

**DISEÑO DE UN MODELO DE PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN
LUBRICACIÓN PARA LOS EQUIPOS CNC DE UNA EMPRESA DE LA
INDUSTRIA METALMECÁNICA**

EDWIN ANDRÉS DUARTE CABARIQUE

**FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN DE GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA**

2020

**DISEÑO DE UN MODELO DE PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN
LUBRICACIÓN PARA LOS EQUIPOS CNC DE UNA EMPRESA DE LA
INDUSTRIA METALMECÁNICA**

EDWIN ANDRÉS DUARTE CABARIQUE

**Monografía presentada como requisito para optar por el título de
Especialista en Gerencia de Mantenimiento**

Director:

Laura Torres Martínez

Ingeniera Mecánica - Especialista en Gerencia de Mantenimiento

FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESPECIALIZACIÓN DE GERENCIA DE MANTENIMIENTO

BUCARAMANGA

2020

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	10
1. OBJETIVOS.....	12
1.1. OBJETIVO GENERAL	12
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
2. MARCO TEÓRICO	13
2.1. EQUIPOS DE CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO (CNC)	13
2.1.1. Tornos CNC	17
2.1.2. Alesadoras CNC	18
2.1.4. Centros de mecanizado CNC	21
2.2. MANTENIMIENTO DE EQUIPOS CNC	22
2.3. LUBRICACIÓN DE EQUIPOS CNC.....	23
2.3.1. Lubricación correctiva	24
2.3.2. Lubricación preventiva	25
2.3.3. Lubricación predictiva	27
2.3.4. Lubricación proactiva	30
2.3.5. Aceites y lubricantes	31
2.3.6. Rutinas y cartas de lubricación	37
2.3.7. Consecuencias de una mala lubricación.....	41
3. MARCO CONCEPTUAL	43
4. MARCO LEGAL Y NORMATIVO.....	45
5. METODOLOGÍA - LUBRICACIÓN CENTRADA EN CONFIABILIDAD.....	48
5.1. SELECCIÓN DE LUBRICANTES	49
5.2. ALMACENAMIENTO DE LUBRICANTES	51
5.3. MANEJO Y APLICACIÓN DE LUBRICANTES	51
5.4. CONTROL DE CONTAMINACIÓN	52
5.5. ANÁLISIS DE LUBRICANTES	52
5.6. DISPOSICIÓN DE LUBRICANTES USADOS.....	54
6. RESULTADOS DE LA METODOLOGÍA.....	55

6.1.	HOMOLOGACIÓN DE LUBRICANTES	55
6.2.	ALMACENAMIENTO Y MANIPULACIÓN DE LUBRICANTES	56
6.3.	RUTINAS DE LUBRICACIÓN	58
6.4.	CARTAS DE LUBRICACIÓN	59
6.5.	INSPECCIÓN DE LOS LUBRICANTES.....	60
6.6.	CONTROL DE CONTAMINACIÓN Y DISPOSICIÓN FINAL	61
6.7.	CAPACITACIÓN Y MEJORA CONTINUA	61
7.	CONCLUSIONES	63
	BIBLIOGRAFÍA.....	65

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 Lubricantes requeridos para un torno CNC	27
Tabla 2 Características de los aceites minerales	33
Tabla 3 Características de los aceites sintéticos	34
Tabla 4 Listado de equipos CNC de la empresa de la industria metalmecánica ...	44
Tabla 5 Alesadora CNC Doosan	44
Tabla 6 Propiedades físico-químicas de los lubricantes	46
Tabla 7 Tabla de lubricantes requeridos por la alesadora Doosan	55
Tabla 8 Tabla de lubricantes equivalentes para la alesadora Doosan	55
Tabla 9 Código de colores para identificación de lubricantes	57
Tabla 10 Horómetros para la inspección de lubricantes	58
Tabla 11 Monitoreo de aceite - Elementos de desgaste	60
Tabla 12 Monitoreo de aceite - Conteo de partículas	60
Tabla 13 Matriz de fortalezas y debilidades	62

