

Desarrollo de un Plan de Mantenimiento mediante la Técnica FMEA para Minimizar las Fallas  
en el Sistema Hidráulico Principal de una Excavadora 320 DL

José Dario Roso Sierra

Trabajo de Grado para Optar al Título de Especialista en Gerencia de Mantenimiento

Director

William Pinto Hernández

PhD en Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Especialización en Gerencia de Mantenimiento

Bucaramanga

2025

### **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a mi familia, por su amor incondicional, paciencia y apoyo constante en cada etapa de mi vida académica y profesional. A mis padres, que con su ejemplo me enseñaron la importancia de la perseverancia y el esfuerzo, y a quienes siempre han creído en mis capacidades y sueños.

A mi novia, quien ha sido mi compañera incondicional, brindándome su apoyo, comprensión y motivación en cada momento. Su amor y confianza en mí han sido una fuente invaluable de inspiración y fortaleza durante todo este proceso.

También dedico este logro a mis amigos y colegas, quienes han estado presentes y me han impulsado a seguir adelante en los momentos más desafiantes. A todos ellos, gracias por ser parte fundamental de este camino.

### **Agradecimientos**

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que contribuyeron de manera significativa al desarrollo de este proyecto. También deseo reconocer a la Universidad Industrial de Santander por brindarme los recursos y el entorno académico necesario para llevar a cabo este trabajo. Mi gratitud se extiende al equipo de técnicos y operarios, quienes colaboraron en la recolección de datos del sistema hidráulico de la excavadora, así como a los proveedores de literatura técnica que facilitaron materiales esenciales para este análisis.

Finalmente, agradezco a mis compañeros y familia por su constante ánimo y motivación, que fueron una fuente de fortaleza durante este proceso. Su apoyo incondicional fue crucial para la culminación exitosa de este proyecto.

**Tabla de contenido**

Introducción .....	13
1. Planteamiento del Problema .....	15
2. Objetivos .....	16
2.1. Objetivo General .....	16
2.2. Objetivos Específicos.....	16
3. Justificación .....	17
4. Marco Teórico.....	19
4.1. Excavadoras Hidráulicas.....	19
4.1.1. Sistemas Hidráulicos.....	20
4.1.2. Sistema de transmisión .....	21
4.1.3. Sistema de giro.....	21
4.1.4. Sistema de control.....	21
4.1.5. Sistema de implementos .....	22
4.2. Mantenimiento Industrial.....	22
4.3. Mantenimiento FMEA .....	23
4.3.1. Fallas funcionales.....	23
4.3.2. Modos de falla.....	23
4.3.3. Consecuencias de falla.....	24
4.3.4. Aplicación del FMEA .....	24
4.3.4.1. Definir el alcance de análisis .....	24
4.3.4.2. Realizar análisis funcional .....	24

4.3.4.3.	Identificar modos de falla .....	24
4.3.4.4.	Determinar efectos de los modos de falla .....	24
4.3.4.5.	Asignación prioridad con el número de prioridad de riesgo (RPN) .....	25
4.3.4.6.	Proponer acciones .....	25
4.3.4.7.	Implementar el plan de mantenimiento.....	25
4.3.4.8.	Monitorear y revisar resultados .....	25
5.	Marco Legal .....	25
6.	Diagnóstico del equipo .....	26
6.1.	Definición de taxonomía sistema hidráulico principal .....	26
6.2.	Funciones sistema hidráulico principal.....	28
6.3.	Especificaciones sistema hidráulico principal .....	29
6.3.1.	Componentes sistema hidráulico principal .....	29
6.3.2.	Válvula de Alivio.....	31
6.3.3.	Control de Flujo (NFC).....	31
6.3.4.	Bomba de mando .....	32
6.3.5.	Bomba de mínima.....	32
6.4.	Definición de la frontera .....	32
7.	Análisis de causas de las fallas .....	33
8.	Metodología .....	36
8.1.	Escalas de evaluación .....	37
8.2.	Definición de actividades.....	37
8.3.	Programa de mantenimiento .....	39
8.4.	Indicadores de desempeño (KPIs) para el plan de mantenimiento Preventivo.....	41

8.4.1.	Tiempo de Inactividad por Fallas (TDF) .....	42
8.4.2.	Cumplimiento del Programa de Mantenimiento (CPM).....	42
8.4.3.	Frecuencia de Fallas (FF).....	43
9.	Conclusiones .....	43
10.	Recomendaciones .....	44
	Referencias Bibliográficas .....	45

**Lista de Tablas**

Tabla 1 <i>Mantenimiento establecido por el fabricante.</i> .....	26
Tabla 2 <i>Función, falla funcional, modos de falla y descripción de efectos del sistema hidráulico principal.</i> .....	34
Tabla 3 <i>Escala de evaluación.</i> .....	37
Tabla 4 <i>Hoja de decisión donde se incorpora el análisis de falla, efectos y diagrama de Ishikawa</i> .....	37
Tabla 5 <i>Programa de mantenimiento.</i> .....	39

**Lista de Figuras**

Figura 1 <i>Excavadora 320 DL Caterpillar</i> .....	20
Figura 2 <i>Sistema hidráulico de la excavadora 320 DL</i> .....	28
Figura 3 <i>Diagrama de un Sistema hidráulico</i> .....	29
Figura 4 <i>Componentes de Sistema Hidráulico Principal.</i> .....	30
Figura 5 <i>Sistema hidráulico de retorno.</i> .....	31
Figura 6 <i>Diagrama Ishikawa.</i> .....	34

**Lista de Ecuaciones**

Ecuación 1 <i>Fórmula para evaluación</i> .....	37
Ecuación 2 <i>Fórmula para medir el tiempo de inactividad por fallas TDF</i> .....	42
Ecuación 3 <i>Fórmula para el cumplimiento del programa de mantenimiento CPM</i> .....	42
Ecuación 4 <i>Fórmula para la frecuencia de fallas FF</i> .....	43

## Glosario

**FMEA:** Análisis de Modos y Efectos de Fallas, técnica para identificar y priorizar fallas potenciales en sistemas y mejorar la confiabilidad a través de acciones preventivas.

**Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM):** Estrategia de mantenimiento orientada a maximizar la confiabilidad operativa mediante la identificación de funciones críticas y la implementación de prácticas de mantenimiento específicas.

**Mantenimiento preventivo:** Conjunto de acciones planificadas para conservar un equipo en condiciones óptimas, evitando la ocurrencia de fallas inesperadas.

**Mantenimiento predictivo:** Estrategia basada en la monitorización continua de los equipos para anticipar fallas y realizar intervenciones antes de que ocurran problemas.

**Modo de falla:** Situación específica que causa que un componente o sistema no cumpla con su función esperada.

**Sistema hidráulico:** Conjunto de componentes que utiliza fluidos bajo presión para realizar movimientos y operaciones en maquinaria pesada.

**Vida útil:** Duración esperada de funcionamiento óptimo de un equipo o componente antes de requerir reemplazo o reparación significativa.

## Resumen

**Título:** Desarrollo de un Plan de Mantenimiento mediante la Técnica FMEA para Minimizar las Fallas en el Sistema Hidráulico Principal de una Excavadora 320 DL\*

**Autor:** Jose Dario Roso Sierra\*\*

**Palabras Clave:** FMEA, mantenimiento preventivo, sistema hidráulico, análisis de fallas, confiabilidad, maquinaria pesada, plan de mantenimiento.

