga en fisura de tubería hidráulica.
01/07/2015	JULIO	PC4000	2	31562	27	Se rellenó por fuga en fisura de tubería hidráulica.
01/07/2015	JUNIO	PC4000	1	31791	22	Se rellenó por fuga en mangueras hidráulicas.
01/07/2015	JULIO	PC4000	2	31567	57	Se rellenó por fuga en fisura de tubería hidráulica.

Fuente: Data de mantenimiento proporcionada por Lubeman Servicios Generales E.I.R.L.

ANEXO 6. DESCRIPCIÓN TÉCNICA DE PALAS PC 4000-04

PC4000 SUPER SHOVEL

WALK-AROUND

Quality

- Quality management ISO 9001 certified.
- Environmental Management ISO 14001 certified.
- High consistent quality through continuous investment in personnel, design and manufacturing systems and processes.

Reliability and Durability

Designed for lower operating costs

- Robust structural design developed from field experience and finite element analysis.
- Extended life undercarriage wear parts; Big diameter rollers, idlers and sprockets. Large surface area and extensive precision hardening. Hardened track link pin bores.

Productivity

Designed for more tons per hour

- Powerful digging forces.
- Ease of bucket filling.
- Proven attachment design.
- All cylinders mounted under the shovel attachment for additional protection.
- Buckets and Wear Packages to suit all material densities and ground conditions.



SUPER SHOVEL

PC4000

Large Comfortable Cab

Full shift comfort

- Komatsu low noise cab on multiple viscous mounts for reduced noise and vibration.
- Large volume cab with deep wide front window.
- Comprehensive climate control with pressurised filtered air ventilation and air conditioning.
- High specification multi-adjustable air suspension seat.
- Well elevated operator position giving good all round view.

**MATCHED FOR
150 to 240 U.S. ton
TRUCKS**

**SHOVEL AND BACKHOE
BUCKET CAPACITY
22 m³ 29 yd³**



Advanced Hydraulics

Extended reliability and precise control

- Comprehensive monitored filtration.
- Simple open circuit hydraulic system with high efficiency swing out oil coolers.

Powerful Diesel Engine

Single Komatsu SDA16V160 engine

- Rated 1400 kW 1875 HP, at 1800 rpm.
- Electronic engine management.
- Low engine emission levels meet EPA regulations.
- Time saving oil management system fitted as standard; Centinel Engine Oil Management, Reserve Engine Oil Supply and Eliminator Oil Filter systems.

Easy Maintenance

Simple, common-sense design gives quick safe access to all major components

- Generous access to all major service points from machinery house floor level.
- Enclosed, internally lit machinery house with firewall separating engine from pump area.
- Automatic central lubrication.
- VHMS electronic monitoring system providing real time information about the operating status of the machine.
- Ground-level access to hydraulically powered swing down service arm with Wiggins connections.

PC4000 SUPER SHOVEL

SPECIFICATIONS



DIESEL DRIVE

Model	Komatsu SDA16V160
Type	4-cycle, water-cooled, direct injection
Aspiration	Turbocharged and aftercooled
Number of cylinders	16
Rated power (SAE 1995/J1349)	1400 kW 1875 HP @ 1800 rpm
Governor	All-speed, electronic

The integrated engine oil and filter system combining the oil stabilising systems, Reserve and Centinel, with the Eliminator self cleaning oil filter extends, with oil analysis, the oil change interval to 4000 hours. (not available in Australia)



ELECTRICS

System	24 V
Batteries (series/parallel)	2x 3 x 12 V
Alternator	260 A
Standard working lights	8 Xenon lights
Standard service lights	11 lights



HYDRAULICS

The power train consists of one main drive. Diesel engine or electric motor can be supplied. One gearbox drives four identical main pumps which draw hydraulic oil from an unpressurized hydraulic tank. Open circuit hydraulics provide maximum cooling and filtering efficiency.