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1 Planos coordenados que utiliza en un equipo CNC.....	14
Figura 2 Torno paralelo Milltronics ML18.....	18
Figura 3 Alesadora CNC Hartford PBM135A.....	19
Figura 4 Rectificadora de bloques Rottler EM103H.....	20
Figura 5 Centro de mecanizado Milltronics VM22.....	21
Figura 6 Aspectos fundamentales del análisis de lubricantes.....	28
Figura 7 Beneficios de la lubricación predictiva	30
Figura 8 Componentes de los lubricantes.....	32
Figura 9 Variación de la viscosidad en distintas bases lubricantes.....	35
Figura 10 Carta de lubricación.....	39
Figura 11 Metodología de lubricación centrada en confiabilidad	48
Figura 12 Elementos para la selección de un lubricante.....	50
Figura 13 Almacenamiento de contenedores de aceite	56
Figura 14 Carta de lubricación.....	59

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO DE UN MODELO DE PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LUBRICACIÓN PARA LOS EQUIPOS CNC DE UNA EMPRESA DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA.¹

AUTOR: Edwin Andrés Duarte Cabarique

PALABRAS CLAVES: Análisis de aceites, cartas de lubricación, equipos CNC, industria metalmecánica, mantenimiento centrado en lubricación.

DESCRIPCIÓN:

Esta monografía se realizó con el fin de implementar la metodología del mantenimiento centrado en lubricación en los equipos de control numérico computarizado (CNC) de una empresa de la industria metalmecánica, ya que en estos equipos las rutinas de lubricación se realizan siguiendo los lineamientos del fabricante sin que haya una revisión y análisis del estado de los lubricantes previo a su cambio. Mediante esta metodología se busca homologar los lubricantes y establecer acuerdos comerciales con empresas locales, eliminando así la dependencia del fabricante o de las importaciones. También se establecen las rutinas y frecuencias de lubricación para la gama de equipos CNC que incluye alesadoras, centros de mecanizado, fresadoras, rectificadoras y tornos paralelos y verticales que utilizan esta tecnología. Dentro de la implementación se establecen procedimientos para la manipulación y almacenamiento de los lubricantes bajo el amparo de las normas colombianas que regulan el manejo y la disposición de estos insumos, con el fin de evitar focos de contaminación y disponer de forma correcta de los aceites usados en equipos metalmecánicos. Finalmente, se busca establecer las rondas de inspección, toma de muestras y análisis de aceites para identificar fallas internas en componentes del equipo y establecer las frecuencias de cambio de los lubricantes que han perdido sus propiedades. Todo esto acompañado de una componente de capacitaciones y mejora continua que permita empoderar al personal técnico en la importancia de una correcta lubricación de los equipos CNC.

¹ Monografía de Grado

Facultad de Ingenierías Físicomecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Especialización en Gerencia de Mantenimiento, Director de la Monografía Ing. Laura Torres Martínez

ABSTRACT

TITLE: DESIGN OF A MODEL OF MAINTENANCE PLAN FOCUSED ON LUBRICATION FOR THE CNC MACHINES OF A COMPANY IN THE METAL-MECHANICAL INDUSTRY.²

AUTHOR: Edwin Andres Duarte Cabarique

KEY WORDS: CNC machines, lubrication charts, metal-mechanical industry, maintenance focused on lubrication, Oil analysis

DESCRIPTION:

This monograph was carried out in order to implement the maintenance methodology focused on lubrication in the computerized numerical control (CNC) machines of a company in the metalworking industry, since in these equipment the lubrication routines are carried out following the manufacturer's guidelines without there being a review and analysis of the state of the lubricants prior to their change. This methodology seeks to standardize lubricants and establish commercial agreements with local companies, thus eliminating dependence on the manufacturer or imports. Lubrication routines and frequencies are also established for the range of CNC machines that includes parallel and vertical milling machines, machining centers, grinding machines and lathes that use this technology. Within the implementation procedures are established for the handling and storage of lubricants under the protection of Colombian standards that regulate the handling and disposal of these inputs, in order to avoid sources of contamination and to dispose of used oils correctly. Finally, it seeks to establish inspection rounds, sampling and analysis of oils to identify internal failures in equipment components and establish the frequencies of change of lubricants that have lost their properties. All this accompanied by a component of training and continuous improvement that allows empowering technical personnel in the importance of proper lubrication of CNC machines.