**Descripción:** Este proyecto crea un plan de mantenimiento preventivo para el sistema hidráulico de la excavadora 320 DL empleando el análisis de modos y efectos de fallas (FMEA). Este sistema es de gran importancia en la ejecución de tareas de construcción, como excavación y manejo de materiales; sin embargo, está sujeto a desgaste y daños por factores ambientales, lo que puede provocar fallas funcionales que afectan la productividad y la seguridad. Los modos de falla más identificados en el análisis FMEA, y por tanto las causas más comunes, incluyen la contaminación del aceite, el cambio irregular de filtros y las influencias ambientales de polvo o humedad. Las recomendaciones desarrolladas incluyen la limpieza diaria y la capacitación del personal en buenas prácticas. Este programa ayuda a minimizar las fallas imprevistas, asegura una operación de la maquinaria más confiable y eficiente, permite una vida útil óptima de la maquinaria y hace que las operaciones sean más seguras.

\*\*

---

\*Trabajo de Grado

\*\*Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Director: William Pinto Hernández. PhD en Ingeniería Mecánica.

### Abstract

**Title:** Development of a Maintenance Plan Using the FMEA Technique to Minimize Failures in the Main Hydraulic System of a 320 DL Excavator

**Author(s):** Jose Dario Roso Sierra

**Key Words:** FMEA, preventive maintenance, hydraulic system, failure analysis, reliability, heavy machinery, maintenance plan.

**Description:** This project develops a preventive maintenance plan for the hydraulic system of the 320 DL excavator using Failure Modes and Effects Analysis (FMEA). This system is essential for performing construction tasks such as excavation and material handling; however, it is susceptible to wear and environmental factors that may cause functional failures, impacting productivity and safety. The FMEA analysis identified the most frequent failure modes and causes, including oil contamination, irregular filter changes, and environmental exposure to dust and humidity. Recommendations include daily cleaning and personnel training in best practices. This plan helps reduce unexpected failures, ensures more reliable and efficient machine operation, optimizes the machine's lifespan, and enhances operational safety.

††

---

\* Degree Work

\*\*Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Specialization in Maintenance Management. Advisor: Dr. William Pinto Hernández, PhD in Mechanical Engineering.

## Introducción

Las grandes infraestructuras en el mundo han requerido grandes maquinarias que han permitido el movimiento, arrastre y ensamble de elementos extremadamente pesados aportando un elevado nivel de precisión y agilidad para cumplir los objetivos de construcción y desarrollo mundiales. Cada obra requiere material y maquinarias específicas para su realización, así como la mano de obra, ya que la construcción es uno de los sectores económicos que más generan empleo (Rolong Nieto, 2012);

El análisis del sistema hidráulico en maquinaria pesada, como la excavadora 320 DL, resulta esencial para optimizar su rendimiento y minimizar tiempos de inactividad en proyectos de construcción. Dada su importancia en diversas aplicaciones, desde la excavación hasta el movimiento de materiales, el adecuado funcionamiento del sistema hidráulico es crítico para la eficiencia operativa y la seguridad. Sin embargo, la naturaleza compleja de estos sistemas implica que pueden presentarse múltiples modos de falla, cada uno con consecuencias específicas que afectan la productividad y el estado de los equipos.

Este documento se enfoca en identificar y analizar los modos de falla más frecuentes en el sistema hidráulico de la excavadora 320 DL, y propone soluciones técnicas para cada caso. Mediante un enfoque basado en el análisis de fallos y efectos (FMEA, por sus siglas en inglés), se destacan las principales causas que interrumpen el flujo de aceite y afectan la operatividad de los implementos. Cada modo de falla se detalla con sus respectivos efectos sobre el equipo, permitiendo entender cómo problemas como la falta de flujo, el desgaste de componentes y las obstrucciones pueden reducir la eficiencia y la vida útil del sistema hidráulico.

A partir de esta evaluación, se presentan recomendaciones orientadas a mejorar el mantenimiento preventivo y a reducir el impacto de las fallas en el rendimiento general de la máquina. Este enfoque no solo contribuye a prolongar la vida útil del equipo, sino que también facilita la implementación de prácticas de mantenimiento predictivo y correctivo, promoviendo una operación segura y rentable en proyectos donde se emplee la excavadora 320 DL.

## 1. Planteamiento del Problema

En el sector de la construcción, las excavadoras son esenciales por su versatilidad y capacidad para realizar diversas tareas cruciales. Desde la excavación de zanjas para infraestructuras subterráneas hasta la nivelación del terreno previa a la construcción, estas máquinas también son eficaces en la manipulación de grandes volúmenes de tierra y en la demolición controlada de estructuras. Equipadas con accesorios especializados como martillos hidráulicos y diferentes tipos de cucharas, las excavadoras se adaptan a una amplia variedad de proyectos, siendo el sistema hidráulico de las excavadoras crucial para el óptimo funcionamiento de la máquina; sin embargo, la operatividad se ve afectada debido a fallas en este sistema. Dichas fallas pueden provocar tiempos de inoperatividad prolongados, costos elevados de reparación y mantenimiento, y una disminución en la productividad general de las operaciones (Cañón Buitrago y otros, 2023). Además, estos problemas pueden ocasionar un desgaste prematuro de componentes críticos y un aumento en el consumo de combustible.

En este contexto, para controlar las fallas se debe acudir a un plan de mantenimiento que permita no solo identificar sus causas, sino que proporcione herramientas para mitigarlas y promover el buen desempeño de la maquinaria, conservando el margen de costos y la productividad de la operación.

## **2. Objetivos**

### **2.1.Objetivo General**

Diseñar un plan de mantenimiento preventivo mediante la técnica FMEA para optimizar el rendimiento del sistema hidráulico principal de una excavadora 320 DL, abordando de manera efectiva las causas y modos de falla identificados para garantizar una mayor disponibilidad y prolongar la vida útil de la maquinaria.

### **2.2.Objetivos Específicos**

Identificar las fallas funcionales o modos de falla en el sistema hidráulico de la excavadora 320 DL a través de la observación y análisis de sus condiciones operativas, para conocer los problemas recurrentes y comprender cómo afectan la operatividad de la maquinaria.

Determinar las causas que generan las fallas en el sistema hidráulico mediante un análisis de causa raíz que evalúe el origen de estos problemas, para implementar soluciones que mejoren el rendimiento del sistema.

Establecer un plan de mantenimiento preventivo basado en la técnica FMEA, que permita identificar y priorizar las fallas funcionales o modos de falla del sistema, para prolongar la vida útil de la excavadora.

### 3. Justificación

El sistema hidráulico de la excavadora 320DL es un componente fundamental para el óptimo rendimiento en operaciones de construcción. Su funcionamiento eficiente permite el control preciso de implementos clave como los cilindros y motores, esenciales para tareas de excavación, desplazamiento y carga de materiales. Sin embargo, la complejidad de este sistema y su exposición a condiciones de operación exigentes aumentan el riesgo de fallas funcionales que afectan la productividad, incrementan los costos de mantenimiento y reducen la vida útil del equipo (León Losada, 2022).

La aplicación de un plan de mantenimiento basado en el análisis de modos y efectos de fallas (FMEA) proporciona una metodología estructurada para identificar y priorizar las causas de fallas en el sistema hidráulico. Este enfoque permite tomar acciones preventivas y correctivas específicas que mejoran la confiabilidad del sistema, reducen el tiempo de inactividad y optimizan los costos operativos (Lozano Rivera, 2023). Además, Caterpillar, como fabricante, destaca la importancia de mantener la presión y el flujo del sistema hidráulico mediante la realización de mantenimientos regulares, lo que incrementa la eficiencia y asegura la continuidad de las operaciones (Caterpillar, 2019).