Rated flow (total output)	4140 ltr/min 1096 U.S. gal
Relief valve setting	310 bar 4,495 psi
Swing flow rate	1590 ltr/min 420 U.S. gal
High pressure in line filters	200 microns
one per pump located at the valve blocks	

Full flow return line filters (8 double elements) 10 microns at head of hydraulic tank

Case drain-by-pass return line filters 3 microns

The four-circuit system features a load-limiting governor with oil delivery summation to the working circuits and incorporates pressure cut-off control. Hydropilot prioritizes hydraulic flow giving smooth hydraulic response, simple hydraulic system layout, and a reduced number of components. The hydraulic system includes four large swing-out vertical air-to-oil hydraulic coolers with temperature-regulated hydraulically driven fans.



DRIVES AND BRAKES

Travel control	2 foot pedals
Gradeability	Up to 50%
Travel speed (maximum)	2.1 km/h 1.3 mph
Service brake	Hydraulic brake
Parking brake	Wet, multiple-disc



SWING SYSTEM

Hydraulic motors and drives	2
Swing brake, service	Hydraulic brake
Swing brake, parking	Wet, multiple-disc
Swing ring teeth	External
Swing speed (maximum)	4.0 rpm



ELECTRIC DRIVE

Type	Squirrel-cage induction motor
Power output	1350 kW
Voltage	6600 V*
Amperage (approximate)	145 A
Start-up	Soft start
Frequency (standard)	50 Hz @ 1500 rpm
Optional frequency	60 Hz @ 1800 rpm

*Other voltages available on request



UNDERCARRIAGE

Undercarriage consists of one center carbody and two track frames, each side attached by 62 high torque bolts.

Center frame	H-type
Track frame	Steel box-section



CRAWLER ASSEMBLY

Track adjustment	Automatic hydraulic type
Number of shoes	49 each side
Number of top rollers	3 each side
Number of bottom rollers	7 each side



COOLING SYSTEM

The high capacity engine radiators are cooled by hydraulically driven fans for superior cooling efficiency and require little maintenance.

The hydraulic system includes two large swing-out vertical air-to-oil hydraulic coolers with temperature-regulated hydraulically driven fans.



AUTOMATIC CENTRALISED LUBRICATION

Two hydraulically powered Lincoln single line automatic lubrication systems are provided as standard, complete with time and volume variable controls. Activity and malfunction events are linked to the VHMS. The central lube grease system is supplied from a refillable 200 litre 53 gal. barrel. A second, identical system supplies open gear lubricant to the swing ring teeth through a lube pinion. Replenishment of the barrels is through the service arm.



SERVICE CAPACITIES

Hydraulic oil tank	3900 ltr	1,030 U.S. gal
Hydraulic system	5900 ltr	1,559 U.S. gal
Fuel	6400 ltr	1,691 U.S. gal
Engine coolant	475 ltr	125 U.S. gal
Engine oil	290 ltr	77 U.S. gal
Centinel engine oil make up tank	460 ltr	122 U.S. gal

SUPER SHOVEL

PC4000

CAB

The large welded steel safety cab is mounted with 18 viscous damping pads and sound insulated. It is equipped with automatic climate control and is pressurised. The operator's seat is fully adjustable, air suspended, electrically heated and has a lap seat belt. There is a trainer's seat. Low effort joy stick controls are electric over hydraulic and foot controls are for front shovel clam, crawler and swing brake. Full instrumentation and VHMS are provided. Space in the console is provided for an additional monitor. AM/FM radio is fitted. The windshield wash wiper has two speed and intermittent operation. (Water reservoir 7 litres 1.8 gal.) Amenities include a wash basin with running water, water reservoir, (50 litres 13 gal.), refrigerator and storage cabinets. Powered mirrors are adjusted from inside the cab. There are left and right hand sliding windows. All windows are tinted persol green. External metal louvres are provided on the cab side windows.