² Grade Monograph

Faculty of mechanical engineering, School of Mechanical Engineering. Maintenance Management Specialization, Director: Laura Torres Martinez, Mechanical Engineer

INTRODUCCIÓN

En Colombia, las empresas metalmecánicas se encargan de la reconstrucción de partes y componentes de la industria en general mediante actividades de mecanizado. Estas actividades garantizan precisión, velocidad y calidad en los componentes procesados. Estos talleres cuentan con máquinas de última tecnología, tales como equipos de control numérico computarizado (CNC) y equipos robotizados que trabajan de manera eficiente para satisfacer las necesidades de sus clientes.

Los equipos de control numérico computarizado (CNC) son altamente eficientes debido a que las tolerancias y acabados de la mayoría de componentes son ajustadas en los equipos CNC; por lo que un mal desempeño de estas máquinas impacta fuertemente en la línea de producción. Estos equipos representan una de las fuentes de ingresos más significativas de la empresa de la industria metalmecánica, ya que en la mayoría de los componentes que se mecanizan y rectifican, se opta por los equipos CNC antes que los convencionales. En estos equipos la lubricación juega un papel importante; por lo que las rutinas de mantenimiento son impactadas por un mal análisis tribológico. Esto provoca recalentamiento de los componentes o de las herramientas de trabajo, desgaste excesivo de las partes móviles del equipo, y por extensión, puede generar degradación prematura y fin de la vida útil del activo.

Debido a la criticidad de estos equipos, la lubricación juega un papel importante en el desempeño y alcance de los objetivos productivos de los talleres metalmecánicos, ya que valores no tolerables de fricción en la mesa de trabajo o en el husillo afectan la calidad del mecanizado de las piezas. Es por esto, que si bien se cuenta con un lubricador que se encarga de completar los niveles de aceite de los equipos como rutina diaria, esto no se encuentra parametrizado, incurriendo en exceso o falta de los niveles de aceite requeridos o pérdidas

económicas por lubricantes desechados sin realizar análisis para validar su degradación.

Lo anterior plantea una oportunidad de mejora en el área de mantenimiento, ya que con la presente monografía se buscará desarrollar las cartas de lubricación requeridas para el contexto operacional de cada equipo CNC, se establecerán los periodos para tomas de muestras y dependiendo de los resultados de estas, se documentarán los procedimientos para el cambio de aceite y disposición final de los lubricantes degradados. De la población de equipos, se considerarán las alesadoras, tornos y centros de mecanizado (todos estos con control numérico computarizado), con el fin de que la confiabilidad de estos equipos esté orientada a los resultados de los análisis de aceites, permitiendo un mayor aprovechamiento de los recursos de, en lo sucesivo, la empresa de la industria metalmeccánica.

Por tanto, en la presente monografía se buscará integrar el plan de lubricación de los equipos CNC en función de la metodología de *lubricación centrada en confiabilidad*. Ya que dadas estas condiciones, se justifica definir las mejores prácticas de lubricación de acuerdo con el contexto operacional de cada equipo, ya que al identificar las particularidades operativas de los equipos CNC, será posible definir el correcto uso de los aceites, las frecuencias de cambio y el monitoreo de las condiciones por muestreo de aceite. Con esto se optimiza el uso de los aceites y se reducen costos por exceso de abastecimiento.

Debido a la pluralidad de equipos presentes en el taller de la industria metalmeccánica, se tomarán acciones únicamente en un equipo en específico a partir del cual se replicará la estrategia en los demás equipos de control numérico computarizado. Esto con el fin de poder profundizar en los detalles de contexto operacional y entorno del equipo en particular.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Establecer los parámetros de lubricación de los equipos de control numérico computarizado (CNC) que aseguren el máximo aprovechamiento de los distintos aceites utilizados en el mecanizado de componentes de una empresa de la industria metalmecánica, basado en la metodología de lubricación centrada en confiabilidad.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Diseñar las cartas y rutinas de lubricación de acuerdo con el contexto operacional de cada uno de los equipos.

Establecer los periodos de tomas de muestras de aceites y las acciones a tomar de acuerdo con el análisis de las muestras tomadas.

Establecer un procedimiento para el cambio de aceites y disposición final de los residuos.

Implementar la metodología de lubricación centrada en confiabilidad con el fin de darle una mejor utilización a los aceites y lubricantes utilizados por los equipos CNC.