La implementación de soluciones detalladas para cada modo de falla, mantenimiento preventivo regular y análisis de calidad del aceite hidráulico, fortalece la capacidad del equipo para operar de manera continua y segura (León Losada, 2022). Este análisis no solo se orienta a resolver fallas existentes, sino que también anticipa problemas potenciales, promoviendo una cultura de mantenimiento proactivo. Al reducir el impacto de las fallas, se mejora la eficiencia de la excavadora 320DL, se minimizan los riesgos de accidentes por fallos inesperados y se garantiza

un entorno de trabajo seguro y productivo (Lozano Rivera, 2023; León Losada, 2022). En última instancia, un sistema hidráulico robusto y bien mantenido eleva el valor de los activos de la empresa y asegura el cumplimiento de los plazos y la calidad en los proyectos de construcción.

Además de ser un componente crítico para garantizar el rendimiento óptimo de las operaciones de construcción, el sistema hidráulico de la excavadora Caterpillar 320DL presenta características que justifican el uso de la técnica FMECA para su análisis y mejora. Este método permite no solo identificar modos de falla, sino también priorizarlos en función de su criticidad, lo cual es esencial en sistemas complejos expuestos a condiciones severas de operación, como altas cargas, polvo y humedad. La técnica FMECA se seleccionó por su enfoque estructurado y su capacidad para identificar riesgos, mitigar consecuencias de fallas y prolongar la vida útil del sistema, reduciendo así los costos operativos y los tiempos de inactividad.

La selección de la excavadora Caterpillar 320DL responde a su amplia utilización en proyectos de construcción y minería, donde su sistema hidráulico garantiza tareas esenciales como excavación, transporte de materiales y nivelación de terrenos. La criticidad de este equipo en la producción se evidencia en su impacto directo en la continuidad operativa y la eficiencia de los proyectos, ya que una falla podría detener las actividades, incrementar costos y afectar cronogramas. En este análisis, se considera que varias unidades similares están en operación, lo que refuerza la importancia de establecer un plan de mantenimiento preventivo replicable que asegure la fiabilidad de toda la flota.

## **4. Marco Teórico**

La maquinaria pesada está conformada por una serie de equipos usados en obras, como en el sector petrolero, minero, civil, energético entre otras, las excavadoras son usadas para remover, modificar parte de la capa del suelo y desplazar carga en proyectos de ingeniería, se selecciona el tipo de excavadora según el tipo de suelos, algunos de estos equipos pueden ser excavadoras, retroexcavadoras o motoniveladoras y se detallan a continuación.

### **4.1. Excavadoras Hidráulicas**

Teniendo en cuenta su definición bajo la norma UNE-EN se puede expresar como una máquina autopropulsada, puede ser bajo ruedas, cadenas o patas, con la capacidad de efectuar giros comúnmente de 360°, cumpliendo la función de excavar por medio de una cuchara, tal como se muestra en la figura 1, sin que la máquina tenga la necesidad de desplazarse durante un ciclo de trabajo completos sin necesidad de desplazarse, aumentando su eficiencia y versatilidad.

La excavadora Caterpillar 320 DL es un ejemplo de maquinaria pesada de este tipo, reconocida por su rendimiento en operaciones exigentes. Este equipo cuenta con sistemas hidráulicos avanzados que facilitan la excavación, el movimiento de materiales y otras tareas esenciales. Su diseño robusto y su tecnología avanzada garantizan alta productividad, incluso en condiciones de operación adversas, como terrenos irregulares o ambientes con altas cargas de trabajo.

**Figura 1**

*Excavadora 320 DL Caterpillar*



Tomado de Kellytractor. Caterpillar [PDF]. Retrieved from [https://www.kellytractor.com/esp/imagenes/pdf/demolicion\\_desechos/excavadoras/320d-320dl.pdf](https://www.kellytractor.com/esp/imagenes/pdf/demolicion_desechos/excavadoras/320d-320dl.pdf)

#### ***4.1.1. Sistemas Hidráulicos***

Los sistemas hidráulicos utilizan fluidos para propulsar cualquier máquina utilizando presión. Son utilizados entre otros, en maquinarias para construcción, vehículos y en el tratamiento del acero. Los componentes de los sistemas hidráulicos están clasificados así: primero, los generadores de presión; segundo, los sistemas de mando compuestos por válvulas; y tercero, los actuadores como cilindros y motores (Martínez & Rodríguez, 2018).

#### ***4.1.2. Sistema de transmisión***

El sistema de transmisión convierte la potencia generada por el motor en movimiento. Incluye motores hidráulicos independientes para cada oruga, reductores de velocidad y cadenas de tracción. Estas cadenas están diseñadas para desplazarse sobre terrenos irregulares, proporcionando estabilidad y tracción óptimas. Este sistema asegura que la excavadora pueda operar eficientemente en condiciones extremas y sobre terrenos difíciles.

#### ***4.1.3. Sistema de giro***

Este sistema permite a la superestructura de la excavadora girar 360°, lo que facilita operaciones sin necesidad de reposicionar el equipo. Está compuesto por un motor de giro, un engranaje de giro y un anillo dentado con rodamientos. Esta configuración permite movimientos suaves y precisos durante las tareas de excavación o carga.

#### ***4.1.4. Sistema de control***

La cabina del operador cuenta con controles ergonómicos, pantallas de monitoreo y sistemas electrónicos para facilitar el manejo de la máquina. Los joysticks y pedales permiten controlar movimientos precisos de los implementos y la tracción, mientras que el sistema de control electrónico monitorea variables críticas como presión hidráulica y temperatura del motor.

#### ***4.1.5. Sistema de implementos***

Los implementos son herramientas intercambiables que permiten realizar diversas tareas. Entre los más comunes se encuentran la cuchara (bucket) para excavación, martillos hidráulicos para demolición y pinzas para manipulación de materiales. Estos implementos amplían la versatilidad del equipo.

### **4.2.Mantenimiento Industrial**

Actualmente, el mantenimiento industrial es una parte esencial de los procesos productivos, ya que contribuye a minimizar u optimizar su desarrollo. Además, es crucial reducir las fallas y averías en los sistemas involucrados tanto en el mantenimiento como en la producción, lo cual se refleja directamente en los costos y los ingresos de la industria. El mantenimiento es una estrategia compuesta por diversas etapas y actividades destinadas a mantener un servicio, sistema o equipo en un estado óptimo. Esta estrategia busca mejorar sustancialmente los procesos y enfatiza la calidad como una táctica clave en la gestión del mantenimiento. (Gutiérrez et al., 2023).

El mantenimiento exige actividades de inspección periódicas, de prevención, que puede ser sistemático o condicional; y de corrección, como reparaciones y cambios de piezas en las máquinas (Díaz, 2004).

El propósito de un mantenimiento adecuado es la óptima disponibilidad de la maquinaria, la reducción de los costos, conservar la seguridad de los trabajadores y procesos asociados al sistema hombre-máquina, entre otros (Díaz, 2004).

### **4.3.Mantenimiento FMEA**

El FMEA, Failure Modes and Effects Analysis por sus siglas en inglés o Análisis de Modos y Efectos de Fallos, permite planificar la calidad analizando y sistematizando el proceso, para identificar y eliminar problemas potenciales (USAL, 2024).

El objetivo principal es priorizar las formas de fallas según su criticidad y desarrollar acciones correctivas y preventivas para reducir o eliminar los riesgos asociados. Estos modos hacen referencia a las situaciones que pueden originar la falla funcional y se clasifican así: primero, la capacidad por debajo del funcionamiento deseado debido a su deterioro; segundo, las fallas de lubricación, suciedad, desarme y errores humanos; y tercero, operación con sobrecarga constantemente (Martínez & Rodríguez, 2018).

