

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
SEDE CONCEPCIÓN REY BALDUINO DE BELGICA

**Mantenimiento Preventivo para un Cabezales Waratah 622 B con Micro-filtrado
en su sistema hidráulico.**

Trabajo de titulación para optar al título
profesional de ingeniero de ejecución en
MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

Nombre del alumno

Gonzalo Daniel Freire Ruiz.

Nombre profesor guía.

Carlos Boris Garay Burgos.

2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título; Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Mantenimiento Preventivo para un Cabezales Waratah 622 B con Micro-filtrado en su sistema hidráulico.

Nombre del candidato(a): Gonzalo Daniel Freire Ruiz

Carrera / Grado: Ingeniería en mantenimiento Industrial

Campus: Concepcion ; **Departamento:** Mecanica.

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Carlos Garay, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

6 meses; 12 meses; 2 años; 3 años; 5 años; 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 12.01.2026

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 12.01.2026

; Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

BIB-FO2385 01

RESUMEN

En la industria forestal chilena, los cabezales cosechadores representan equipos de alta criticidad para la continuidad operativa, al integrar en un solo proceso las funciones de tala, desrame, medición y trozado de la madera. El cabezal Waratah HTH622B, acoplado a una máquina base John Deere 2154G, opera mediante un sistema oleo-hidráulico de alta presión que trabaja en 350 bar, suministrados desde la máquina portadora al cabezal. Bajo estas condiciones, la calidad y limpieza del fluido hidráulico se vuelve un factor determinante para asegurar la confiabilidad y la disponibilidad del conjunto.

Los estudios indican que una proporción significativa de las fallas en sistemas hidráulicos (del 50–70 %) se asocia a procesos de desgaste acelerado por contaminación sólida, presencia de agua y degradación del aceite. En las faenas forestales del sur de Chile, la operación del cabezal HTH622B se desarrolla en un entorno caracterizado por altas precipitaciones, abundancia de barro, polvo mineral y restos de corteza, lo que favorece la incorporación de contaminantes al circuito hidráulico a través de respiraderos, sellos y conexiones. Esto se manifiesta en fallas recurrentes de motores de rodillos, cilindros de cuchillas, válvulas proporcionales y motor de sierra, con el consiguiente impacto en tiempos de detención y costos de mantenimiento.

La pauta de mantenimiento actualmente aplicada se basa principalmente en el cambio de aceite hidráulico y del filtro de retorno cada 2.000 horas, de acuerdo con las recomendaciones del fabricante de la máquina base. No obstante, la geometría del circuito y la longitud de las líneas que recorren el brazo y el cabezal impiden la renovación total del fluido, manteniéndose un volumen residual contaminado que se mezcla con el aceite nuevo y reduce significativamente la efectividad del recambio.

El objetivo general de este trabajo es confeccionar y aplicar un plan de mantenimiento preventivo para un cabezal cosechador Waratah HTH622B, basado en la implementación de un sistema de micro-filtrado del fluido hidráulico, con el propósito de incrementar la disponibilidad operacional del equipo y disminuir los costos de mantenimiento asociados a la contaminación del aceite.

La metodología de la investigación comprende:

1.-el diagnóstico del estado actual del sistema hidráulico y la identificación de los modos de falla predominantes.

2.- el diseño y dimensionamiento de un sistema de micro-filtrado off-line capaz de remover partículas en el rango de 1–3 μm con alta eficiencia.

3.- la formulación de una pauta de mantenimiento preventivo que integre el uso rutinario del micro-filtrado y el análisis de aceite.

4.-la evaluación técnica y económica de la intervención, mediante indicadores de limpieza del fluido, tasa de fallas, disponibilidad y retorno económico de la inversión.

Se espera obtener una mejora apreciable en la clase de limpieza del fluido según la norma ISO 4406, una disminución en la frecuencia de fallas hidráulicas, la extensión de la vida útil del aceite y de los componentes internos, y un periodo de recuperación de la inversión compatible con los requerimientos de la operación forestal. Estos resultados buscan respaldar la incorporación del micro-filtrado como una práctica estándar de mantenimiento en cabezales cosechadores de características similares.

INDICE

DEDICATORIA	¡Error! Marcador no definido.
RESUMEN.....	7
INDICE	9
INDICE DE FIGURAS.....	¡Error! Marcador no definido.
INDICE DE TABLAS	¡Error! Marcador no definido.
SIGLAS Y SIMBOLOGIA.....	12
INTRODUCCION	1
OBJETIVOS	2
OBJETIVO GENERAL	2
OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	2
CAPITULO 1: MARCO TEORICO.....	3
1.1- Sistemas oleo–hidráulicos en maquinaria pesada.....	3
1.2 Contaminación del fluido hidráulico: tipos y efectos	5
1.3 Desde el punto de vista de su origen, la contaminación sólida puede clasificarse en:	5
1.4 Cabezal cosechador Waratah HTH622B y su sistema hidráulico:.....	7
1.5 Contexto de operación:	9
1.6 La implementación de micro–filtrado en sistemas hidráulicos de maquinaria pesada ha mostrado beneficios como:.....	11
Tabla: plan de mantenimiento sistema hidráulico.	12
CAPITULO 2: SITUACION ACTUAL	17
2.1 La pauta de mantenimiento vigente se basa principalmente en criterios de tiempo de servicio:	18
2.2 Los registros operacionales del equipo muestran un comportamiento de fallas coherente con esta realidad:	19
CAPITULO 3: PROPUESTA DE MEJORA.....	25
3.1. Enfoque general de la propuesta	25
3.2. Descripción de la solución: microfiltrado off–line con Supper Caddy 3.....	26

3.3. Integración de la Supper Caddy 3 al sistema hidráulico del cabezal	26
3.4. Nueva pauta de mantenimiento preventivo basada en condición	27
3.5. Impacto esperado en disponibilidad, fallas y vida útil.....	29
<i>Disponibilidad = Tiempo Operativo / (Tiempo Operativo + Tiempo Detenido)</i>	<i>30</i>
CAPITULO 4: EVALUACION ECONOMICA	31
4.1 escenario de análisis.....	32
4.2 Evaluación técnica	35
5.3 Evaluación económica	37
5.4 Rentabilidad: ROI y payback	39
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	41
BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE LA INFORMACIÓN	44
ANEXOS	45

SIGLAS Y SIMBOLOGIA

Símbolo / unidad	Significado	Uso típico
μm	Micrómetro (10^{-6} m).	Tamaño de partículas / filtración (por ejemplo, 1-3 μm).
bar	Unidad de presión.	Presiones de operación/servicio en el sistema hidráulico.
h	Hora(s).	Frecuencias de mantención por horas de operación.
h/año	Horas por año (operación anual).	Base para estimaciones de costos y ciclos anuales.
km	Kilómetros.	Distancia usada para costear traslados.
L	Litros.	Volumen de aceite.
m^3	Metro cúbico.	Volumen (por ejemplo, de producción de madera).
m^3/h	Metros cúbicos por hora.	Tasa de producción.
CLP	Pesos chilenos.	Moneda en costos (CLP/L, CLP/km, etc.).
%	Porcentaje.	Variaciones, reducciones y proporciones.
\approx	Aproximadamente (valor estimado).	Valores referenciales o redondeados.
\geq	Mayor o igual que.	Comparaciones en especificaciones (por ejemplo, $\beta \geq 200$).
\rightarrow	Flecha: implica / se traduce en / pasa a.	Notas técnicas y conversiones de frecuencia.
³	Exponente 'cúbico' (al cubo).	Presente en m^3 .
d = 100 km	Variable de distancia de referencia.	Base para calcular costo de traslado.

Sigla / término	Definición	Uso en el documento
2154G	Modelo de máquina base John Deere.	Referencia a la configuración máquina base + cabezal.
CapEx	Capital Expenditure: inversión inicial (compra/activos).	Se usa para separar inversión inicial de costos operacionales.
HTH622B	Modelo de cabezal cosechador Waratah.	Equipo principal analizado.
Hydrau John Deere	Nombre comercial del aceite hidráulico utilizado en el ejemplo.	Base para costear CLP/L y cambios de aceite.
ISO 16889	Norma de ensayo para desempeño de filtros (relacionada al índice beta).	Respalda la eficiencia de filtración reportada por el fabricante.
ISO 4406	Norma para clasificar la limpieza del aceite según conteo de partículas (códigos tipo 19/16/13).	Permite evaluar y comparar niveles de contaminación del fluido.
MTBF	Mean Time Between Failures: tiempo medio entre fallas.	Indicador de confiabilidad (tiempo promedio entre fallas).
OpEx	Operating Expenditure: costo operacional (operación/mantenimiento).	Costos recurrentes: filtros, análisis de aceite, mano de obra, etc.
Payback	Período de recuperación de la inversión.	Tiempo estimado en que los beneficios cubren la inversión inicial.
ROI	Return on Investment: retorno sobre la inversión.	Indicador de rentabilidad de la propuesta.
Supper Caddy 3	Unidad/equipo de microfiltrado off-line (portátil).	Solución propuesta de filtración fina en circuito auxiliar.
TAN	Total Acid Number: número de acidez total del aceite.	Indicador de oxidación/degradación del fluido en análisis de aceite.
β (beta)	Índice beta: relación entre partículas que entran al filtro y las que lo atraviesan, para un tamaño dado.	Mide el desempeño del filtro para un tamaño de partícula específico.

β_x	Índice beta para un tamaño x (por ejemplo 3 μm).	Ej.: $\beta_x = 200$ a 3 μm indica alta eficiencia de retención.
-----------	--	---

INTRODUCCION

La industria forestal chilena ha experimentado en las últimas décadas un fuerte proceso de mecanización, impulsado por la necesidad de aumentar la productividad, mejorar la seguridad de los trabajadores y garantizar estándares de calidad homogéneos frente a mercados cada vez más exigentes. En este escenario, los equipos cosechadores forestales se han consolidado como el corazón operativo de las faenas, al permitir integrar en un solo sistema las tareas de tala, sujeción, desrame, medición y trozado de la madera.