Capacitar al personal de mantenimiento en el uso, manejo y disposición de los aceites y lubricantes requeridos para los equipos CNC.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. EQUIPOS DE CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO (CNC)

Los equipos de control numérico computarizado (CNC) son equipos que realizan movimientos secuenciales con alta repetitividad y gran precisión. Son utilizados principalmente para la producción de componentes en masa, y debido a la automatización no requieren intervención humana.

Desde la introducción de la computación y los avances tecnológicos y electrónicos, estas máquinas han aportado avances significativos a la industria metalmeccánica debido a la producción de piezas mediante el diseño asistido por computador (CAD). Una de las principales ventajas de esta tecnología es la asistencia offline desde fábrica, o incluso desde espacios diferentes al taller en el que se encuentra ubicado físicamente el equipo. Además de esto, cuentan con la capacidad de procesar y almacenar información en una unidad central; esto permite que los programas puedan ser replicados en distintos equipos simultáneamente, manteniendo la velocidad, eficiencia y precisión.

La programación CNC fue introducida en la década de 1950 con la finalidad de guiar de forma remota los movimientos realizados por las máquinas-herramienta. Inicialmente, los equipos se posicionaban de punto a punto, siendo capaces de realizar únicamente movimientos en línea recta. Además requerían asistencia de programadores experimentados a fin de introducir los códigos correctamente. Todo esto, sumado al alto costo de adquisición, representó una oportunidad para optimizar el desempeño y costo de estos equipos.

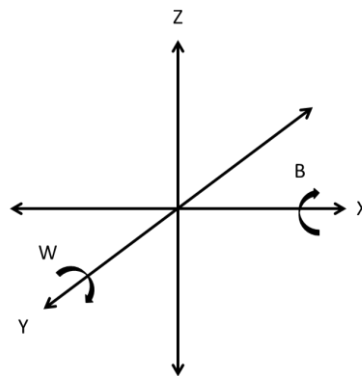
En la actualidad, estos equipos son mucho más económicos respecto a la multiplicidad de funciones que traen incorporadas, su movimiento tridimensional y la versatilidad en el uso de distintas herramientas que permiten dar tolerancias y acabados a componentes de diversas formas. Además de esto, las máquinas

CNC actuales traen incorporados programas y subprogramas en los que el programador del taller sólo debe modificar pocos parámetros para cumplir con la tarea dada. También vienen con servomotores, que ayudan a compensar las holguras, desajustes mecánicos y cuadratura de los ejes y el husillo del equipo; todo esto con el fin de no afectar la geometría del conjunto equipo-componente.

Otra ventaja del uso de estos equipos en la actualidad, es que la plataforma computacional permite el desarrollo y la simulación de los maquinados a realizar en el equipo. Todo esto con el fin de prever errores la programación o bugs que afecten el desempeño del equipo. Este desarrollo tecnológico se logró con la incorporación de módulos microelectrónicos, algunos diseñados incluso según el requerimiento del cliente, los cuales pueden ser producidos en masa, con dimensiones compactas, alta confiabilidad y bajos requerimientos de mantenimiento¹.

Los equipos CNC se caracterizan porque todos sus ejes son controlables y programables desde el computador. En general, se mueven en un plano de coordenadas tridimensionales XYZ, siendo estos a su vez rotativos (coordenadas W) o pueden ser paralelos a los ejes principales (coordenadas ABC). En la figura 1 se puede observar la disposición de los planos de un equipo CNC con 5 ejes de trabajo.

Figura 1 Planos coordenados que utiliza en un equipo CNC



¹ KIEF, H. and ROSCHI WAL, H. CNC Handbook, New York: McGraw-Hill Education, 2012.

Otra característica de los equipos CNC es la graduación de las velocidades de corte que tiene el equipo, ya que permite parametrizar las velocidades y avances de corte de acuerdo con el tipo de material que se esté desbastando. Las velocidades son definidas en el código del programa en revoluciones por minuto (rpm); mientras que el avance se define en metros por minuto (m/min). La parametrización permite seleccionar la mejor herramienta de corte, logrando así una mayor vida útil con la misma eficiencia.