#### ***4.3.1. Fallas funcionales***

Las fallas son situaciones que impiden que un activo físico opere según lo esperado por los usuarios, es decir, alteran su funcionamiento estándar. Estas se denominan fallas funcionales, ya que afectan la capacidad del activo para cumplir su función dentro de parámetros aceptables. Las fallas pueden ser evidentes, cuando se detectan de inmediato mediante alarmas o señales, u ocultas, si no son perceptibles para el personal operativo en el momento en que ocurren. Sin embargo, a través de tareas de ingeniería, es posible hacer visibles las fallas ocultas.

#### ***4.3.2. Modos de falla***

Los efectos de las fallas muestran las consecuencias directas que tiene un modo de falla sobre el activo, el sistema y el entorno, afectando su rendimiento, la seguridad de los operadores y la continuidad de la operación. Este análisis detallado permite tomar decisiones informadas sobre las estrategias de mantenimiento y mitigación necesarias para reducir.

### ***4.3.3. Consecuencias de falla***

Las consecuencias de la falla son los impactos que los modos de falla generan sobre el activo, afectando la operación, la seguridad, además de los costos asociados tanto por la interrupción de la producción como por el mantenimiento requerido para restablecer la disponibilidad. y confiabilidad del equipo. La evaluación de estas consecuencias debe realizarse suponiendo que no se ha implementado ninguna tarea preventiva o de detección, para anticipar de mane.

### ***4.3.4. Aplicación del FMEA***

La aplicación del FMEA en el sistema hidráulico de la excavadora Caterpillar 320DL sigue los pasos descritos a continuación:

#### ***4.3.4.1. Definir el alcance de análisis***

Identificar el sistema hidráulico principal como objeto de análisis.

Delimitar los componentes clave como bombas y válvulas.

#### ***4.3.4.2. Realizar análisis funcional***

Identificar y describir las funciones principales del sistema hidráulico, como generar flujo y presión, y permitir el movimiento de implementos

#### ***4.3.4.3. Identificar modos de falla***

Documentar los posibles modos de falla para cada componente, como fugas en válvulas o desgaste en bombas

#### ***4.3.4.4. Determinar efectos de los modos de falla***

Evaluar las consecuencias directas de cada falla en la operación del equipo, priorizando aquellas que afectan la seguridad y la productividad.

#### ***4.3.4.5. Asignación prioridad con el número de prioridad de riesgo (RPN)***

Calcular el RPN usando la fórmula:  $RPN = Frecuencia \times Severidad \times Detección$ .

Clasificar las fallas en alta, media o baja prioridad según los valores calculados.

#### ***4.3.4.6. Proponer acciones***

Diseñar estrategias específicas, como cambios programados de aceite, inspecciones visuales y limpieza de componentes.

#### ***4.3.4.7. Implementar el plan de mantenimiento***

Incluir las actividades propuestas en el cronograma de mantenimiento. Y Establecer frecuencias adecuadas para cada tarea.

#### ***4.3.4.8. Monitorear y revisar resultados***

Utilizar indicadores de desempeño como el Tiempo de Inactividad por Fallas (TDF) y la Frecuencia de Fallas (FF).

## **5. Marco Legal**

Dentro del marco legal para la legislación sobre mantenimiento de equipo en Colombia, hay algunas normas como el convenio sobre seguridad y salud en la construcción No 167 (Minsalud, Biblioteca digital. , 1993) y el decreto 1769 de 1994 que trata, entre otras cosas, sobre el mantenimiento a equipos (Minsalud, 1994).

## 6. Diagnóstico del equipo

La excavadora CAT 330 DL cuenta con un programa de mantenimiento preventivo basado en las horas de uso recomendadas por el fabricante. Adicionalmente, como parte de los protocolos de mantenimiento, el operador llena un registro diario de información pre-operacional.

Son cuatro las rutinas llevadas: la revisión diaria, revisión cada 50 horas, cada 1000 horas y cada 2000 horas, tal como se describe en la tabla 1.

**Tabla 1**

*Mantenimiento establecido por el fabricante.*

<b>Frecuencia</b>	<b>Actividad</b>
Diariamente	Verificar el nivel de fluido en el tanque hidráulico. Identificar posibles fugas de aceite. Revisar los émbolos de los cilindros en busca de ralladuras. Comprobar el nivel de lubricante en el reductor de giro.
Cada 50 horas	Verificar el nivel de aceite del sistema hidráulico.
Cada 1000 horas	Cambiar el filtro de retorno de aceite del sistema hidráulico. Cambiar el filtro piloto de aceite del sistema hidráulico. Reemplazar el filtro de la caja de drenaje de aceite del sistema hidráulico Comprobar el nivel de aceite de los mandos finales.
Cada 2000 horas	Cambiar el aceite del sistema hidráulico Cambiar el aceite de los mandos finales

### 6.1. Definición de taxonomía sistema hidráulico principal

El sistema hidráulico principal suministra flujo de aceite mediante la bomba de mínima y la bomba de mando, las cuales controlan los siguientes componentes: el cilindro del balde, el cilindro del stick, los cilindros del boom, así como el motor de desplazamiento derecho e izquierdo

y el motor de giro. Ambas bombas, tanto la de mínima como la de mando, son del tipo axial con pistones curvados y tienen un rendimiento igual.

La bomba de mando se encuentra acoplada al motor mediante un acople flexible, permitiendo así el suministro de aceite al cuerpo de la válvula de control izquierda, que es parte integral de la válvula de control principal. La bomba de mínima está interconectada mecánicamente a la bomba de mando a través de un sistema de engranajes, y su función es proporcionar aceite al cuerpo de la válvula de control derecha, también perteneciente a la válvula de control principal. Ambas bombas están equipadas con engranajes que poseen un número de dientes idéntico, garantizando así que operen a la misma velocidad que el motor.

La bomba piloto, que opera como una bomba de engranajes, es responsable de suministrar aceite al sistema hidráulico piloto y está conectada a la bomba de mínima a través de un conjunto de engranajes. Complementariamente, la bomba del ventilador, que también es una bomba de engranajes, se encarga de proporcionar aceite al sistema de refrigeración y está conectada mecánicamente al motor mediante engranajes. La potencia generada por el motor diésel es utilizada para accionar estas bombas. Durante el funcionamiento, al incrementarse la presión de carga, las bombas principales ajustan su entrega aumentando la presión y reduciendo simultáneamente el caudal, manteniendo constante la potencia hidráulica, que se aproxima a la potencia del motor.

En estado de reposo, el aceite de la bomba circula a través de la válvula de control principal y se retorna al depósito hidráulico. La válvula de control principal emite una señal de control de flujo negativo hacia cada regulador de bomba principal, permitiendo una apertura máxima de la bomba con un flujo de salida mínimo. Durante las operaciones, la válvula de control principal dirige el aceite desde las bombas hacia los cilindros (boom, bucket o stick) y/o motores (giro y

traslación). Para ello, la válvula de control principal está dotada de múltiples vástagos, pasos, válvulas y orificios, lo que permite la ejecución de operaciones combinadas. La presión de trabajo del sistema hidráulico principal se regula mediante la válvula de alivio principal, y el flujo de aceite hacia los implementos se gestiona a través de mangueras diseñadas específicamente para soportar las condiciones de presión y temperatura presentes en el circuito.

## Figura 2

*Sistema hidráulico de la excavadora 320 DL*



Nota: Tomado de Topodata. (2019). Maquinaria pesada [PDF]. <https://topodata.com/wp-content/uploads/2019/09/Maquinas-Pesadas-USO.pdf>

En la figura 2 se observan los componentes del sistema hidráulico de una excavadora, de los cuales se identifica los cilindros en la pluma, brazo y cucharón, igualmente se identifica el área donde se localizan las bombas del sistema.