Dentro de estos equipos, los cabezales cosechadores destacan por su amplio uso en el país. En particular, el modelo Waratah HTH622B, acoplado a una máquina base tipo excavadora forestal (por ejemplo, John Deere 2154G), es ampliamente utilizado en la cosecha de bosques de pino y eucalipto en la zona sur de Chile. El desempeño confiable de este cabezal es crítico para la continuidad operacional: una falla en su sistema hidráulico implica, en la práctica, la detención completa del proceso de cosecha.

El cabezal Waratah HTH622B opera mediante un sistema oleo–hidráulico de alta presión que acciona motores de rodillos, cilindros de cuchillas, el motor de la sierra y giro del cabezal. Este sistema comparte el depósito de aceite y los filtros principales con la máquina base y se encuentra expuesto a condiciones ambientales severas: alta pluviosidad, suelos con barro, polvo mineral y abundantes restos de corteza y madera. Estas condiciones favorecen la contaminación del fluido hidráulico, lo que constituye uno de los factores más relevantes en la generación de fallas y pérdida de confiabilidad en maquinaria pesada.

=

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Confeccionar y aplicar un plan de mantenimiento preventivo para un cabezal cosechador Waratah HTH622B a través de un micro-filtrado del sistema hidráulico, incrementando la disponibilidad operacional del equipo.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Diagnosticar el estado actual del sistema hidráulico del cabezal Waratah HTH622B, identificando sus principales componentes, condiciones de operación y fallas frecuentes vinculadas a la contaminación del fluido.
2. Diseñar y dimensionar un sistema de micro-filtrado off-line adecuado para el cabezal, considerando eficiencia de filtración, caudal de recirculación y compatibilidad con el circuito hidráulico existente.
3. Formular una pauta de mantenimiento preventivo que integre el micro-filtrado, el análisis de aceite y las inspecciones programadas del sistema hidráulico del cabezal.
4. Evaluar técnica y económicamente los resultados de la implementación, mediante indicadores de limpieza del fluido, tasa de fallas, disponibilidad y retorno de la inversión.

CAPITULO 1: MARCO TEORICO

1.1- SISTEMAS OLEO-HIDRÁULICOS EN MAQUINARIA PESADA.

Los sistemas oleo-hidráulicos constituyen uno de los métodos más utilizados para la transmisión de potencia en maquinaria pesada, debido a su elevada densidad de potencia, la facilidad para convertir energía hidráulica en movimiento lineal o rotativo y su capacidad para trabajar a altas cargas y en ambientes severos. Su principio básico se fundamenta en la ley de Pascal, según la cual una presión aplicada a un fluido confinado se transmite íntegramente en todas las direcciones. Esto permite que, a partir de una fuerza relativamente pequeña aplicada en una bomba, se obtengan fuerzas de gran magnitud en los actuadores.

- 1. En términos generales, un sistema oleo-hidráulico típico está compuesto por los siguientes subsistemas y elementos:**
 - a. Unidad de potencia: incluye el depósito de fluido, la bomba hidráulica, el motor de accionamiento (diésel o eléctrico), filtros de succión y dispositivos de seguridad.
 - b. Elementos de conducción: tuberías rígidas, mangueras flexibles y conexiones que permiten transportar el fluido desde la bomba hacia los actuadores y de regreso al depósito.

- c. Elementos de control: válvulas de alivio, válvulas direccionales, válvulas de caudal y válvulas proporcionales o servo-válvulas, que regulan la presión, el caudal y el sentido del flujo.
 - d. Actuadores: cilindros hidráulicos (para movimientos lineales) y motores hidráulicos (para movimientos rotativos), encargados de convertir la energía hidráulica en trabajo mecánico.
 - e. Elementos auxiliares: enfriadores, acumuladores, filtros de retorno y respiraderos, entre otros.
2. En maquinaria pesada como excavadoras o cabezales cosechadores forestales, es habitual el uso de bombas de pistones axiales de caudal variable para alimentar el circuito principal de trabajo, dado que permiten adaptar el caudal disponible a las demandas de los actuadores y aprovechar mejor la potencia del motor. Paralelamente, se suelen emplear bombas de engranajes o de paletas para circuitos auxiliares (servicios, giro, ventiladores, etc.).
1. El fluido hidráulico desempeña un rol múltiple: además de transmitir potencia, lubrica las superficies en contacto, contribuye a la disipación de calor generado por pérdidas internas, protege contra la corrosión y transporta los productos de desgaste hacia los filtros. Para cumplir estas funciones, el fluido debe conservar propiedades como:
- Viscosidad adecuada al rango de temperaturas de operación.
 - Estabilidad térmica y oxidativa.
 - Compatibilidad con materiales de sellos y componentes internos.
 - Capacidad de separación de aire (desaireación) y de agua.
 - Nivel de limpieza que no comprometa las tolerancias internas de válvulas, bombas y actuadores.
2. La degradación de cualquiera de estas propiedades, y en especial el aumento de la contaminación por partículas sólidas y agua, impacta directamente en la confiabilidad del sistema, reduciendo la vida útil de los componentes y aumentando la probabilidad de fallas.

1.2 CONTAMINACIÓN DEL FLUIDO HIDRÁULICO: TIPOS Y EFECTOS

Se entiende por contaminación del fluido hidráulico la presencia de sustancias o elementos no deseados (sólidos, líquidos o gaseosos) que pueden alterar sus propiedades y acelerar el desgaste de los componentes del sistema. En el contexto de la maquinaria pesada, la contaminación sólida es la más crítica, aunque también son relevantes la presencia de agua y aire.

1.3 DESDE EL PUNTO DE VISTA DE SU ORIGEN, LA CONTAMINACIÓN SÓLIDA PUEDE CLASIFICARSE EN:

1. Contaminación incorporada : corresponde a partículas que quedan en el sistema desde la fabricación, el montaje o reparaciones anteriores. Incluye limaduras, restos de soldadura, arena, fibras textiles y otros residuos que no fueron completamente removidos por los procedimientos de limpieza.
2. Contaminación ingresada : es aquella que penetra al circuito desde el ambiente externo a través de respiraderos, sellos dañados, empaquetaduras defectuosas, conexiones mal ajustadas o durante el llenado y el mantenimiento del sistema (aceite o herramientas sucias).
3. Contaminación generada : se produce por el propio funcionamiento del sistema, y está asociada al desgaste de superficies metálicas (partículas de acero, hierro, cobre, etc.), degradación de sellos y formación de productos de oxidación del aceite.
4. Las partículas sólidas se caracterizan por su tamaño (expresado en micrómetros, μm), su dureza, su forma y su concentración. El tamaño es especialmente relevante, ya que en los sistemas hidráulicos modernos las tolerancias entre carretes de válvulas y orificios calibrados pueden ser del orden de 2–5 μm . Partículas de tamaño similar o ligeramente superior son capaces de producir rayaduras y desgaste por abrasión, obstrucciones parciales y atascos intermitentes.

En la práctica industrial se utiliza la norma ISO 4406 para clasificar la limpieza del fluido hidráulico en función del número de partículas presentes en determinados rangos de tamaño (por ejemplo, mayores de 4 μm , 6 μm y 14 μm). Cada “código” representa un rango logarítmico de conteo de partículas por mililitro, de modo que una mejora de dos o tres códigos implica una reducción significativa de la cantidad de

contaminación presente. Los fabricantes de componentes hidráulicos suelen especificar clases de limpieza recomendadas para garantizar la vida útil de sus equipos; operar de forma sistemática por encima de esos niveles incrementa de manera importante la tasa de fallas.

Además de las partículas sólidas, la presencia de agua en el aceite genera problemas adicionales. El agua puede ingresar por condensación, por fugas de enfriadores o por lavado inadecuado de componentes. En niveles elevados provoca corrosión de superficies metálicas, degradación acelerada de aditivos, formación de emulsiones y pérdida de capacidad lubricante. En condiciones de baja presión puede originar cavitación de vapor, mientras que en zonas de alta presión puede producir micro-fisuras y picaduras en superficies sometidas a contacto.

La contaminación por aire se manifiesta cuando existe aire disuelto, atrapado o libre en el fluido. Puede deberse a niveles bajos de aceite, fugas en la línea de succión, mala disposición del retorno al depósito o agitación excesiva. La presencia de aire favorece la formación de espuma, reduce la rigidez del sistema (lo que se traduce en respuestas lentas e imprecisas) y contribuye a la cavitación gaseosa, con daños similares a los producidos por el agua.

En conjunto, estos mecanismos de contaminación y sus efectos asociados se traducen en:

1. Aumento del desgaste abrasivo y erosivo en bombas, válvulas y actuadores.
2. Pérdida de eficiencia volumétrica (mayores fugas internas).
3. Disminución de la vida útil de los componentes.
4. Incremento de fallas funcionales (atascos de válvulas, pérdida de presión, movimientos erráticos de actuadores).
5. Mayor frecuencia de intervenciones correctivas y de detenciones no programadas.
6. Numerosos estudios de confiabilidad en sistemas hidráulicos han demostrado que una proporción importante de fallas puede atribuirse directa o indirectamente a la contaminación del fluido, lo que justifica la adopción de estrategias específicas de control de limpieza, como el micro-filtrado y el análisis sistemático de aceite.

1.4 CABEZAL COSECHADOR WARATAH HTH622B Y SU SISTEMA HIDRÁULICO:

El cabezal cosechador Waratah HTH622B es un equipo forestal diseñado para el procesamiento de árboles en faenas de tala y trozado. Su función principal es sujetar el tronco, desplazarlo longitudinalmente para efectuar el desrame y realizar cortes precisos según las longitudes requeridas por el proceso productivo.