- Cab engineering standards are;
- ISO 3449 Falling Objects Protection Structure
 - ISO 6396 Noise in operator's cab is 73 dB(A)
 - ISO 2631-1/5349-1 Vibration and Shock
 - Air conditioner10kW 34120 Btu
 - Heater/Demister (Diesel version)10kW 34120 Btu

VEHICLE HEALTH MONITORING SYSTEM

VHMS is designed for Komatsu mining equipment to provide real time and stored information about the status of the operating machine. A touch sensitive flat screen color monitor gives a continuous display or can be activated to provide operator or service data. Non serious and critical faults are automatically announced, while for major malfunctions the engine is also shut down. The integrated digital storage provides a full event history, which can be down loaded by laptop computer or by wireless link. The ability to provide real time service information as messages, snap-shot or trend data automatically to mine control programmes can improve mechanical utilisation and reduce costs. (Electric drive version fitted with ECS Health Monitor)

OPERATING WEIGHTS

PC 4000 Backhoe:
Operating weight including 9750 mm 32'10" boom, 4500 mm 14'9" stick, 22 m³ 29 yd³ backhoe bucket, operator, lubricant, coolant, full fuel tank and standard equipment.

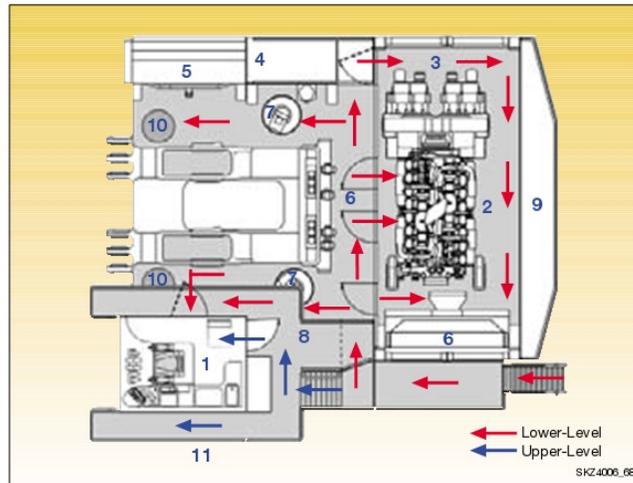
Shoe Width	Operating Weight	Ground Pressure
1200 mm 47"	392 t 865,000 lb	2.19 kg/cm² 31.2 psi
1500 mm 59"	397 t 875,000 lb	1.78 kg/cm² 25.3 psi

PC 4000 Front Shovel:
Operating weight including 7150 mm 23'6" boom, 4900 mm 16'1" stick, 22 m³ 29 yd³ shovel bucket, operator, lubricant, coolant, full fuel tank and standard equipment.

Shoe Width	Operating Weight	Ground Pressure
1200 mm 47"	385 t 850,000 lb	2.15 kg/cm² 30.6 psi
1500 mm 59"	390 t 860,000 lb	1.75 kg/cm² 24.8 psi