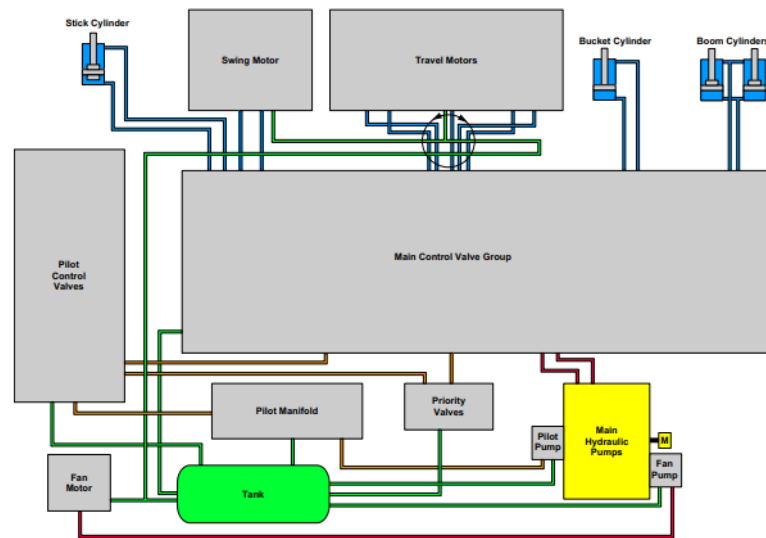
### 6.2. Funciones sistema hidráulico principal

Este sistema regula la distribución del flujo de aceite de ambas bombas principales hacia la válvula de mando principal, la cual dirige el aceite a varios actuadores fundamentales para el funcionamiento del equipo. Entre estos actuadores se incluyen el cilindro del cucharón (bucket),

el cilindro de la pluma (stick), los cilindros de los brazos (boom), así como los motores de desplazamiento derecho (travel right) e izquierdo (travel left), y el motor de giro (swing). Esta configuración permite un control efectivo y coordinado de las diferentes funciones operativas de la máquina. En la figura 3 se puede observar un sistema hidráulico estándar.

### Figura 3

#### *Diagrama de un Sistema hidráulico*



Nota: Tomado de Topodata. (2019). Maquinaria pesada [PDF]. <https://topodata.com/wp-content/uploads/2019/09/Maquinas-Pesadas-USO.pdf>

### 6.3.Especificaciones sistema hidráulico principal

Las generalidades del sistema hidráulico principal se describen a continuación.

#### *6.3.1. Componentes sistema hidráulico principal*

Las bombas principales, conformadas por la bomba de accionamiento y la bomba de mínima, están alojadas en una misma carcasa junto con la bomba piloto del sistema hidráulico

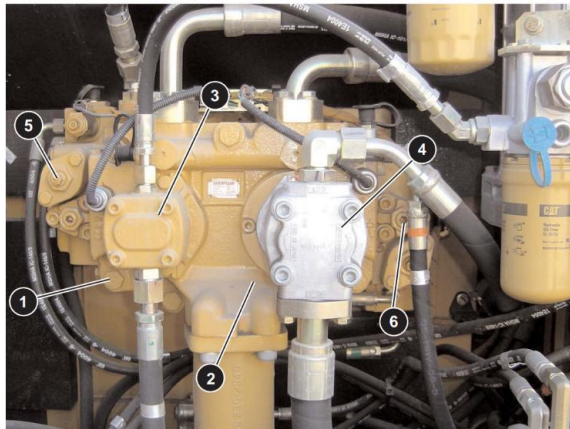
piloto. Tanto la bomba de accionamiento como la de mínima son idénticas en términos de diseño y funcionamiento.

El aceite procedente del tanque hidráulico circula hacia el cuerpo de cada bomba, y cada una cuenta con una línea de salida independiente. Además del flujo de aceite desde el tanque, las bombas principales reciben la presión de cambio de potencia, regulada por el controlador electrónico, y la presión de control de flujo negativo (NFC, Negative Flow Control), que se dirige desde la válvula principal a la bomba de mínima y a la bomba de mando.

Estas bombas son de tipo pistón axial curvado, lo cual define el movimiento angular del conjunto bomba-pistón. La salida de aceite de las bombas varía en función del ángulo de los cilindros. Un sello metálico permite mantener separados y aislados el aceite de entrada del aceite de salida. Los componentes se pueden observar en el sistema hidráulico de la figura 4.

#### Figura 4

*Componentes de Sistema Hidráulico Principal.*



*Nota:* Tomado de Topodata. (2019). *Maquinaria pesada* [PDF]. <https://topodata.com/wp-content/uploads/2019/09/Maquinas-Pesadas-USO.pdf>

Esta ilustración muestra los grupos de bombas hidráulicas principales. La bomba de transmisión (bomba derecha) (1) es accionada por el motor, mientras que la bomba loca (bomba

izquierda) (2) es accionada por la bomba de transmisión. La bomba piloto (3) está montada en la bomba de transmisión. La bomba de presión media (4) es accionada por la bomba loca.

### **6.3.2. *Válvula de Alivio***

Está ubicada en el lado izquierdo de la válvula de control principal y tiene la función de limitar la presión máxima de operación en el circuito hidráulico de desplazamiento y en el circuito hidráulico de implementos cuando la máquina se encuentra en condiciones de carga.

Las válvulas de chequeo aseguran que solo la presión de aceite más alta ya sea de la bomba de mínima o de la bomba de impulsión, llegue a la válvula de alivio principal, garantizando así un funcionamiento seguro y eficiente del sistema hidráulico.

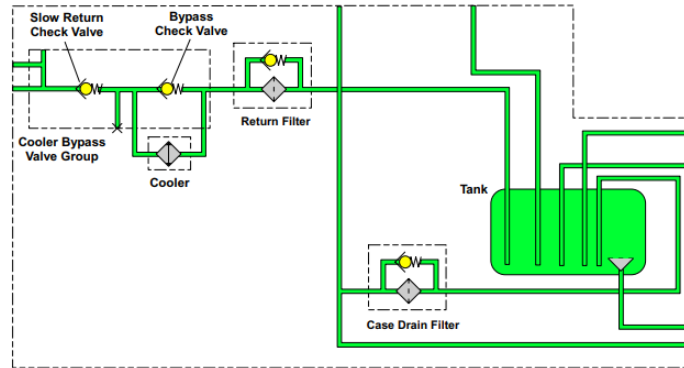
### **6.3.3. *Control de Flujo (NFC)***

La bomba loca y la bomba de transmisión reciben la señal de presión de aceite desde los conductos de derivación centrales de la válvula de control principal, generando la denominada presión de control de flujo negativo (NFC). Esta presión NFC se dirige a los reguladores de la bomba loca y de la bomba de mando, controlando el flujo de salida de cada bomba. La presión de control de flujo negativo se activa bajo condiciones operativas específicas de la máquina:

Todos los joysticks y pedales de desplazamiento se encuentran en posición neutral, permitiendo una operación de control de precisión. Durante la maniobra de descenso del boom sin activación de otros implementos.

## **Figura 5**

*Sistema hidráulico de retorno.*



*Nota: Tomado de Topodata. (2019). Maquinaria pesada [PDF]. <https://topodata.com/wp-content/uploads/2019/09/Maquinas-Pesadas-USO.pdf>*

#### **6.3.4. Bomba de mando**

La bomba de mando presenta un flujo de Salida de  $231 \pm 15$  L/min ( $61 \pm 4$  US gpm) y una presión entregada por la bomba: 9800 kPa (1421 psi). También una presión de cambio de potencia de  $2550 \pm 50$  kPa ( $370 \pm 7$  psi) y una velocidad de la bomba: 1800 RPM.