Gracias al crecimiento, cada vez más veloz, de los equipos CNC, estos ofrecen las siguientes ventajas, las cuales se ven potenciadas con la introducción de un nuevo diseño:

- **Seguridad:** Debido a que la mayoría de consolas y controles computacionales de los equipos CNC se encuentran alejados de las herramientas de corte, o en su lugar, el equipo cuenta con guardas que separan al operador de las actividades de maquinado. Esto implica una reducción en la accidentalidad respecto a los equipos convencionales.
- **Eficiencia:** La automatización de los equipos CNC ha llevado a que la atención del operador en el equipo no sea necesariamente requerida; por lo que se designan otras actividades al personal técnico mientras el equipo CNC realiza sus funciones.
- **Precisión:** La principal ventaja de los equipos CNC es el hecho de efectuar maquinados y otros cortes con tolerancias demasiado estrechas (las cuales rondan entre los 0.0025 a 0.0050 mm)². Esto lleva a una reducción de los desperdicios y no se induce en el error humano, si este efectuara los cortes.
- **Reducción en los tiempos de entrega:** La mayoría del tiempo de maquinado y acabado en los equipos CNC está en la preparación y simulación de los programas de corte, por lo que es posible bajar los tiempos de entrega e incrementar la producción.

² KRAR, S. GILL, A. and SMID, P. Tecnología de las Máquinas Herramienta (Sexta Edición), Ciudad de México: Alfaomega, 2009.

- **Versatilidad de herramientas:** Los equipos CNC cuentan con herramientas incorporadas para distintos perfiles y acabados, lo cual lleva a realizar perfiles complejos de distintos componentes. Esto ha reducido el costo por herramientas en un 70%³.
- **Productividad:** Es posible incrementar el uso de los equipos CNC al mismo ritmo que se incrementa la productividad de la empresa. Esto debido a que los trabajos ejecutados son de alta calidad, por lo que se reducen los tiempos de inspección.
- **Repetitividad:** En este punto influye el costo económico, ya que la capacidad de repetición, es decir, que al comparar la producción de las piezas maquinadas estas conserven los mismos parámetros de tolerancia, va ligado al grado de precisión de la máquina y por extensión al costo de la misma. En otras palabras, las máquinas más precisas tienen alto grado de repetitividad, pero al mismo tiempo son más costosas.
- **Confiablez:** Las máquinas CNC han mejorado vertiginosamente gracias a las mejoras en rodamientos, cojinetes y elementos móviles, que han asegurado que los equipos sean más robustos y precisos. Esto va ligado al mantenimiento y lubricación de los elementos, a fin de que el desempeño sea el óptimo.
- **Ejecución de procesos complejos:** Debido a la reducción del involucramiento del operador con el equipo, es posible programar maquinados más complejos, que sólo requieren la interacción de los ejes de la máquina para poder llevarlos a cabo. Realizando el proceso sin interrupciones ni fallas, y con el operador sólo como supervisor del buen funcionamiento del equipo.

³ KRAR, S. GILL, A. and SMID, P. Tecnología de las Máquinas Herramienta (Sexta Edición), Ciudad de México: Alfaomega, 2009.

Debido a la versatilidad de los equipos CNC y a la variedad de equipos que se encuentran en las instalaciones de la empresa de la industria metalmeccánica, se explicará brevemente las principales características de los distintos equipos presentes en esta compañía.

2.1.1. Tornos CNC: Los tornos CNC o centros de torneado CNC se encuentran diseñados para el maquinado de componentes del tipo de ejes y barras. Son útiles para desempeñar trabajos tanto en las caras internas como externas del componente. Estos equipos manejan una programación alfanumérica conocida como 'Código G'. Gracias a la programación, es posible estimar y compensar los efectos causados por las distintas configuraciones físicas del componente. En esto se tiene en cuenta si el eje o barra a maquinar es demasiado largo o si se deben realizar roscas en alguna de las caras de los ejes. Todo esto lleva a buscar la configuración más apropiada de acuerdo con las condiciones de manufactura del equipo y poder adelantarse a los errores que pueden presentarse en el componente⁴.

Debido a la aplicabilidad de estos equipos en distintas áreas de manufactura, se han venido desarrollando nuevos avances que permitan optimizar su desempeño; integrando funciones de giros y taladrados en el equipo; o con la incorporación de herramientas de corte ajustables en línea, esto permitirá un mayor control de los parámetros geométricos del componente y la herramienta de corte durante los procesos de torneado. Esto se logra gracias a la interacción entre la herramienta de corte y los servomotores, los cuales ajustan el ángulo corte para dar un mejor acabado⁵.