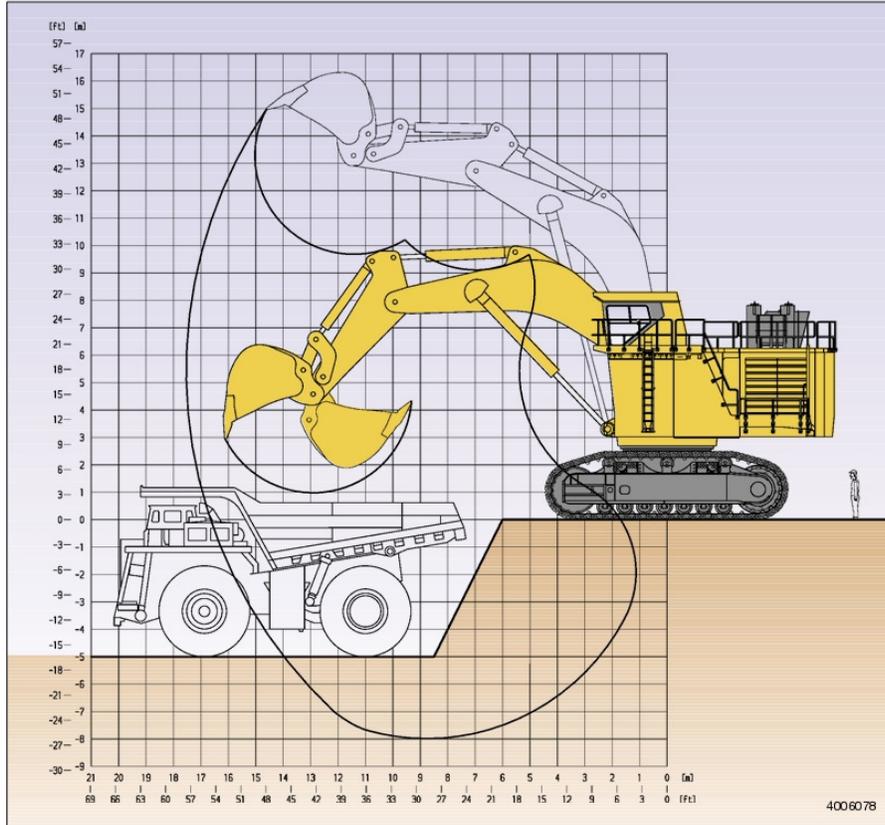
Explanation

- 1 Operator's Cab
- 2 Power Train
- 3 Hydraulic Pumps
- 4 Hydraulic Tank
- 5 Hydraulic Coolers
- 6 Valve Blocks
- 7 Swing Motor
- 8 Fuel Tank
- 9 Counterweight
- 10 Autolube System
- 11 Secondary Egress



PC4000 SUPER SHOVEL

PRODUCTIVITY-FEATURES



DIGGING FORCES

Break-out force	1155 kN	260,000 lb
Tear-out force	1050 kN	236,000 lb

Maximum reach at ground level	16.650 mm	54'8"
Maximum digging depth	8.000 mm	26'3"

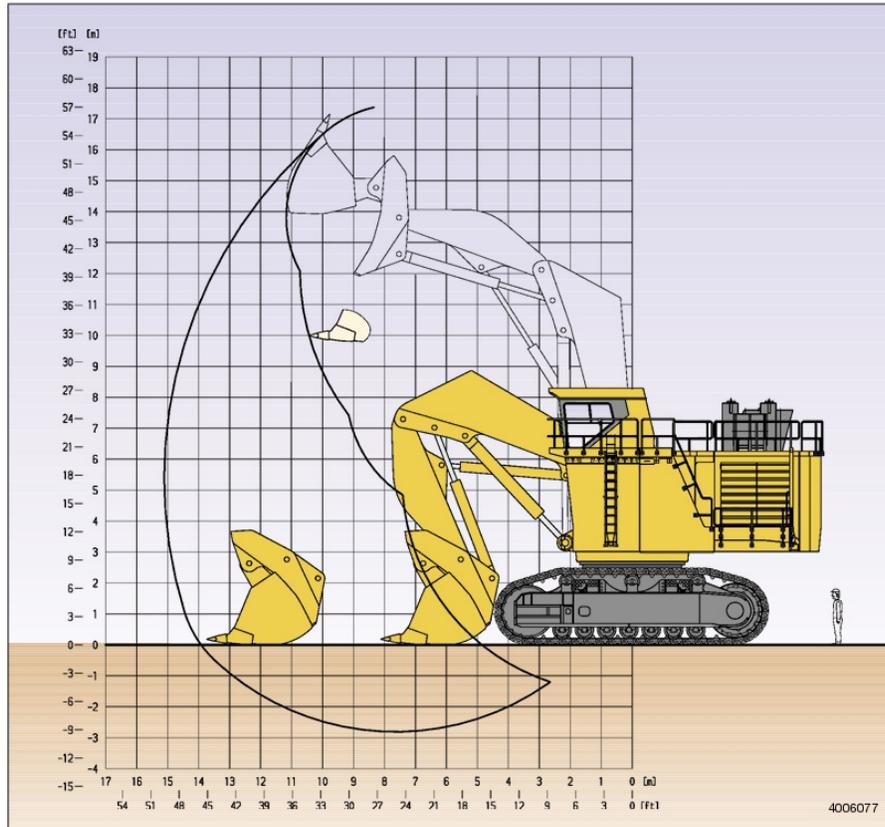
BACKHOE BUCKET, STICK AND BOOM COMBINATION