#### **6.3.5. Bomba de mínima**

La bomba mínima en cambio tiene un flujo de Salida de  $160 \pm 15$  L/min ( $42 \pm 4$  US gpm), una presión entregada por la bomba: 25500 kPa (3700 psi), una presión de cambio de potencia:  $2550 \pm 50$  kPa ( $370 \pm 7$  psi) y una velocidad de la bomba: 1800 rpm.

### **6.4. Definición de la frontera**

El sistema consta de las bombas principales de mínima y de mando, la válvula de control principal, y los conductos de flujo de aceite que interconectan la bomba con la válvula de control principal.

## 7. Análisis de causas de las fallas

Para realizar el análisis de causas de la falla en el sistema hidráulico se propone la utilización del diagrama de Ishikawa, el cual se presenta en la figura 6.

El diagrama de Ishikawa o la espina de pescado, es una herramienta analítica que permite identificar y clasificar las causas de un problema en categorías principales. En el caso de las fallas del sistema hidráulico de la excavadora 320 DL, se reconocen seis áreas clave: Mantenimiento, Materiales, Métodos, Maquinaria, Medio Ambiente y Mano de Obra.

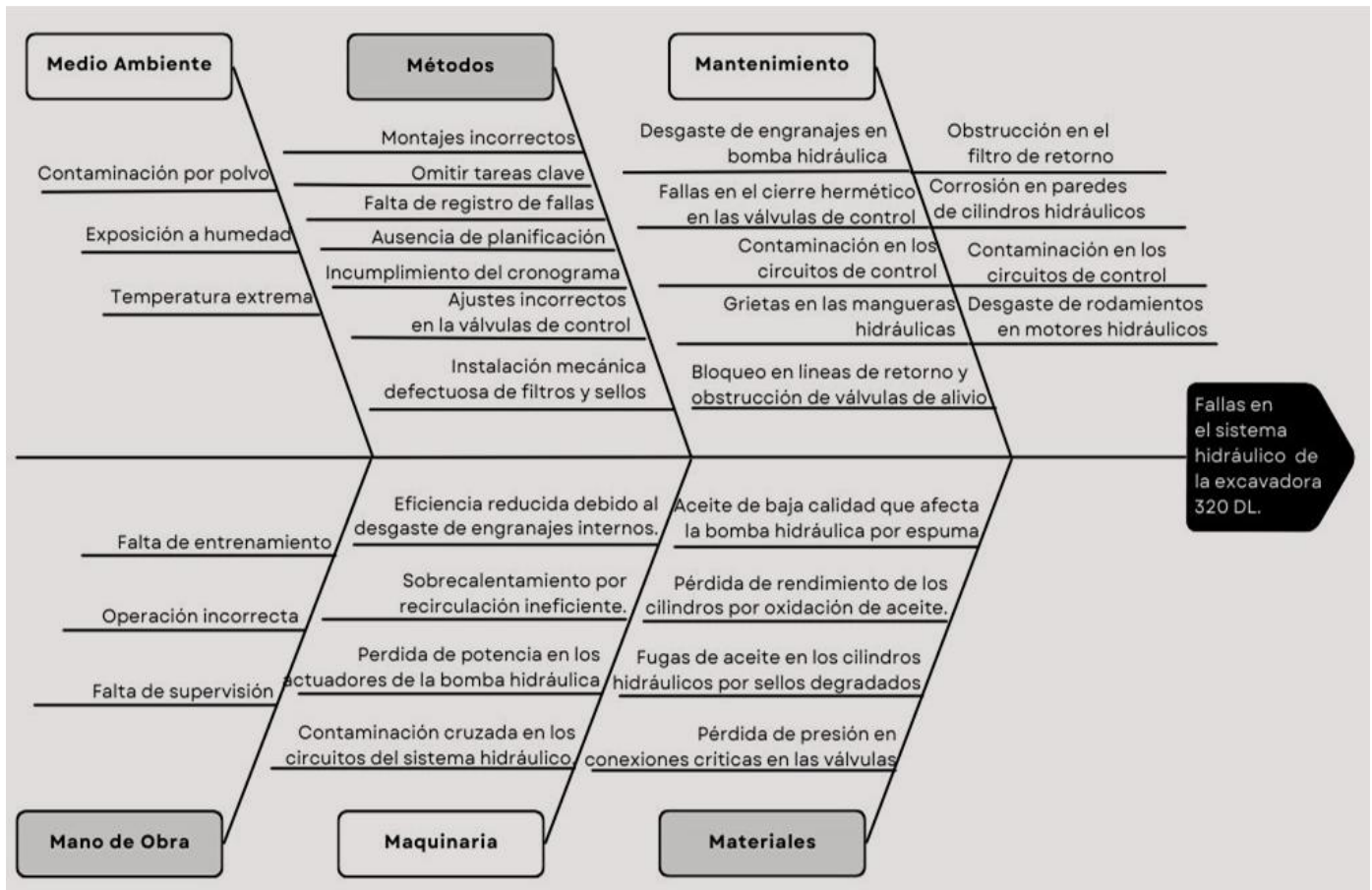
Dentro de Mantenimiento, se identifican factores como los cambios de aceite irregulares y filtros no reemplazados que generan desgaste y obstrucciones, mientras que la limpieza deficiente y una frecuencia insuficiente de revisiones comprometen la eficiencia y la seguridad del sistema.

En Materiales, el uso de aceite hidráulico de baja calidad, sellos inadecuados o piezas no originales afecta la durabilidad y el rendimiento. Los Métodos mal aplicados, como procedimientos deficientes, falta de registros o instrucciones incorrectas, agravan el riesgo de fallos operativos. En Maquinaria, el desgaste y las fugas internas en la bomba hidráulica principal resultan en pérdida de presión, recirculación ineficiente y sobrecalentamiento.

Adicionalmente, el Medio Ambiente influye significativamente: la contaminación por polvo puede obstruir componentes, la exposición a humedad fomenta la corrosión y las temperaturas extremas alteran el rendimiento de los fluidos y materiales. Finalmente, la Mano de Obra desempeña un papel crucial: la falta de entrenamiento, la operación incorrecta y la ausencia de supervisión aumentan el riesgo de errores humanos y problemas operativos. Este análisis integral permite entender mejor las causas y tomar acciones correctivas eficaces.

**Figura 6**

*Diagrama Ishikawa.*



*Nota:* El diagrama de Ishikawa presenta las fallas clasificadas según el origen donde son producidas.

A partir de la figura anterior se desarrolla el análisis de las fallas y sus efectos en el sistema hidráulico principal. En la tabla 2, se presentan dicho análisis con enfoque en las funciones del equipo.

**Tabla 2**

*Función, falla funcional, modos de falla y descripción de efectos del sistema hidráulico principal.*

<b>Código F</b>	<b>Función</b>	<b>Código FF</b>	<b>Falla Funcional</b>	<b>Código Modo de Falla</b>	<b>Modo de Falla</b>	<b>Descripción de Efectos</b>
<b>F1</b>	Ejecuta acciones de los implementos según las órdenes del operador	<b>FF1</b>	Las actividades del operador no se alinean con las operaciones del dispositivo	<b>MF1</b>	La falta de aceite hidráulico l leva a la falla en el flujo de la bomba.	El equipo queda fuera de servicio; las operaciones se detienen.
<b>F1</b>	Ejecuta acciones de los implementos según las órdenes del operador	<b>FF1</b>	Las actividades del operador no se alinean con las operaciones del dispositivo	<b>MF2</b>	Las bombas no generan suficiente flujo debido a desgaste del aceite.	Bajo rendimiento, operación lenta.
<b>F1</b>	Ejecuta acciones de los implementos según las órdenes del operador	<b>FF1</b>	Las actividades del operador no se alinean con las operaciones del dispositivo	<b>MF3</b>	Válvulas de control comprometidas por contaminación o desgaste interno	Fallo en la respuesta de implementos
<b>F1</b>	Ejecuta acciones de los implementos según las órdenes del operador	<b>FF1</b>	Las actividades del operador no se alinean con las operaciones del dispositivo	<b>MF4</b>	Línea hidráulica de alimentación obstruida	Bajo flujo o nulo, implementos inoperativos
<b>F1</b>	Ejecuta acciones de los implementos según las órdenes del operador	<b>FF2</b>	Las acciones son inconsistentes	<b>MF1</b>	Conexiones incorrectas en las líneas hidráulicas	Flujo inadecuado y operación errática