1. Desde el punto de vista hidráulico, el HTH622B incorpora una serie de actuadores que permiten ejecutar estas funciones:
 - a. Motores hidráulicos de rodillos de alimentación: encargados de arrastrar el tronco a través del cabezal durante el desrame y la medición. Deben desarrollar altos niveles de torque para tratar con diámetros variables y condiciones de corte exigentes.
 - b. Cilindros de cuchillas de desrame: permiten abrir y cerrar las cuchillas que desprenden las ramas del tronco. Requieren movimientos rápidos y fuerzas elevadas para asegurar un desrame eficiente.
 - c. Motor hidráulico de sierra: impulsa la cadena de corte utilizada para seccionar el tronco en los largos requeridos. Este motor trabaja a altas velocidades y está sometido a variaciones bruscas de carga.
 - d. Giro hidráulico: posibilita la orientación del cabezal respecto del brazo de la máquina base, facilitando el posicionamiento del equipo frente al árbol y la evacuación de los trozos cortados.

2. El sistema hidráulico que alimenta estos actuadores es suministrado por la máquina base (por ejemplo, una John Deere 2154G), con la cual el cabezal comparte el depósito de aceite y los filtros principales de succión y retorno. Generalmente se recurre a bombas de pistones axiales de caudal variable para los circuitos de trabajo, controladas por sistemas de válvulas proporcionales y reguladores de carga, de manera de priorizar determinadas funciones según la demanda del operador.

La presión de trabajo en el circuito del cabezal se sitúa típicamente en rangos de trabajo de 300–350 bar, lo que implica que pequeñas partículas pueden generar esfuerzos de contacto significativos en los órganos internos de bombas, válvulas y actuadores. A ello se suma el largo recorrido de las mangueras que van

desde la superestructura de la máquina base hasta el cabezal, las cuales están expuestas a flexiones, vibraciones, impactos y contacto con el entorno (ramas, troncos, barro).

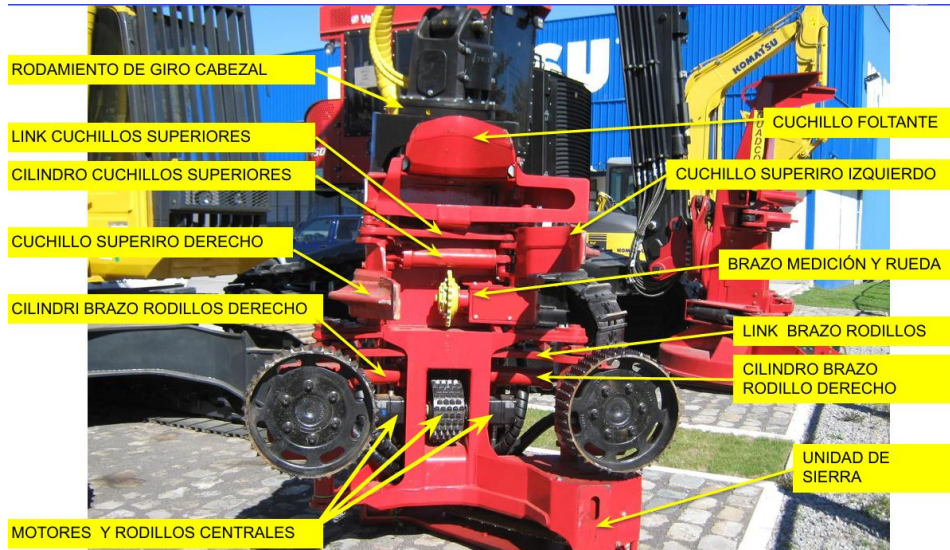


Ilustración 1: partes del cabezal

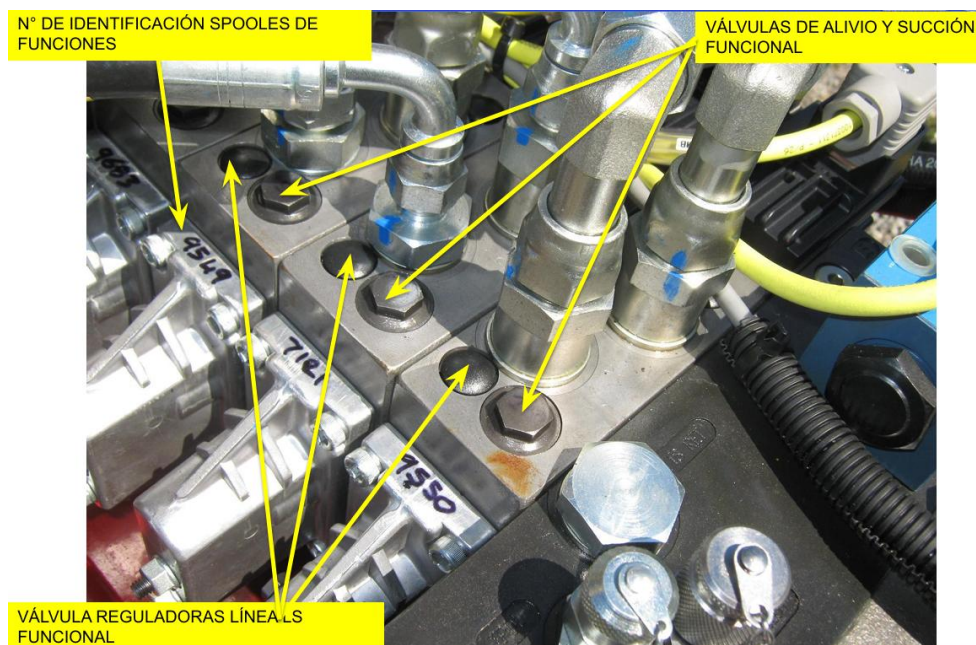
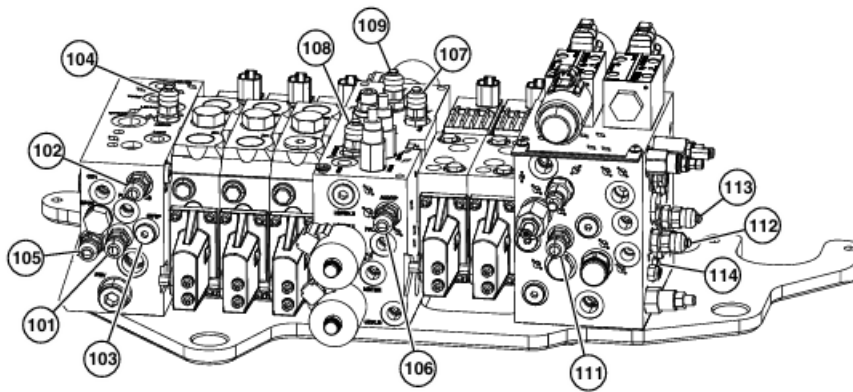


Ilustración 2: partes del cabezal



XJ1270321

Ubicación de los puntos de prueba

101— Punto de prueba de suministro de la bomba principal (PTP)	105— Punto de prueba de presión del depósito (TTP)	109— Punto de prueba del cilindro de la sierra principal (MSCTP)	113— Punto de prueba del brazo del cilindro de medición (MTP)
102— Punto de prueba de detección de carga (LS)	106— Punto de prueba auxiliar (AUXTP)	111— Punto de prueba de presión del cilindro de inclinación B (TILTBM)	114— Punto de prueba de corte de la sierra desmochadora (TSCM)
103— Punto de prueba de vaciado de caja (CDTP)	107— Punto de prueba de presión de mando (PPTP)	112— Punto de prueba de retorno de la sierra desmochadora (TSRETM)	
104— Punto de prueba de presión de engrase (LBPTP)	108— Punto de prueba de tensión de cadena de sierra principal (MSTENTP)		

XJ1270321—UN—22JAN19

1.5 CONTEXTO DE OPERACIÓN:

—bosques del sur de Chile con alta humedad, suelos blandos y presencia constante de material particulado.

— es especialmente adverso para el sistema hidráulico. El cabezal está en contacto directo con el tronco, la corteza y las ramas, por lo que está expuesto a la entrada de partículas de madera, polvo mineral y agua. Asimismo, las superficies de trabajo suelen estar cubiertas de barro, lo que favorece la acumulación de contaminantes en puntos de conexión y en los elementos móviles del cabezal.

Estas características hacen que el HTH622B sea particularmente sensible a los problemas de contaminación del fluido. Fallas repetitivas en motores de rodillos, atascos de válvulas y desgaste prematuro de cilindros pueden estar estrechamente vinculadas con niveles de limpieza insuficientes, sobre todo cuando la estrategia de mantenimiento se limita al cambio de aceite por horas sin considerar el estado real del fluido ni la existencia de volúmenes residuales contaminados en las líneas del brazo y del cabezal.

1.5 Micro-filtrado y control de contaminación en aceites hidráulicos:

La filtración del fluido hidráulico es el principal mecanismo de defensa frente a la contaminación sólida. Los sistemas tradicionales incorporan filtros de succión, filtros de presión y filtros de retorno, con grados de filtración típicos de 10–25 μm . Si bien estos elementos son indispensables, en muchos casos resultan insuficientes para mantener niveles de limpieza compatibles con componentes de alta precisión, especialmente cuando el entorno es muy contaminado o cuando el sistema opera con presiones elevadas y tolerancias reducidas.

El micro-filtrado se define, en este contexto, como la aplicación de etapas de filtración adicionales, con grados de filtración finos (de 1–3 μm) y alta eficiencia de captura, con el propósito de reducir la concentración de partículas más pequeñas, responsables de gran parte del desgaste a largo plazo. Esta filtración suele implementarse en configuración off-line o en by-pass, es decir, mediante un circuito auxiliar que recircula el fluido desde el depósito, lo hace pasar por uno o más elementos filtrantes de alta eficiencia y lo devuelve nuevamente al sistema.