Bucket Capacity	Width	Weight	Teeth	Boom Length
		including Wear package-2		Stick Length
SAE Heaped 1 : 1	3790 mm 12'5"	23.4 t 51,590 lb	6	9750 mm 32'0"
22 m ³ 29 yd ³				4500 mm 14'9"
Material weight to 1.8 t/m ³ 3000 lb/yd ³				

Alternative buckets/wear packages are available

SUPER SHOVEL

PC4000



DIGGING FORCES

Break-out force	1250 kN	280,000 lb
Crowd force	1330 kN	300,000 lb

Level crowd at ground level	5700 mm 18'8"
Maximum dumping height	12.000 mm 39'4"



SHOVEL BUCKET, STICK AND BOOM COMBINATION

Bucket Capacity		Width	Weight including Wear package-3	Teeth	Boom Length 7150 mm 23'6"
SAE/CECE Heaped 2 : 1	Heaped 1 : 1				Stick Length 4900 mm 16'1"
22 m ³ 29 yd ³	25 m ³ 32.7 yd ³	4020 mm 13'2"	38.8 t 76,700 lb	5	○ Material weight to 1.8 t/m ³ 3000 lb/yd ³

Alternative buckets/wear packages are available

STANDARD EQUIPMENT

Hydraulic Mining Shovel with Diesel Drive will comprise:

- **FRONT SHOVEL ATTACHMENT**
7.15 m 23'6" boom and 4.9 m 16'1" stick complete with cylinders. 22 m³ 29 yd³ (SAE 2:1) shovel bucket with mechanical teeth and lip system.

OR

- **BACKHOE ATTACHMENT**
9.75 m 32'0" boom and 4.5 m 14'9" stick with 22 m³ 29 yd³ (SAE 1:1) bucket.

- **CRAWLER UNDERCARRIAGE**
Heavy-duty shovel type undercarriage consisting of a center carbody and 2 heavy box-type track frames, each having 7 bottom rollers, 3 top rollers, and 1200 mm 47" cast steel track shoes. Hydraulic track adjustment and parking brake provided.

- **SUPERSTRUCTURE**

Main frame mounted over an externally toothed swing circle carries the main drive module, including Komatsu SDA16V160 diesel engine, oil and fuel reservoirs, counterweight, operator's cab and base.

- **LIGHTING**

8 Xenon high performance working lights. 11 service lights throughout platform.

- **OPERATOR'S CAB**

Fully enclosed steel cab which incorporates the ISO 3449 standard FOPS structure and CARRIER SÚTRAK air-conditioning unit. Mounted on viscous pads. GRAMMER fully suspended seat with lap-belt. Fold-away auxiliary seat. Full selection of controls, switches, and VHMS (Vehicle Health Monitoring System). Joystick and pedal-operated controls are electric over hydraulic. Windshield wash wipers with two speed and intermittent operation. (reservoir 7 ltr 1.8 gal).

AM-FM radio. Washbasin with running water (reservoir 50 ltr 13 gal). Refrigerator and storage cabinets. Left and right hand sliding windows. All windows tinted parsol green.

- **LUBRICATION**

LINCOLN central lubrication for basic machine, attachment, and bucket. 200 ltr 53 gal refillable barrel.

LINCOLN automatic pinion lubrication system for swing circle teeth with 200 ltr 53 gal refillable barrel.

Service point (diesel version only as standard) on hydraulic arm carrying WIGGINS fluid receiving connectors for filling of fuel, engine oil and coolant, hydraulic oil, grease, cabwater and the evacuation of coolant, and hydraulic and engine oils.