<b>F2</b>	Generar un caudal de aceite de hasta 231 L/min (61 gpm).	<b>FF1</b>	No hay flujo de aceite en las bombas	<b>MF1</b>	Desacoplamiento del eje de las bombas principales del sistema motriz debido a la ruptura del engranaje.	Equipo fuera de servicio
<b>F2</b>	Generar un caudal de aceite de hasta 231 L/min (61 gpm).	<b>FF2</b>	Caudal insuficiente	<b>MF1</b>	Fuga o bajo nivel en el sistema	Operación lenta, baja carga
<b>F3</b>	Elevar presión ante cargas intensas.	<b>FF1</b>	Entrega de presión constante sin ajuste.	<b>MF1</b>	Sensores de presión fallan o están inoperativos.	Fallo en respuesta a carga, baja eficiencia.
<b>F4</b>	Desviar aceite al tanque en inactividad	<b>FF1</b>	En condiciones de inactividad de los implementos, el aceite no retorna al tanque hidráulico	<b>MF1</b>	Presencia de obstrucción en las líneas de retorno hidráulico.	Acumulación de presión, posible sobrecalentamiento
<b>F5</b>	Canalizar aceite del tanque a bombas principales	<b>FF1</b>	Bombas sin aceite	<b>MF1</b>	Nivel bajo en tanque o fuga	Equipo inoperativo

*Nota:* En la tabla se muestran las funciones, las fallas, los modos de falla y la descripción de efectos del sistema hidráulico principal. Elaboración propia.

## 8. Metodología

A continuación, se describe el plan de mantenimiento propuesto en base al análisis de fallas expuesto en el anterior apartado.

### 8.1. Escalas de evaluación

En primer lugar, se definen las escalas para cada factor de análisis como se presentan en la tabla 3:

**Tabla 3**

*Escala de evaluación.*

<b>Factor</b>	<b>Descripción</b>	<b>Escala</b>
Frecuencias (F)	Probabilidad de ocurrencia de la falla.	Baja (1), Media (2), Alta (3)
Severidad (S)	Impacto de la falla en el sistema, operación o seguridad.	Baja (1), Media (2), Alta (3)
Detección (D)	Capacidad de identificar la falla antes de que ocurra	Alta detección (1), Media detección (2), Baja detección (3)

La fórmula utilizada para la evaluación se presenta a continuación en la ecuación 1:

**Ecuación 1**

*Fórmula para evaluación*

$$RPN = F \times S \times D$$

Las categorías se determinan así: Alta Prioridad con  $RPN \geq 18$ , media prioridad con RPN entre 10 y 18 ( $10 \leq RPN < 18$ ) y Baja Prioridad con  $RPN < 10$ .

### 8.2. Definición de actividades

Las actividades o acciones recomendadas se proponen para las fallas o grupos de fallas según correspondan, teniendo en cuenta otros factores como la frecuencia, la severidad y la prioridad. En la tabla 4, se exponen cada uno de dichos factores.

**Tabla 4**

*Hoja de decisión donde se incorpora el análisis de falla, efectos y diagrama de Ishikawa*

<b>Código de falla</b>	<b>Diagrama de Ishikawa</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Severidad</b>	<b>Detección actual</b>	<b>Acción recomendada</b>	<b>Prioridad</b>
<b>F1-FF1-MF1</b>	Filtros no reemplazados, aceite bajo calidad	3	3	2	Revisión diaria de niveles de aceite, calidad de sellos y cambio de filtros	18
<b>F1-FF1-MF2</b>	Cambios de aceites irregulares	2	3	3	Implementar cambios regulares	18
<b>F1-FF1-MF3</b>	Instrucciones deficientes, falta de registros	2	2	3	Realizar limpieza de válvulas y monitoreo de contaminación	12
<b>F1-FF1-MF3</b>	Aceite de baja calidad	2	3	3	Mejorar filtrado y control de calidad de aceite	18
<b>F2-FF1-MF1</b>	Desgaste de bombas	1	3	3	Inspección periódica de acoples y engranajes	4
<b>F3-FF1-MF1</b>	Temperaturas	1	2	2	Instalación de sensores de temperatura y limpieza regular	4
<b>F4-FF1-MF1</b>	Contaminación por polvo, humedad	2	3	2	Mantener líneas de retorno limpias y sin obstrucciones	12
<b>F5-FF1-MF1</b>	Falta de supervisión	1	2	1	Capacitación en revisión de niveles y monitoreo de fugas	2

*Nota:* Hoja de decisión donde se incorpora el análisis de falla y efectos y Diagrama de Ishikawa.

Esta matriz de ponderación se desarrolla para evaluar la prioridad de fallas en el sistema hidráulico principal, utilizando los factores de frecuencia, severidad y detección actual. Con base

en el análisis de fallas y efectos (FMEA) y el Diagrama de Ishikawa, se calculan los valores de prioridad asignando una clasificación alta, media o baja.

### 8.3. Programa de mantenimiento

El programa de mantenimiento se propone teniendo en cuenta la frecuencia, la actividad principal, el responsable del mantenimiento, la duración estimada y la justificación de cada tipo. El programa se detalla a continuación en la tabla 5.

**Tabla 5**

*Programa de mantenimiento.*

<b>Frecuencia</b>	<b>Actividad Principal</b>	<b>A realizarse por</b>	<b>Duración estimada (min)</b>	<b>Justificación</b>
<b>Diariamente</b>	Revisión de nivel de aceite en el tanque hidráulico	Operador	10	Recomendado por el fabricante y respaldado por experiencia operativa
<b>Diariamente</b>	Inspección visual de posibles fugas en conexiones y sellos	Operador	15	Identificado como acción crítica en el análisis FMEA (MF1, MF2).
<b>50 horas</b>	Verificación de filtros de retorno y piloto	Técnico de Mantenimiento	20	Basado en recomendaciones del fabricante
<b>50 horas</b>	Inspección de presión del sistema hidráulico	Técnico de Mantenimiento	15	Derivado del análisis FMEA para prevenir fallas de presión (F3-FF1).

<b>250 horas</b>	Cambio de aceite hidráulico	Técnico de Mantenimiento	60	Especificación directa del manual del fabricante
<b>250 horas</b>	Ajuste de conexiones y revisión de sellos	Técnico de Mantenimiento	45	Basado en observaciones de fallas comunes (Diagrama Ishikawa).
<b>250 horas</b>	Inspección y limpieza de válvulas de control	Técnico de Mantenimiento	30	Recomendado en el análisis FMEA para prevenir contaminación (MF3).
<b>1000 horas</b>	Cambio de filtros de retorno y de drenaje	Técnico de Mantenimiento	30	Frecuencia estipulada por el fabricante.
<b>1000 horas</b>	Muestreo aceite hidráulico para análisis en laboratorio	Técnico de Mantenimiento	30	Recomendación basada en prácticas preventivas del análisis FMEA.
<b>1000 horas</b>	Limpieza de líneas hidráulicas y de retorno	Técnico de Mantenimiento	60	Identificado en el FMEA como prevención de obstrucciones (F4-FF1).
<b>1000 horas</b>	Revisión detallada de la bomba de mando y bomba de mínima	Técnico de Mantenimiento	90	Recomendado por el fabricante y reforzado por FMEA (F1-MF1).
<b>2000 horas</b>	Cambio completo de aceite hidráulico y filtro	Técnico de Mantenimiento	90	Frecuencia y actividad derivada del manual del fabricante.