Las principales ventajas de utilizar un circuito de micro-filtrado off-line son:

- Permite utilizar elementos filtrantes más finos sin introducir caídas de presión excesivas en el circuito principal.
- Facilita la instalación y el mantenimiento del equipo de filtración, ya que no interfiere directamente en el flujo de trabajo hacia los actuadores.
- Puede operar de manera continua o en ciclos programados, incluso con la máquina detenida, mejorando la limpieza del fluido antes del inicio de los turnos.
- Ofrece un punto adecuado para integrar sensores de monitoreo y puertos de muestreo de aceite.

El desempeño de un filtro se suele caracterizar mediante el índice beta (β), definido como la relación entre el número de partículas que ingresan al filtro y el número de partículas que pasan a través de él, para un tamaño de partícula específico. Por ejemplo, un filtro con $\beta_x = 200$ para 3 μm significa que por cada 200 partículas de tamaño igual o superior a 3 μm que ingresan, solo una consigue pasar. A mayor índice beta, mayor eficiencia de filtración.

1.6 LA IMPLEMENTACIÓN DE MICRO-FILTRADO EN SISTEMAS HIDRÁULICOS DE MAQUINARIA PESADA HA MOSTRADO BENEFICIOS COMO:

- Mejora significativa en la clase de limpieza según ISO 4406.
- Extensión de la vida útil del fluido, al reducir la tasa de generación de productos de oxidación y la interacción entre partículas duras y superficies de contacto.
- Aumento de la vida útil de bombas, válvulas y actuadores, al disminuir el desgaste abrasivo.
- Reducción de la tasa de fallas hidráulicas y de las detenciones no programadas.
- Disminución de los costos de mantenimiento correctivo y del consumo total de aceite.

En la práctica, el micro-filtrado no reemplaza los filtros tradicionales del sistema, sino que actúa como un complemento de alta precisión. La estrategia de control de contaminación más eficaz combina:

- Filtros de succión y de retorno correctamente dimensionados.
- Un sistema de micro-filtrado off-line que opere de manera periódica.
- Buenas prácticas de manipulación del aceite (almacenamiento, trasvasije, limpieza de herramientas).
- Procedimientos adecuados de muestreo y análisis de aceite.

Esta combinación permite mantener de forma sistemática niveles de limpieza acordes con las exigencias de los componentes y con las condiciones severas de operación de equipos como el cabezal Waratah HTH622B.

Tabla: plan de mantenimiento sistema hidráulico.

con proceso micro-filtrado						
maquina base/horas	Engrase	Filtro retorno	Filtro presion	Cambio aceite hidraulico	filtro de pilotaje hidraulico	micro-filtrado
250	x					
500	x					
1000	x	x			x	x
1500	x					
2000	x	x	x	x	x	x
2500	x					
3000	x	x			x	x
3500	x					
4000	x	x	x	x	x	x
4500	x					
5000	x	x			x	x
5500	x					
6000	x	x	x	x	x	x

1.7 Mantenimiento preventivo basado en condición y análisis de aceite:

El mantenimiento de sistemas industriales puede agruparse, de manera general, en mantenimiento correctivo, preventivo y basado en condición (o predictivo). En el contexto de sistemas hidráulicos

complejos y críticos, la tendencia es migrar desde esquemas puramente correctivos o preventivos por tiempo hacia estrategias que integren la condición real del sistema como variable de decisión.

- Mantenimiento correctivo: consiste en reparar o reemplazar componentes una vez que la falla se ha manifestado. Si bien puede ser inevitable en algunos casos, su aplicación como estrategia principal implica tiempos de detención no planificados, riesgos de fallas catastróficas y mayores costos asociados a daños colaterales.
- Mantenimiento preventivo por tiempo o por horas: se basa en la ejecución de intervenciones a intervalos predefinidos (por ejemplo, cada 2.000 horas de servicio), independientemente del estado real del equipo. Aunque reduce la probabilidad de fallas, puede ser ineficiente si se reemplazan componentes o fluidos que aún presentan condiciones aceptables.
- Mantenimiento basado en condición: utiliza información sobre el estado real del sistema (vibraciones, temperatura, análisis de aceite, etc.) para decidir el momento más oportuno de intervenir. Su objetivo es anticipar fallas incipientes, evitar detenciones imprevistas y optimizar el uso de recursos.

En sistemas oleo-hidráulicos, el análisis de aceite se ha consolidado como una de las herramientas más poderosas para el mantenimiento basado en condición. A través de muestras tomadas en puntos estratégicos del circuito, es posible determinar:

- Nivel de contaminación por partículas sólidas (conteo de partículas y clase ISO 4406).
- Contenido de agua y presencia de emulsiones.
- Viscosidad y su variación respecto de la especificación original.
- Índice de acidez (TAN) y productos de degradación del fluido.
- Presencia de metales de desgaste (hierro, cobre, cromo, etc.), que entregan información sobre los componentes que podrían estar deteriorándose.

La validez de los resultados depende de un muestreo correcto, lo que implica utilizar envases limpios y certificados, evitar la contaminación cruzada, extraer el fluido desde zonas representativas del circuito y registrar adecuadamente datos como el equipo, las horas de operación y las condiciones de trabajo al momento de la toma.

Integrar el análisis de aceite al plan de mantenimiento del cabezal Waratah HTH622B permite:

- Verificar la efectividad del sistema de micro-filtrado, observando la evolución de la clase de limpieza antes y después de los ciclos de filtración.
- Detectar incrementos anómalos en la concentración de partículas o en ciertos metales de desgaste, lo que puede indicar fallas incipientes en bombas, válvulas o actuadores del cabezal.
- Definir intervalos de cambio de aceite basados en su condición real y no únicamente en criterios de horas de servicio, lo que puede traducirse en ahorros significativos sin comprometer la confiabilidad.
- Evaluar el impacto de las condiciones de operación (campañas intensivas, ambientes más contaminados, cambios de operador) sobre la salud del sistema hidráulico.

Tabla 1- 1: causa efecto.

TIEMPO DE DETENCION	FALLA	CAUSA	EFECTO	SOLUCION
2 horas	Ruptura de manguera	Daño de mangueras por degradación interna (caucho) y generación de partículas	contaminación crónica, filtros tapados, fallas repetidas aunque cambies aceite.	reemplazo de mangueras críticas, compatibilidad aceite/material, control de temperatura y rutas sin roce y proceso de micro-filtrado al sistema.
5 horas	funciones sin reacción	contaminación solida genera atasco en accionamiento del spool	funciones erráticas o no accionamiento de ellas.	sacar la sección afectada, retirar el particulado y realizar micro-filtrado.
6 horas	funciones se accionan solas.	desgaste excesivo en actuadores por contaminación permite el paso de flujo hidráulico.	perdida de fuerza, precisión y eficiencia en el proceso de tala.	cambio de secciones afectadas (se recomienda micro-filtrado).
8 horas	ruido en motores de rodillo	material particulado ingresa a componente provocando falla en su sistema.	perdida de fuerza de motores y generación excesiva de material particulado.	cambio de motor de rodillo, filtro de retorno , filtro depresión y micro-filtrado.
3 horas	fuga retenes banco de válvulas	fugas externas, pérdida de presión interna, entrada de aire, suciedad externa que empeora todo.	fugas externas, pérdida de presión interna, entrada de aire, suciedad externa que empeora todo.	eliminar causa (contaminación), cambiar sellos, revisar alineación/vástagos, usar wipers adecuados y proteger cilindros del barro/polvo.
12 horas	baja potencia hidráulica	Desgaste acelerado de bombas (pistones/paletas/engranajes)	aja presión/caudal, pérdida de fuerza, ciclos lentos, sobrecalentamiento	filtración fina y buen "beta ratio", control ISO 4406, muestreo periódico, flushing y cambio/limpieza de filtros y líneas; revisar respiradores del estanque
2 horas	no reacción de funciones .	Atasco de orificios y restrictores (dampers/orifices	actuadores lentos, golpes hidráulicos, funciones que "se quedan pegadas" o cambian su velocidad.	flushing dirigido, reemplazar restrictor/valvulina afectada, mejorar filtración y orden/limpieza en conexiones rápidas.
24 horas	filtración de aire o agua.	Cavitación y micro cavitación (por aire + suciedad)	ruido, vibración, destrucción de bomba, pérdida de rendimiento.	eliminar entradas de aire (succión, uniones, sellos), mantener nivel de aceite, revisar coladores, usar antiespumantes del aceite correcto y desaireación del sistema.
8 horas	cambio en el color del aceite color lechoso.	Corrosión interna (agua en el aceite)	fallas repetitivas, atascos, desgaste acelerado y lodos.	deshidratación (vacío/centrífuga o filtración con medios para agua), revisar condensación (respirador desecante), sellos del estanque, almacenamiento correcto del aceite.
16 horas	Pegado por barniz (varnish) y lodos	película pegajosa en válvulas y bombas por oxidación del aceite.	película pegajosa en válvulas y bombas por oxidación del aceite.	controlar temperatura, análisis de aceite (oxidación/TAN), filtración especial para barniz (medios adsorbentes), renovar aceite si está degradado.



Figura 1- 1: contaminación filtro retorno.

CAPITULO 2: SITUACION ACTUAL

En la situación actual, el sistema hidráulico del cabezal cosechador Waratah HTH622B opera alimentado por la máquina base (portadora), compartiendo con ella el estanque de aceite hidráulico y los filtros principales de succión y retorno. El conjunto trabaja aproximadamente 6.000 horas al año, en faenas forestales del sur de Chile caracterizadas por alta humedad, presencia de barro, polvo mineral, restos de corteza y variaciones térmicas significativas. Estas condiciones ambientales constituyen un entorno altamente contaminante para cualquier sistema hidráulico.

2.1 LA PAUTA DE MANTENIMIENTO VIGENTE SE BASA PRINCIPALMENTE EN CRITERIOS DE TIEMPO DE SERVICIO:

Cambio de aceite hidráulico (aceite Hydrau John Deere, volumen aproximado de 200 L) cada 2.000 horas, lo que se traduce en 3 cambios anuales para la máquina base y el cabezal en conjunto.