⁴ DIMITROV, D. and SZECSEI, T. Machining accuracy on CNC lathes under the lack of unity of the process and design data, *Procedia CIRP*, vol. 41, pp. 824-828, 2016.

⁵ FANG, D. and LEE, N. A new tooling mechanism for CNC lathes, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 41, no. 1, pp. 89-101, 2001.

En la actualidad, los tornos utilizan sistemas de refrigeración automática y vienen con elementos de seguridad que mitigan los riesgos que se puedan presentar durante la operación del equipo. Las distintas herramientas vienen diseñadas para realizar actividades en piezas de tamaños muy pequeños así como en piezas de gran volumen. Con las nuevas tecnologías es posible realizar trabajos sobre superficies complejas como las caras de una broca; al igual que maquinar sobre piezas de bronce, acero, y en general en piezas de distintos metales, manteniendo la precisión y calidad del trabajo.

Figura 2 Torno paralelo Milltronics ML18



2.1.2. Alesadoras CNC: En este tipo de equipos CNC el cabezal es móvil, aportando cuatro ejes a la configuración de las coordenadas. Se utiliza en general para el maquinado de piezas planas mediante el uso de elementos rotativos. En general son equipos robustos, que permiten realizar operaciones en piezas de gran tamaño. Estos equipos vienen equipados con un sistema intercambiador de herramientas (ATC), que una vez finaliza el ciclo de maquinado, la unidad hace un giro de 90° toma la herramienta y la lleva al cargador de herramientas dejando ubicada de acuerdo con la numeración asignada y tomando la nueva herramienta requerida, para iniciar un nuevo ciclo⁶. Este sistema de intercambio de

herramientas puede estar equipado con entre 12 y 24 herramientas de corte, lo cual reduce los tiempos de selección e instalación de la herramienta correcta.

La automatización de los equipos CNC, y específicamente, de las alesadoras, es posible en los procesos de manufactura gracias al sistema de funcionamiento del intercambiador de herramientas (ATC, *automatic tool changing* por sus siglas en inglés). El funcionamiento correcto de la ATC dependerá de la lubricación, ya que esto permite disminuir la fricción y detrimento entre la herramienta de corte y el equipo. Debido a esto, los equipos vienen equipados con sistemas de lubricación automática; tomando el aceite de la unidad principal que lubrica todo el equipo, para lubricar el husillo y por extensión la herramienta de corte⁷.

Figura 3 Alesadora CNC Hartford PBM135A



⁶ KRAR, S. GILL, A. and SMID, P. Tecnología de las Máquinas Herramienta (Sexta Edición), Ciudad de México: Alfaomega, 2009.

⁷ SARDHARA, T. and TAMBOLI, K., Design and development of automatic lubrication system for ATC of CNC, Materialstoday: Proceedings, vol. 5, no. 2, pp. 3959-3964, 2018.

2.1.3. Rectificadoras CNC: Las rectificadoras de superficie son utilizadas para rectificar caras planas de un componente, llevándolo a tolerancias estrechas y un excelente acabado superficial. El desempeño de la actividad dependerá mucho del buen montaje del equipo y la selección de las herramientas adecuadas, basado en la dureza y el acabado que se le quiera dar al material⁸.

Estos equipos también cuentan con un sistema de intercambio de herramientas, el cual es versátil y flexible con las condiciones operacionales del taller. Además, el recorrido del cabezal asegura que el husillo recorra toda la superficie del componente, por lo que le da un mismo acabado superficial. El sistema es automatizado, por lo que no requiere la supervisión continua del operador⁹.

Figura 4 Rectificadora de bloques Rottler EM103H



⁸ KRAR, S. GILL, A. and SMID, P. Tecnología de las Máquinas Herramienta (Sexta Edición), Ciudad de México: Alfaomega, 2009.

⁹ ROTTLER [Online]. Available: www.rottlermfg.com/. [Accessed 24 08 2019].