<b>2000 horas</b>	Calibración de sensores de presión	Técnico de Mantenimiento	90	Recomendación específica del análisis FMEA para mejorar precisión.
<b>2000 horas</b>	Capacitación del personal en prácticas de mantenimiento y operación	Técnico de Mantenimiento	50	Derivado del Diagrama de Ishikawa para abordar errores humanos.

*Nota.* Este programa de mantenimiento permite mantener el sistema hidráulico en óptimas condiciones mediante rutinas programadas que aseguran la detección temprana de fallas y minimizan el tiempo de inactividad de la excavadora.

Se evidencian ajustes en las actividades propuestas en comparación con lo recomendado por el fabricante. En primer lugar, se han introducido nuevas tareas como la inspección y limpieza de válvulas de control, el muestreo de aceite hidráulico para análisis en laboratorio, y la capacitación del personal en prácticas de mantenimiento y operación. Estas actividades no se encuentran en el programa estándar del fabricante, pero se incorporan como medidas preventivas adicionales, orientadas a mitigar las fallas identificadas durante el análisis FMECA.

En segundo lugar, se han realizado modificaciones en las frecuencias de algunas tareas. Aunque actividades como la inspección visual de fugas y la verificación de filtros se mantienen alineadas con las recomendaciones del fabricante, se han ajustado ciertas periodicidades para priorizar tareas críticas, como la revisión más frecuente de los niveles de aceite y el estado de los filtros. Estos cambios buscan atender las fallas recurrentes y prevenir problemas asociados al desgaste y la contaminación de componentes.

**8.4.Indicadores de desempeño (KPIs) para el plan de mantenimiento Preventivo**

Para evaluar la efectividad y la gestión del plan de mantenimiento preventivo diseñado para la excavadora 320 DL, se establecen los siguientes indicadores clave de desempeño (KPIs):

#### **8.4.1. Tiempo de Inactividad por Fallas (TDF)**

Este indicador mide el tiempo total en que la excavadora permanece fuera de operación debido a fallas no planificadas en el sistema hidráulico. Permite evaluar la eficiencia del mantenimiento preventivo en la reducción de tiempos muertos y su cálculo se puede obtener mediante la ecuación 2.

##### **Ecuación 2**

*Fórmula para medir el tiempo de inactividad por fallas TDF*

$$TDF = \frac{\text{Horas de inactividad por fallas}}{\text{Horas totales de operacion}} \times 100$$

Meta Mantener el TDF por debajo del 5% para asegurar una alta disponibilidad operativa del equipo.

#### **8.4.2. Cumplimiento del Programa de Mantenimiento (CPM)**

El CPM evalúa el porcentaje de actividades de mantenimiento preventivo ejecutadas conforme al cronograma establecido y se puede obtener mediante la ecuación 3.

##### **Ecuación 3**

*Fórmula para el cumplimiento del programa de mantenimiento CPM*

$$CPM = \frac{\text{Activiades de mantenimineto realizadas en tiempo}}{\text{activiades de mantenimiento planifiacas}} \times 100$$

Meta: Lograr un CPM igual o superior al 95% para garantizar el cumplimiento del plan de mantenimiento.

### 8.4.3. Frecuencia de Fallas (FF)

La frecuencia de fallas rastrea la cantidad de fallas reportadas en el sistema hidráulico durante un período específico, proporcionando una medida de la eficacia del mantenimiento preventivo en la eliminación de modos de falla recurrentes. El indicador se calcula mediante la ecuación 4.

#### Ecuación 4

*Fórmula para la frecuencia de fallas FF*

$$FF = \frac{\text{Numero de fallas reportadas}}{\text{Horas de operación totales en el periodo}} \times 100$$

Estos indicadores se seleccionaron para abordar aspectos críticos del desempeño del sistema hidráulico principal de la excavadora, garantizando que el plan de mantenimiento no solo se implemente adecuadamente.

## 9. Conclusiones

A través del análisis FMEA, se identificaron los modos de falla más comunes, como la contaminación del aceite y el desgaste de componentes clave. Estas fallas afectan directamente la operatividad del equipo y su capacidad para ejecutar las funciones asignadas por el operador. Esto permite conocer los problemas recurrentes y su impacto en la productividad y la vida útil de la maquinaria.

Los principales factores desencadenantes de las fallas incluyen la calidad deficiente del aceite, el manejo inadecuado del equipo y la exposición a condiciones ambientales adversas.

Además, el análisis de causa raíz confirmó que la falta de mantenimiento regular y la contaminación son determinantes en el deterioro del sistema hidráulico.

Se desarrolló un plan estructurado que incluye actividades como la inspección diaria de niveles de aceite, cambios regulares de filtros y calibración de sensores. Estas acciones están diseñadas para abordar y priorizar los modos de falla identificados, mejorando la confiabilidad del sistema hidráulico y prolongando la vida útil de la excavadora.

## **10. Recomendaciones**

Utilizar solo aceites y lubricantes de primera calidad; realice análisis de muestras de aceite periódicamente para identificar impurezas. La calidad del aceite es tan importante que no se debe permitir el desgaste temprano de las bombas y válvulas. Un programa de análisis de aceite advertirá sobre problemas inminentes antes de que se conviertan en fallas costosas o difíciles de reparar.

Educar a los operadores de maquinaria y técnicos en las mejores prácticas de mantenimiento y operación de la máquina, permitiéndoles observar rutinas de trabajo de inspección y seguimiento de instrucciones técnicas. La capacitación aumentará la detección temprana de problemas y reducirá los errores operativos, fomentando una cultura de mantenimiento proactivo.

### Referencias Bibliográficas

- Cañón Buitrago, E. D., Benavides Zambrano, A. M., & Vargas Vargas, W. E. (2023). Propuesta metodológica para la determinación de rendimiento de maquinaria pesada en la construcción, caso Colombia. doi:[https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i2.5613](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i2.5613)
- Caterpillar. (2019). *Caterpillar*. Obtenido de <https://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/CM20171114-37695-19229>
- Díaz, F. (2004). Técnicas de Mantenimiento Industrial.
- León Losada, E. L. (2022). *Gestión de mantenimiento para maquinaria de construcción*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10654/43882>.
- Lozano Rivera, G. T. (06 de 05 de 2023). *Repository Uniminuto*. Obtenido de Estrategias aplicadas para disminuir la accidentalidad en la industria de la construcción: [https://repository.uniminuto.edu/bitstream/10656/18285/1/TE.RLA\\_LozanoRiveraGloriaTeresa\\_2023](https://repository.uniminuto.edu/bitstream/10656/18285/1/TE.RLA_LozanoRiveraGloriaTeresa_2023)
- Martínez, W., & Rodríguez, F. (2018). Diseño de un plan de mantenimiento para el sistema hidráulico de equipos críticos de la empresa Mincivil SA, mediante el uso de metodología RCM.
- Mendez, J. (2023). Maquinaria amarilla: ¿qué es, para qué sirve? De Estudios Socioterritoriales. doi:10.15332/27113833.8345
- Minsalud. (1993). *Biblioteca digital*. Obtenido de Ley 52 de 1993: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/LEY-0052-DE-1993.pdf>
- Minsalud. (1994). *Biblioteca digital*. Obtenido de Decreto 1769 de 1994.: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/decreto-1769-de-1994.pdf>