Cambio de filtros hidráulicos principales cada 1.000 horas, es decir, 6 intervenciones anuales, combinando cambios de filtros y cambios completos de aceite más filtros.

No existe, sin embargo, una pauta específica de mantenimiento preventivo para el cabezal Waratah HTH622B; las intervenciones se rigen por las instrucciones generales de la portadora. Esto es relevante, porque por el diseño del circuito hidráulico una fracción importante del aceite queda retenida en las largas líneas hidráulicas que recorren el brazo y el cabezal. Durante los cambios de aceite, el fluido contenido desde aproximadamente la mitad del brazo hacia adelante—incluyendo el interior del cabezal— no se drena completamente, quedando un volumen residual de aceite que suele estar más contaminado que el del tanque principal. Al poner nuevamente en marcha el sistema, este aceite residual se mezcla con el fluido nuevo, reduciendo la efectividad del recambio y manteniendo activa la contaminación interna.

En términos de niveles de limpieza, la combinación de entorno severo, recambios por tiempo y filtración convencional (filtros de retorno en torno a 10 μm nominales y filtros de presión en torno a 5 μm

absolutos) permite mantener solo una limpieza “estándar” del sistema, adecuada para la máquina base, pero insuficiente para un cabezal que trabaja a presiones del orden de 310–350 bar y con tolerancias muy finas en válvulas y motores. En la práctica, esto se traduce en clases de limpieza del aceite situadas en rangos típicos ISO que se consideran por encima de lo recomendado para componentes de alta precisión; en otras palabras, el fluido circula con una cantidad considerable de partículas finas ($<4-6 \mu\text{m}$) que los filtros principales no logran retener de manera efectiva.

2.2 LOS REGISTROS OPERACIONALES DEL EQUIPO MUESTRAN UN COMPORTAMIENTO DE FALLAS COHERENTE CON ESTA REALIDAD:

Se presentan en promedio 12 fallas hidráulicas al año asociadas al cabezal (motores de rodillos, válvulas proporcionales del banco hidráulico, cilindros de cuchillas y motor de sierra).

Cada evento de falla genera, en promedio, del orden de 5 horas de detención, acumulando aproximadamente 60 horas de paro anual atribuibles a problemas hidráulicos del cabezal.

Estas fallas incluyen desgaste prematuro de motores de rodillos, atascos de válvulas, fugas por sellos dañados en cilindros y deterioro acelerado del motor de sierra, todos modos de falla típicamente relacionados con contaminación por partículas sólidas, agua y aire en el fluido.

Desde la perspectiva económica, cada hora detenida representa una pérdida significativa de producción. El cabezal procesa aproximadamente $25 \text{ m}^3/\text{h}$ de madera de pino, y el valor de referencia del metro cúbico aserrado se sitúa en torno a $\$79.000 \text{ CLP}/\text{m}^3$. En estas condiciones, una hora de paro implica cerca de $\$1.975.000 \text{ CLP}$ de producción no realizada. Al considerar 60 horas de detención al año y un costo directo promedio por falla de $\$1.200.000 \text{ CLP}$ en repuestos y mano de obra, el impacto global asociado a las fallas hidráulicas del cabezal supera con facilidad los $\$130$ millones de pesos anuales.

A lo anterior se suma que no se dispone de un programa sistemático de análisis de aceite específico para el cabezal. Los muestreos, cuando se realizan, se toman habitualmente desde el estanque principal, lo que puede no reflejar con exactitud el nivel de contaminación del fluido que circula en los tramos más críticos

(líneas hacia el cabezal, motores de rodillos, cilindros de cuchillas, motor de sierra). Esto hace difícil detectar a tiempo aumentos de partículas o metales de desgaste propios de los componentes del cabezal, y limita la capacidad de aplicar un mantenimiento basado en condición.



Ilustración2- 3: Cabezal cosechador con su respectiva maquina base.

2.3 Análisis de criticidad por tiempo de detención (Pareto)

Para priorizar las acciones de mejora no basta con identificar qué componentes fallan, sino determinar dónde se concentra el impacto real en la disponibilidad del cabezal. Por esta razón se construyó un diagrama de Pareto utilizando como variable principal el tiempo total de detención por componente, en lugar del simple número de fallas. En el contexto del cabezal Waratah HTH622B, cada hora detenida representa una pérdida de producción relevante, por lo que el tiempo fuera de servicio es el indicador que mejor refleja el costo operacional asociado a la contaminación del aceite hidráulico.

A partir del registro de 51 eventos de falla, que suman 255 horas de detención, se ordenaron los componentes según sus horas totales fuera de servicio y se calculó el porcentaje acumulado. El Pareto resultante muestra que la sección motor de rodillo y la sección brazos cuchillos concentran cada una 45 horas de detención, seguidas por la sección motor de sierra (30 h), la sección de brazo de rodillos (30 h), el motor de rodillos central (25 h) y los motores de rodillos laterales (20 h). En conjunto, este grupo explica aproximadamente tres cuartos del tiempo total de parada del sistema hidráulico, a pesar de representar solo una parte del total de componentes analizados. El resto (cilindros de brazo de cuchillos, cilindros de brazo de rodillos, cilindro del tilt, motores de giro y sierra superior) aporta porcentajes menores del downtime acumulado.

La lectura del diagrama es consistente con el problema central de la tesis: los componentes que más horas de detención generan corresponden precisamente a motores, secciones de rodillos y brazos de trabajo, es decir, elementos hidráulicos de alta precisión expuestos directamente a los efectos de la contaminación del fluido (desgaste abrasivo, cavitación, trabamiento de válvulas y daño de sellos). Bajo el principio de Pareto, intervenir sobre las causas de falla de este grupo prioritario entrega el mayor retorno en disponibilidad y reducción de costos.

En este contexto, la propuesta de implementación de microfiltrado off-line con la unidad Supper Caddy 3, combinada con un plan de mantenimiento basado en análisis de aceite, se orienta justamente a reducir la carga de partículas finas y el deterioro prematuro de estos componentes críticos. Al disminuir la frecuencia y la gravedad de las fallas en la sección motor de rodillo, brazos de cuchillas, motores de sierra

y rodillos, se espera una reducción significativa de las 255 horas anuales de detención actualmente observadas, alineando el análisis de Pareto con el objetivo general del trabajo: aumentar la disponibilidad operacional del cabezal y disminuir los costos asociados a la contaminación del aceite hidráulico.

Item	Componete	Nº Fallas	Tiempo de Falla Total (horas)	Falla Total Porcentual	Tiempo de Falla Acumulado	MTRR
1	seccion motor de rodillo	3	45	0,18	18%	15
2	seccion brazos cuchillos	1	45	0,18	35%	45
3	seccion motor de sierra	1	30	0,12	47%	30
4	seccion de brazo de rodillos	6	30	0,12	59%	5,0
5	motor de rodillos central	5	25	0,10	69%	5
6	motores rodillos laterales	3	20	0,08	76%	6,7
7	motor giro cabezal	6	15	0,06	82%	2,5
8	motor de sierra principal	9	15	0,06	88%	1,7
9	motor de sierra superior	9	10	0,04	92%	1,1
10	cilindro brazo de cuchillos	2	10	0,04	96%	5
11	cilindros brazo de rodillo	4	5	0,02	98%	1,25
12	cilindro del tilt	2	5	0,02	100%	2,5
		51	255			

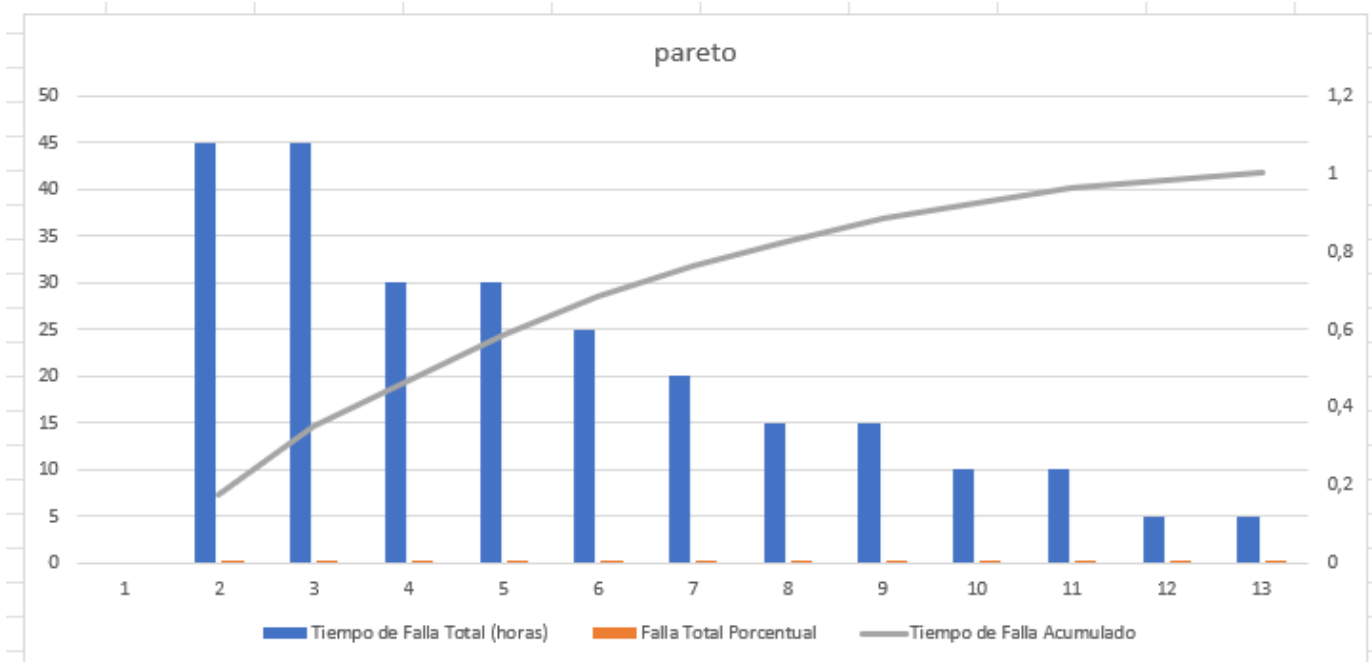




Figura 2- 1: Cabezal cosechador en condiciones normales de trabajo.