2.1.4. Centros de mecanizado CNC: En estos equipos el husillo está montado de forma vertical y puede rotar, permitiendo el torneado de superficies angulares. Se utilizan para operaciones de acabado, perforación y ubicación de agujeros. En general permiten actividades de fresado, taladrado y machuelado dependiendo del tipo de herramienta que se inserte. Son utilizados para lotes de componentes pequeños o medianos, siendo una limitante para componentes de mayor tamaño.

En general los centros de mecanizado son diseñados con distintos niveles de automatización y funciones, manteniendo como características la versatilidad del equipo, por lo que requiere de elevados costos de operación, adquisición de accesorios y herramientas, y mantenimiento.

Figura 5 Centro de mecanizado Milltronics VM22



2.2. MANTENIMIENTO DE EQUIPOS CNC

El mantenimiento de los equipos CNC es requerido para asegurar el excelente desempeño, precisión y vida útil. Esta actividad debe ser realizada por personal especialista, y con un claro enfoque de seguridad; a fin de que aisle las energías peligrosas (eléctrica y neumática), y limite los movimientos de los ejes y herramientas de corte de estos equipos.

Durante las rutinas de mantenimiento se debe revisar el intercambiador automático de herramientas (ATC), revisando el torque de la tornillería y su correcto funcionamiento, es decir, que al llamar a la herramienta, esta sea la correcta. Otro punto a tener en cuenta es la referenciación de los ejes, la cual consiste en ajustar la posición de los ejes de acuerdo con los parámetros de ajuste de cuadratura, juego mecánico y compensación de los servomotores.

De igual manera se debe revisar y corregir la repetitividad de los movimientos de cada uno de los ejes del equipo. Esto consiste en ubicar el husillo, marcar la posición inicial, y que al correr un programa de movimiento del eje, este regrese exactamente a la posición marcada sin que haya desviaciones en el comparador. Una vez validado esto, se deben ajustar los límites de recorrido de cada uno de los ejes a fin de que no haya interferencias de los movimientos de cada eje respecto a los demás ejes.

Además de la revisión y ajuste de la geometría del equipo, se deben revisar las unidades neumáticas y de lubricación, a fin de que estas mantengan la presión correcta, que los filtros no se encuentren saturados y que el indicador esté marcando la información correcta. También se debe revisar la unidad de refrigeración con el fin de drenar el aceite remanente y verificar que esté realizando su función¹⁰.

¹⁰ DOOSAN, Instruction Manual DBC110 (Specifications and Maintenance Data), Rio de Janeiro, 2010.

Las demás fases del mantenimiento consisten en revisar el panel eléctrico, retorqueando contactores y cableado, y que estos cumplan los requerimientos de voltaje y amperaje. También se debe hacer limpieza general del equipo, extrayendo la viruta y demás suciedades producto de la operación del equipo.

2.3. LUBRICACIÓN DE EQUIPOS CNC

La lubricación representa uno de los factores más importantes en toda producción en masa, en la que se involucran equipos con elementos rotativos que operan en función de un proceso tribológico que impacta en la vida útil equipo; ocasionando que no se cumplan las metas de productividad y mantenibilidad de la planta.

En la industria se maneja el concepto generalizado de que lubricar y aplicar aceite son sinónimos, sin embargo, la experiencia en la rama de la tribología ha demostrado que las actividades de lubricación requieren de personal especializado, selección y aplicación correcta y oportuna de aceites y grasas a los mecanismos que sufren fricción. Esto ha llevado a todo un estudio de lubricantes con el fin de determinar las viscosidades, aditivos, cantidades y métodos de aplicación de conformidad con el contexto operativo de cada equipo¹¹.

La interacción de distintas superficies en movimiento genera que haya desgaste en el área de contacto de estas. El desgaste puede ser por adherencia, abrasión, corrosión o fatiga. En los equipos rotativos sometidos a fricción la principal modalidad de desgaste es el abrasivo, ocasionado por el contacto de metal con metal, en el que la película de lubricante no asegura una separación entre las superficies¹².

¹¹ ALBARRACÍN, P. Tribología y Lubricación, Medellín, 2015

¹² LOSADA, C. OM, N. and RODRÍGUEZ, J. Tribología y Lubricación en Ensayo de Banco, Ciencias Exactas y Aplicadas, 2006.