- **ACCESSORIES**

Acoustic travel alarm
Hydraulically actuated ground access ladder
Electric air horn
Engine oil management System. (Sentinel, Reserve & Eliminator Systems)

OPTIONAL EQUIPMENT

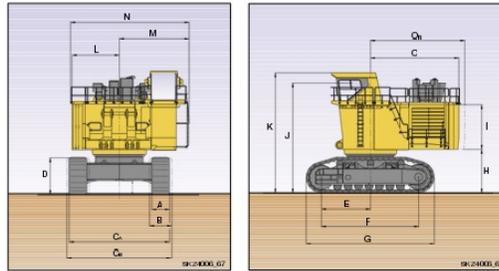
- 1500 mm 59" track shoes
- Extra or alternative, lighting
- Electric drive
- Cable reel (Electric Version)
- Low temperature package
- Fire suppression system

DIMENSIONS

BASIC MACHINE WITH COUNTERWEIGHT

A	1200mm	47"	H	3017mm	9'11"
B	1500mm	59"	I	3085mm	10'2"
C _A	6750mm	22'2"	J	7600mm	24'11"
C _B	7050mm	23'2"	K	8300mm	27'3"
D	2480mm	8'2"	L	3175mm	10'5"
E	3380mm	11'1"	M	4700mm	18'6"
F	6700mm	22'0"	N	7975mm	26'2"
G	8842mm	29'0"	O	6095mm	20'0"
			O _R	6500mm	21'4"

Ground Clearance: 930mm 3'0"



QESS0046 01

©2006 Komatsu Printed in Germany



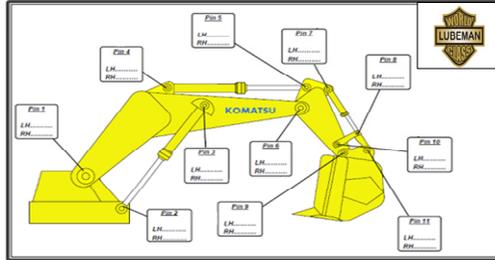
www.komatsu-mining.com

Materials and specifications are subject to change without notice. **KOMATSU** is a trademark of Komatsu Ltd. Japan.

Fuente: Fabricante de maquinarias Komatsu.

ANEXO 7. FORMATO DE TEMPERATURAS DE PINES-PC4000-6

MONITOREO DE TEMPERATURA DE PINES - PALA HIDRAULICA PC4000-6 BH



Modelo:		Nro. Interno:		Horometro:		Hora Inicio:	
Serie:		Codigo comp.:		Fecha:		Hora Termino:	
Lubricante:	BELRAY	Responsabilidad de la detencion:					
Inspector:						T. ambiente:	

PIN	DESCRIPCION	Rango de Temperatura (°C)			UBICACION	Temp. Real °C
		Normal	Preventivo	Critico		
1	Pin y alojamiento de la estructura del boom	0 a 31	32 a 39	40 a +	LH RH	
2	Pin y alojamiento del vástago del cilindro del boom	0 a 35	36 a 43	44 a +	LH RH	
3	Pin y alojamiento del cilindro del boom	0 a 39	40 a 47	48 a +	LH RH	
4	Pin y alojamiento del cilindro de stick	0 a 31	32 a 39	40 a +	LH RH	
5	Pin y alojamiento del vástago del cilindro del stick	0 a 29	30 a 37	38 a +	LH RH	
6	Pin y alojamiento de la unión del boom y el stick	0 a 31	32 a 39	40 a +	LH RH	
7	Pin y alojamiento del cilindro del bucket	0 a 31	32 a 39	40 a +	LH RH	
8	Pin y alojamiento del vástago del cilindro del bucket	0 a 29	30 a 37	38 a +	LH RH	
9	Pin y alojamiento de la unión del stick y el bucket	0 a 27	28 a 37	38 a +	LH RH	
10	Pin y alojamiento de la unión del stick y el balancin	0 a 27	28 a 35	36 a +	LH RH	
11	Pin y alojamiento de la unión del bucket y el balancin	0 a 27	28 a 35	36 a +	LH RH	

Temp. Tornamesa (°C)	
Temp. Adelante:	
Temp. Atrás:	
Temp. Derecha:	
Temp. Izquierda:	

Depositos de Grasa	
CLS	SLS
Temp. (°C) :	
Nivel (%) :	