Figura 2- 2: cabezal cosechador en proceso de micro-filtrado.

CAPITULO 3: PROPUESTA DE MEJORA

3.1. ENFOQUE GENERAL DE LA PROPUESTA

A partir del diagnóstico realizado en el capítulo anterior, se constató que el cabezal cosechador Waratah HTH622B presenta un número elevado de fallas hidráulicas asociadas a contaminación del fluido: del orden de 12 fallas al año, con un tiempo promedio de detención de 5 horas por evento, lo que se traduce en 60 horas de paro anual solo por problemas hidráulicos del cabezal.

Estas detenciones implican una pérdida directa de producción: el equipo procesa aproximadamente 25 m³/h de madera de pino, y el valor de referencia del metro cúbico aserrado se sitúa en torno a \$79.000 CLP/m³, por lo que cada hora detenida significa cerca de \$1.975.000 CLP de producción no realizada. Sumando los costos directos de reparación (\$1.200.000 CLP por falla en promedio), el impacto económico anual de las fallas hidráulicas del cabezal supera fácilmente los cien millones de pesos. En este contexto, la propuesta de mejora se basa en incorporar un sistema de microfiltrado off-line utilizando una unidad portátil Supper Caddy 3, complementado con análisis sistemático de aceite y una pauta de mantenimiento preventivo basada en la condición del fluido, en lugar de depender únicamente de cambios de aceite por horas de servicio.

El objetivo es reducir la carga de partículas finas (1–3 µm), responsables de la mayor parte del desgaste interno, mejorar la clase de limpieza ISO 4406 del aceite y, con ello:

- Disminuir la frecuencia de fallas hidráulicas (de 12 a aproximadamente 4 fallas/año, según la proyección del proyecto).
- Reducir las horas de detención no programada asociadas al cabezal.
- Extender la vida útil del aceite y de los componentes hidráulicos.
- Mejorar la disponibilidad operacional del equipo y los resultados económicos de la faena.

3.2. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN: MICROFILTRADO OFF-LINE CON SUPPER CADDY

3

La mejora propuesta consiste en incorporar al plan de mantenimiento del cabezal Waratah HTH622B un sistema de microfiltrado off-line mediante una unidad portátil del tipo Supper Caddy 3, diseñada para recircular el aceite hidráulico del sistema y pasarlo por filtros de alta eficiencia de micraje fino (1–3 μm). La Supper Caddy 3 funciona mediante un circuito auxiliar independiente del circuito principal de trabajo:

- **Succión:** toma el aceite desde el estanque o un punto de servicio conectado al circuito hidráulico.
- **Filtrado:** hace pasar el fluido a través de uno o más filtros de alta eficiencia ($\beta \geq 200$) capaces de retener partículas de 1–3 μm que los filtros tradicionales de 10–5 μm no eliminan.
- **Retorno:** devuelve el aceite limpio al sistema, sin introducir caídas de presión adicionales en la línea principal ni afectar el rendimiento de bombas y actuadores.

Al trabajar en **bucle off-line**, la unidad de microfiltrado presenta varias ventajas clave:

- No sobrecarga los filtros originales de succión, presión y retorno.
- Permite filtrar el fluido incluso con la máquina detenida, por ejemplo, antes de iniciar un turno.
- Facilita la integración de **puntos de muestreo** para análisis de aceite y sensores de monitoreo.

3.3. INTEGRACIÓN DE LA SUPPER CADDY 3 AL SISTEMA HIDRÁULICO DEL CABEZAL

El sistema hidráulico de la máquina base John Deere 2154G y del cabezal Waratah HTH622B comparte un mismo estanque y filtros principales. Actualmente, el cambio de aceite y del filtro de retorno se realiza cada 2.000 horas de operación, de acuerdo con las recomendaciones del fabricante.

Sin embargo, el diseño del circuito hace que una parte importante del fluido quede retenida en las líneas largas que alimentan el brazo y el cabezal, por lo que nunca se renueva el 100 % del aceite: siempre permanece un volumen residual contaminado que se mezcla con el aceite nuevo al poner el sistema en marcha.

La Supper Caddy 3 se integra precisamente para atacar este punto débil:

1. Puntos de conexión:

- Línea de succión conectada a la zona más contaminada del estanque o a un punto de retorno cercano al cabezal.

- Línea de retorno hacia el estanque, idealmente en un área de baja turbulencia que favorezca la separación de aire.

2. Modo de operación:

- Para cada intervención, se recircula el volumen total del sistema (estanque + líneas + cabezal) varias veces, hasta lograr una mejora apreciable en la clase de limpieza ISO 4406 (por ejemplo, pasar de 19/16/13 a valores cercanos a 17/14/11 o mejores, según los requisitos de los componentes).
- El microfiltrado se puede realizar:
 - Con el equipo detenido, previo al inicio del turno.
 - O en momentos en que la máquina se encuentra disponible pero no en plena producción.

3. Muestreo de aceite

- En cada intervención se toma una muestra de aceite, con un costo aproximado de \$150.000 CLP, enfocada en conteo de partículas (ISO 4406), contenido de agua, viscosidad y metales de desgaste.
- Los puntos de muestreo se seleccionan de forma que representen el fluido que efectivamente alimenta el cabezal, no solo el estanque, lo que permite evaluar la condición real del sistema.

3.4. NUEVA PAUTA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO BASADA EN CONDICIÓN

La propuesta no solo incorpora el microfiltrado, sino que reordena la pauta de mantención del sistema hidráulico, combinando:

- Acciones por horas de servicio (cambio de filtros y microfiltrado).
- Decisiones basadas en la condición del fluido (análisis de aceite y clases de limpieza).

En términos generales, la pauta propuesta para un cabezal que opera 6.000 h/año es la siguiente:

1. Cambio de filtros principales (retorno y presión).

- Se mantiene la frecuencia actual de cada 1.000 horas, ya que es coherente con las recomendaciones del fabricante y asegura protección básica del circuito principal.

2. Microfiltrado off-line con Supper Caddy 3.

- Se propone realizar un microfiltrado cada 2.000 horas, lo que implica 3 intervenciones anuales para un equipo de 6.000 h/año.
- En cada ciclo se recircula el volumen total del sistema las veces necesarias para lograr el objetivo de limpieza.
- En cada intervención se reemplaza el elemento filtrante de microfiltrado (costo aproximado de \$230.000 CLP) y se considera la mano de obra + traslado base de \$300.000 CLP, más un recargo de \$1.500 CLP/km desde Concepción hasta la faena.

3. Análisis de aceite asociado a cada microfiltrado.

- Se realiza un análisis de aceite por cada microfiltrado (aprox. \$150.000 CLP por muestra).
- Los resultados se utilizan para:
 - Verificar la efectividad del microfiltrado.
 - Ajustar la frecuencia de cambio de aceite.
 - Detectar tendencias de desgaste en motores de rodillos, válvulas proporcionales y cilindros del cabezal.

4. Extensión del intervalo de cambio de aceite.

- Gracias al control de contaminación fina y al monitoreo de condición, se propone extender el cambio de aceite de 2.000 a 3.000 horas, manteniendo controlados los niveles de limpieza y condición del fluido.
- De esta forma, para 6.000 h/año:
 - Antes: 3 cambios de aceite anuales (6000 / 2000).
 - Después: 2 cambios de aceite anuales (6000 / 3000).
- Considerando un volumen de 200 litros y un valor de \$4.600 CLP/litro, cada cambio de aceite implica alrededor de \$920.000 CLP en aceite; reducir de 3 a 2 cambios al año implica un ahorro directo anual solo en aceite nuevo.

Este esquema está alineado con las buenas prácticas de mantenimiento basado en condición, donde el cambio de fluido se decide en función de su estado real (limpieza, oxidación, agua, metales de desgaste) y no solo por horas, lo que permite alargar la vida del aceite sin comprometer la confiabilidad.

3.5. IMPACTO ESPERADO EN DISPONIBILIDAD, FALLAS Y VIDA ÚTIL

La implementación del microfiltrado con la Supper Caddy 3 y la nueva pauta de mantenimiento preventiva tiene efectos directos sobre la confiabilidad del sistema hidráulico del cabezal y, en consecuencia, sobre la disponibilidad del equipo.

1. Reducción de la carga de partículas finas

La combinación de filtros tradicionales (10–5 μm) con el microfiltrado fino (1–3 μm , $\beta \geq 200$) permite bajar de forma importante la cantidad de partículas pequeñas que circulan por válvulas, motores y cilindros. Estas partículas son las principales responsables del desgaste abrasivo.

Fabricantes de filtros y componentes hidráulicos muestran que mejorar uno o dos códigos ISO 4406 puede multiplicar la vida útil de los componentes y reducir fuertemente la tasa de fallas, ya que cada código ISO implica prácticamente duplicar o reducir a la mitad el número de partículas por mililitro. Disminución de la frecuencia de fallas hidráulicas

En la situación actual, el cabezal registra alrededor de 12 fallas hidráulicas al año, asociadas a motores de rodillos, válvulas proporcionales, cilindros de cuchillas y motor de sierra, todos ellos sensibles a la contaminación del fluido.

Al reducir la contaminación fina, se espera bajar esa tasa a aproximadamente 4 fallas anuales, es decir, una reducción cercana al 67 % en el número de eventos. Este valor es coherente con experiencias reportadas en otros sistemas donde la incorporación de filtración fuera de línea disminuyó de forma importante los daños internos y los costos de reparación.

modelo ejemplo

Si se mantiene el tiempo promedio de 5 horas de detención por cada evento, la detención anual pasaría de:

- 12 fallas \times 5 h/falla = 60 h/año

a

- 4 fallas \times 5 h/falla = 20 h/año

Es decir, una reducción de 40 horas anuales de paro atribuible al cabezal solo por concepto de fallas hidráulicas.

3. Incremento de la disponibilidad operacional

Menos fallas y menos horas de detención se traducen directamente en mayor disponibilidad. La disponibilidad se puede expresar como:

$$Disponibilidad = \frac{Tiempo\ Operativo}{Tiempo\ Operativo + Tiempo\ Detenido}$$

Al disminuir el tiempo detenido por fallas hidráulicas, el equipo permanece más horas disponible para producir. Considerando que cada hora de paro equivale a aproximadamente \$1.975.000 CLP de producción no realizada, la reducción de 40 horas anuales de detención genera un impacto económico muy significativo para la faena.

4. Extensión de la vida útil del aceite y de los componentes

Mantener el aceite limpio y controlar la contaminación:

- Alarga la vida del aceite, permitiendo pasar de 2.000 a 3.000 horas entre cambios sin comprometer su desempeño.
- Reduce la tasa de desgaste en bombas, válvulas, motores y cilindros, lo que disminuye la frecuencia de reemplazo de componentes y el gasto en repuestos.

Estudios de costos–beneficios en sistemas oleohidráulicos similares muestran que, después de instalar unidades de microfiltrado fuera de línea, los costos de mantención preventiva asociados a bombas y componentes críticos se reducen drásticamente (por ejemplo, de \$10.270.000 a \$1.664.000 por ciclo de 12.000 horas en un caso estudiado), demostrando que la inversión en filtración fina se recupera en un plazo corto gracias a la reducción de fallas y reparaciones mayores.

modelo ejemplo

5. Consistencia con buenas prácticas de mantenimiento

La propuesta está alineada con las recomendaciones de:

- Control sistemático de contaminación (ISO 4406, ISO 16889).
- Mantenimiento basado en condición, donde el análisis de aceite es una herramienta central para decidir intervenciones.
- En síntesis, la incorporación del microfiltrado con la Supper Caddy 3, integrada a una pauta de mantenimiento preventivo basada en la condición del fluido, permite:
- Reducir de forma importante la contaminación fina del aceite.

- Disminuir la frecuencia y severidad de las fallas hidráulicas del cabezal.
- Extender la vida útil del aceite y de los componentes internos.
- Mejorar la disponibilidad mecánica del equipo y su desempeño económico.

Todo esto justifica plenamente la implementación de la propuesta como una mejora estructural del plan de mantenimiento preventivo del cabezal cosechador Waratah HTH622B.

CAPITULO 4: EVALUACION ECONOMICA

En este capítulo se evalúan los efectos técnicos y económicos de implementar un sistema de micro-filtrado off-line en el sistema hidráulico del cabezal cosechador Waratah HTH622B, considerando ahora:

- 6.000 h/año de operación
- 12 fallas/año sin microfiltrado
- 4 fallas/año con microfiltrado
- Producción de 25 m³/h
- Precio del m³ de pino ≈ \$79.000 CLP
- Aceite Hydrau John Deere, 200 L a \$4.600 CLP/L
- Cambios de aceite cada 2.000 h (actual) y extensión a 3.000 h (propuesto)

4.1 ESCENARIO DE ANÁLISIS

4.1.1 Producción y costo de detención

- Producción promedio del cabezal: **25 m³/h**
- Precio de la madera de pino: **\$79.000 CLP/m³** (valor de referencia)

Entonces, el valor bruto de producción por hora es:

$$C_{hora_paro} = 25 \text{ m}^3/\text{h} \times 79.000 \text{ CLP}/\text{m}^3 = 1.975.000 \text{ CLP}/\text{h}$$

Una hora detenida del cabezal equivale, aproximadamente, a **\$1,98 millones CLP** de producción no realizada.

4.1.2 Aceite hidráulico y filtros (cabezal/máquina base)

- Volumen de aceite hidráulico: **200 L**
- Aceite Hydrau John Deere: **\$4.600 CLP/L**

$$C_{aceite} = 200 \text{ L} \times 4.600 \text{ CLP}/\text{L} = 920.000 \text{ CLP}$$

- Costo juegos de filtros por cambio: **\$350.000 CLP**
- Mano de obra por intervención: **\$250.000 CLP**
- **Cambio completo (aceite + filtros + mano de obra):**

$$C_{cambio_full} = 920.000 + 350.000 + 250.000 = 1.520.000 \text{ CLP}$$

- **Cambio solo de filtros (sin aceite):**

$$C_{solo_filtros} = 350.000 + 250.000 = 600.000 \text{ CLP}$$

Situación actual (Escenario A – sin microfiltrado)

- Horas de operación: 6.000 h/año
- Aceite cada 2.000 h → **3 cambios completos/año**
- Filtros cada 1.000 h → **6 intervenciones/año**
 - 3 cambios completos (aceite + filtros)
 - 3 cambios solo filtros

Situación propuesta (Escenario B – con microfiltrado)

- Se extiende cambio de aceite a cada **3.000 h** → **2 cambios completos/año**
- Se mantiene cambio de filtros cada 1.000 h → **6 intervenciones/año**
 - 2 cambios completos
 - 4 cambios solo filtros

4.1.3 Fallas hidráulicas

- Costo promedio directo por falla hidráulica (repuestos + mano de obra):

$$C_{falla} = 1.200.000 \text{ CLP}$$

- Escenario A (actual):
 - **12 fallas/año**
 - **5 h de detención/falla**
- Escenario B (propuesto, con microfiltrado):
 - **4 fallas/año** (reducción $\approx 67\%$)
 - **5 h de detención/falla** (el tipo de reparación es similar, cambia la frecuencia)

4.1.4 Micro-filtrado (Supper Caddy 3)

- Equipo de micro-filtrado **Supper Caddy 3: \$4.500.000 CLP**
- Recomendación: **1 microfiltrado cada 2.000 h \rightarrow 3 microfiltrados/año**
- Costo por cada servicio de microfiltrado:
 - Mano de obra + traslado base: **\$300.000 CLP**
 - Recargo por distancia: **\$1.500 CLP/km** (desde Concepción)
 - Filtro de microfiltrado: **\$230.000 CLP** (se cambia después de cada microfiltrado)
 - Análisis de aceite: **\$150.000 CLP**

Costo por microfiltrado (en función de la distancia d [km]):

$$C_{mf}(d) = 300.000 + 230.000 + 150.000 + 1.500 \cdot d = 680.000 + 1.500d$$

Para tener números concretos, en esta tesis se supone **un desplazamiento promedio de 100 km ida y vuelta:**

$$C_{mf}(100) = 680.000 + 1.500 \cdot 100 = 680.000 + 150.000 = 830.000 \text{ CLP}$$

- **Costos anuales de operación del microfiltrado:**

$$C_{op} = 3 \cdot C_{mf}(100) = 3 \times 830.000 = 2.490.000 \text{ CLP/año}$$

(En la práctica, este valor debe ajustarse a la distancia real desde Concepción hasta la faena.)

- **Inversión inicial (CapEx):**

$$C_{inv} = 4.500.000 \text{ CLP}$$

(Se elimina el ítem “ingeniería, soportes y adecuaciones” como indicaste.)

4.2 EVALUACIÓN TÉCNICA

4.2.1 Tasa de fallas, horas de detención y disponibilidad

Escenario A – Sin microfiltrado

- Fallas anuales:

$$N_{fallas_A} = 12 \text{ fallas/año}$$

- Tiempo de detención anual:

$$T_{paro_A} = 12 \times 5 = 60 \text{ h/año}$$

- Tasa de fallas por 1.000 h:

$$\lambda_A = \frac{12}{6.000} \times 1.000 = 2 \text{ fallas/1.000 h}$$

- MTBF (Tiempo medio entre fallas):

$$MTBF_A = \frac{6.000}{12} = 500 \text{ h}$$

- Disponibilidad:

$$D_A = \frac{MTBF_A}{MTBF_A + MTTR} = \frac{500}{500 + 5} \approx 0,990(99,0\%)$$

Escenario B – Con microfiltrado

- Fallas anuales:

$$N_{fallas_B} = 4 \text{ fallas/año}$$

- Tiempo de detención anual:

$$T_{paro_B} = 4 \times 5 = 20 \text{ h/año}$$

- Tasa de fallas por 1.000 h:

$$\lambda_B = \frac{4}{6.000} \times 1.000 \approx 0,67 \text{ fallas/1.000 h}$$

- MTBF:

$$MTBF_B = \frac{6.000}{4} = 1.500 \text{ h}$$

- Disponibilidad:

$$D_B = \frac{1.500}{1.500 + 5} \approx 0,997(99,7\%)$$

Resumen técnico:

- La tasa de fallas baja de 2,0 a 0,67 fallas/1.000 h.
- Las horas de detención por fallas hidráulicas disminuyen de 60 h/año a 20 h/año.
- La disponibilidad mecánica mejora de 99,0 % a 99,7 %.