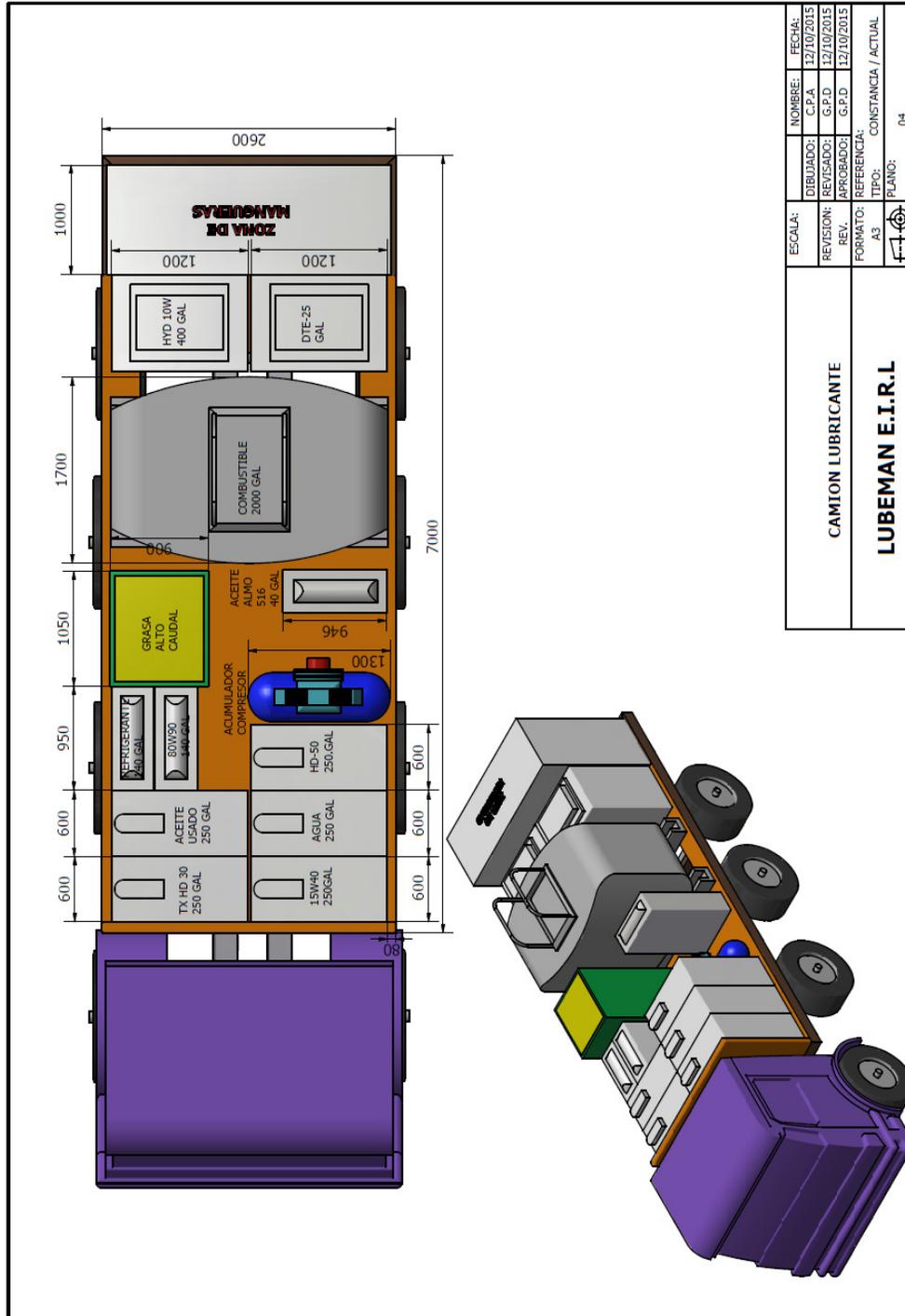
COMENTARIOS:

Nombre:	
Tec. Lubricacion - Lubeman	
Nombre:	
Superv. Lubricacion - Lubeman	

Nombre:	
Lider - KMMP	
Nombre:	
Supervisor - KMMP	

Fuente: Data de mantenimiento proporcionada por Lubeman Perú E.I.R.L.

ANEXO 09. PLANO CAMIÓN LUBRICADOR



Fuente: Data de mantenimiento proporcionada por Lubeman Perú E.I.R.L.