5.3 EVALUACIÓN ECONÓMICA

5.3.1 Costos actuales por fallas hidráulicas (Escenario A)

a) Costos directos de reparación

$$C_{rep_A} = N_{fallas_A} \cdot C_{falla} = 12 \times 1.200.000 = 14.400.000 \text{ CLP/año}$$

b) Costos por detención (producción no realizada)

$$C_{paro_A} = T_{paro_A} \cdot C_{hora_paro} = 60 \times 1.975.000 = 118.500.000 \text{ CLP/año}$$

c) Costo total anual asociado a fallas

$$C_{fallas_A} = C_{rep_A} + C_{paro_A} = 14.400.000 + 118.500.000 = 132.900.000 \text{ CLP/año}$$

5.3.2 Costos por fallas con microfiltrado (Escenario B)

a) Costos directos de reparación

$$C_{rep_B} = N_{fallas_B} \cdot C_{falla} = 4 \times 1.200.000 = 4.800.000 \text{ CLP/año}$$

b) Costos por detención

$$C_{paro_B} = T_{paro_B} \cdot C_{hora_paro} = 20 \times 1.975.000 = 39.500.000 \text{ CLP/a}$$

c) Costo total anual asociado a fallas

$$C_{fallas_B} = C_{rep_B} + C_{paro_B} = 4.800.000 + 39.500.000 = 44.300.000 \text{ CLP/a}$$

5.3.3 Ahorro anual por reducción de fallas

$$B_{fallas} = C_{fallas_A} - C_{fallas_B} = 132.900.000 - 44.300.000 = 88.600.000 \text{ CLP/a}$$

5.3.4 Costos de aceite y filtros: antes y después

Escenario A – Sin microfiltrado

- 3 cambios completos/año:

$$3 \times 1.520.000 = 4.560.000 \text{ CLP/a}$$

- 3 cambios solo filtros/año:

$$3 \times 600.000 = 1.800.000 \text{ CLP/a}$$

$$C_{fluido_A} = 4.560.000 + 1.800.000 = 6.360.000 \text{ CLP/a}$$

Escenario B – Con microfiltrado (aceite cada 3.000 h)

- 2 cambios completos/año:

$$2 \times 1.520.000 = 3.040.000 \text{ CLP/a}$$

- 4 cambios solo filtros/año:

$$4 \times 600.000 = 2.400.000 \text{ CLP/a}$$

$$C_{fluido_B} = 3.040.000 + 2.400.000 = 5.440.000 \text{ CLP/a}$$

Ahorro anual en aceite + filtros:

$$B_{aceite} = C_{fluido_A} - C_{fluido_B} = 6.360.000 - 5.440.000 = 920.000 \text{ CLP/a}$$

5.3.5 Beneficio anual total y costo de operación del microfiltrado

- **Beneficio anual por fallas evitadas:**

$$B_{fallas} = 88.600.000 \text{ CLP/a}$$

- **Beneficio anual por ahorro de aceite y filtros:**

$$B_{aceite} = 920.000 \text{ CLP/a}$$

- **Beneficio anual total (antes de OpEx del microfiltrado):**

$$B_{anual} = B_{fallas} + B_{aceite} = 88.600.000 + 920.000 = 89.520.000 \text{ CLP/a}$$

- **Costos de operación del microfiltrado (3 servicios/año, d = 100 km):**

$$C_{op} = 3 \times 830.000 = 2.490.000 \text{ CLP/a}$$

- **Beneficio neto anual:**

$$B_{neto} = B_{anual} - C_{op} = 89.520.000 - 2.490.000 = 87.030.000 \text{ CLP/a}$$

5.4 RENTABILIDAD: ROI Y PAYBACK

5.4.1 Retorno sobre la inversión (ROI)

Inversión inicial del Supper Caddy 3:

$$C_{inv} = 4.500.000 \text{ CLP}$$

$$ROI = \frac{B_{neto}}{C_{inv}} \times 100\% = \frac{87.030.000}{4.500.000} \times 100\% \approx 1.934\%$$

Es decir, el beneficio neto anual es aproximadamente 19 veces la inversión inicial (≈ 1.934 % de retorno anual).

5.4.2 Periodo de recuperación (payback)

$$\text{Payback} = \frac{C_{inv}}{B_{neto}} = \frac{4.500.000}{87.030.000} \approx 0,052 \text{ a}$$

0,052 años equivalen aproximadamente a:

- $0,052 \times 12 \approx 0,62$ meses
- $0,052 \times 365 \approx 19$ días

Es decir, la inversión en el sistema de micro-filtrado se recupera en torno a 3 semanas de operación, bajo los supuestos adoptados.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusión:

El estudio demuestra que la contaminación del aceite hidráulico es la causa principal de las fallas recurrentes del cabezal Waratah HTH622B. El equipo trabaja a altas presiones ($\approx 310\text{--}350$ bar) y en un ambiente muy sucio (barro, humedad, polvo, corteza), lo que acelera el desgaste de bombas, válvulas, motores y cilindros. La pauta actual de mantenimiento, basada solo en cambios de aceite y filtros por horas, resulta insuficiente, porque nunca se renueva todo el volumen de aceite (queda fluido contaminado en líneas y cabezal) y no se controla de forma sistemática el nivel de limpieza mediante análisis de aceite. La filtración convencional (filtros de 10 y 5 μm) no logra retener las partículas más finas (1–3 μm), que son justamente las que más dañan los componentes de precisión. Frente a esto, la incorporación de un sistema de microfiltrado off-line con Supper Caddy 3, junto con un plan de mantenimiento basado en condición (análisis de aceite cada 1.000 h y microfiltrado cada 2.000 h), permite mejorar la clase de limpieza del fluido, reducir la tasa de fallas hidráulicas estimada de 12 a alrededor de 4 fallas anuales y aumentar la disponibilidad del equipo.

Desde el punto de vista económico, la disminución de fallas y de horas de detención, sumada al mejor uso del aceite hidráulico, hace que la inversión en microfiltrado tenga un periodo de recuperación muy corto y aporte un beneficio claro para la operación forestal. Con esto, se cumple el objetivo general del trabajo: proponer y justificar un plan de mantenimiento preventivo, apoyado en microfiltrado y análisis de aceite, que mejore la confiabilidad y rentabilidad del cabezal Waratah HTH622B.

Recomendaciones:

- Implementar formalmente el microfiltrado off-line con unidad Supper Caddy 3 e incorporarlo a la pauta de mantenimiento como tarea fija cada 2.000 horas, con procedimiento claro y responsable definido.
- Establecer un programa sistemático de análisis de aceite cada 1.000 horas, tomando muestras en puntos que representen el aceite que realmente alimenta al cabezal (no solo el estanque), y usar esos resultados para decidir acciones de mantenimiento por condición.
- Definir metas internas de limpieza (ISO 4406) y umbrales de acción, de manera que, al superar ciertos niveles de partículas, agua o metales de desgaste, se activen medidas como microfiltrado adicional, cambios de filtros o inspecciones específicas.
- Mejorar las prácticas de manipulación del aceite y de trabajo en terreno, capacitando a operadores y mecánicos en control de contaminación (limpieza en llenado, manejo de tambores, conexiones, purga, protección de mangueras, etc.).
- Registrar sistemáticamente las fallas hidráulicas y los tiempos de detención, construyendo una base de datos que permita seguir indicadores de confiabilidad (fallas/año, MTBF, disponibilidad) y ajustar el plan de mantenimiento según los resultados reales.
- Evaluar la extensión del esquema de microfiltrado y mantenimiento basado en condición a otros cabezales y equipos hidráulicos críticos de la flota, priorizando aquellos con mayores horas de operación y costos de detención.
- Desarrollar monitoreo y estudios complementarios a largo plazo, validando con datos reales la mejora en limpieza, la reducción de fallas y el impacto económico, e incorporando si es viable tecnologías adicionales (por ejemplo, sensores de partículas en línea o sistemas de eliminación de agua).

BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE LA INFORMACIÓN

- Ahlm, J., & Nilsson Harrelind, B. (2024). *Built-in contaminations in hydraulic systems: Investigating the influence of internal processes in an industrial production facility* (Master's thesis, Jönköping University, School of Engineering). Jönköping University. ([Uppsatser](#))
- Chuchuca Ajila, K. A., & Rodas Jadan, E. M. (2020). *Diagnóstico del fluido hidráulico de la maquinaria pesada utilizada por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Azuay, mediante el conteo de partículas, para determinar su estado* (Tesis de grado). Universidad Politécnica Salesiana. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19421> ([Repositorio Institucional UPS](#))
- Esposito, A. (2009). *Fluid power with applications* (7th ed.). Pearson. ([Google Libros](#))
- Fitch, E. C. (1988). *Fluid contamination control*. FES, Inc.
- Fitch, E. C. (2013). *Proactive maintenance for mechanical systems* (5th ed.). Elsevier.
- Hindman, J., Burton, R., & Schoenau, G. (2002). Condition monitoring of fluid power systems: A survey. *SAE Transactions: Journal of Commercial Vehicles*, 111(2), 69–75. <https://doi.org/10.4271/2002-01-1351> ([SAE International](#))
- International Organization for Standardization. (2021). *ISO 4406:2021: Hydraulic fluid power—Fluids—Method for coding the level of contamination by solid particles*. ISO. ([ISO](#))
- Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012> ([ScienceDirect](#))
- Máchal, P., Majdan, R., Tkáč, Z., Stančík, B., Abrahám, R., Štulajter, I., et al. (2013). Design and verification of additional filtration for the application of ecological transmission and hydraulic fluids in tractors. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 61(5), 1305–1311. <https://doi.org/10.11118/actaun201361051305> (acta.mendelu.cz)

Parr, A. (2011). *Hydraulics and pneumatics: A technician's and engineer's guide* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann. ([ScienceDirect](#))

Singh, M., Lathkar, G. S., & Basu, S. K. (2012). Failure prevention of hydraulic system based on oil contamination. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 93(3), 269–274.

<https://doi.org/10.1007/s40032-012-0032-2> ([ResearchGate](#))

Stecki, J. (2006). Contamination control and failure analysis. En R. M. Gresham & G. E. Totten (Eds.), *Lubrication and maintenance of industrial machinery: Best practices and reliability* (pp. 1–57). CRC Press. ([ORBilu](#))

Zhang, R., Yu, X., Hu, Y., Zang, H., & Shu, W. (2018). Active control of hydraulic oil contamination to extend the service life of aviation hydraulic system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96, 1693–1704. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1536-x>

ANEXOS