En los equipos de control numérico computarizado (CNC) el desgaste de los componentes afecta significativamente la precisión de estas máquinas, razón por la cual los fabricantes sugieren distintos aceites y refrigerantes que garanticen las características de desempeño de las máquinas durante un periodo determinado de tiempo. Por tanto, en estos equipos la función de la lubricación no es otra que: reducir la fricción e incrementar la durabilidad de los componentes, reducir el desgaste y disipar el calor generado por la fricción¹³.

Debido a esto, la implementación de un programa de lubricación cuenta con distintas fases y etapas que garantizan la perdurabilidad del equipo. Entre los principales programas se encuentran: la lubricación correctiva, lubricación preventiva, lubricación predictiva y la lubricación proactiva, las cuales son explicadas a continuación.

2.3.1. Lubricación correctiva: El objetivo en esta etapa es garantizar que los equipos tengan definidas y actualizadas las cartas de lubricación con el fin de servir como guía en los casos en los que el equipo no trabaja dentro de los parámetros adecuados, por lo que se deben completar niveles de aceite o aplicar grasas que corrijan el evento. En las cartas de lubricación se debe especificar el lubricante particular para cada equipo, las cantidades y forma de aplicación en caso de ser requerido¹⁴.

Dentro de esta fase de la lubricación, juega un papel importante la observación y experiencia del operador para detectar la sintomatología del equipo cuando este tiene deficiencias en la lubricación.

¹³ ORDÓÑEZ, M. Mantenimiento de sistemas de refrigeración y lubricación de los motores térmicos, Málaga: IC Editorial, 2012.

¹⁴ MANCILLA, M. Diseño e implementación del plan de lubricación productiva para la empresa Fiber Glass Colombia SA planta Mosquera, Bucaramanga, 2004.

Es por esto la importancia de conocer los lubricantes que se encuentran en distintos sistemas del equipo, ya que normalmente los equipos CNC vienen integrados con varios tipos de lubricantes que se ajustan a la operación de cada uno de estos sistemas. Además, puede revisar (quizás dentro del preoperacional del equipo) las mirillas de los indicadores de nivel de aceite, con el fin de notificar oportunamente la falta de lubricante.

Otro aspecto a tener en cuenta, son las fugas en las redes y tuberías de lubricación, las cuales impactan en el abastecimiento de los aceites; ya que se requiere completar niveles con mayor frecuencia si no se atiende correctamente la fuga.

Finalmente, el personal operativo conoce de primera mano el comportamiento normal de cualquier lubricante, por lo que pueden levantar alertas cuando éste presenta un olor o un color distinto al característico. Dentro de la lubricación correctiva el área de mantenimiento debe contar con todos los elementos e insumos para atender necesidades de los equipos por problemas de aceite, los cuales pueden ser corregidos de forma inmediata. Todo esto evitará que el equipo falle catastróficamente.

2.3.2. Lubricación preventiva: La lubricación preventiva tiene lugar cuando las actividades de lubricación se realizan con una frecuencia constante o dentro de una rutina periódica. Dentro de esta fase se incluyen tareas tales como cambios de lubricantes, completar niveles de aceites, cambio de filtros que afectan la integridad del lubricante, etc.

En esta etapa se toma en consideración la información técnica y los manuales de los equipos CNC; ya que es el fabricante del equipo, y el proveedor de los lubricantes, los principales conocedores del manejo y uso apropiado de los aceites, grasas y lubricantes de acuerdo con el uso del equipo. Además de esto, en esta etapa los manuales del equipo ofrecen información sobre la sintomatología

del equipo en caso que el equipo tenga deficiencias en la lubricación, o en su defecto se esté usando exceso de lubricantes en la unidad.

La correcta lubricación preventiva dependerá de la asignación del personal encargado de dicha tarea, ya que serán quienes conozcan los mecanismos del equipo y los lubricantes requeridos para cada sistema. Es por esto, que el personal debe ser calificado para la tarea, con el fin de que haga uso racional de los recursos de la empresa y sepa analizar las fallas para tomar decisiones rápidas cuando hay problemas con la lubricación del equipo¹⁵.

El empleo de lubricantes multimarca representa una limitante al momento de solventar problemas con la lubricación del equipo, ya que se estaría manejando diversos proveedores y distintos tiempos de entrega. Esto afecta el control y seguimiento de las rutinas preventivas de los equipos. Es por esto, que si bien los equipos traen un catálogo donde especifican no sólo el lubricante, sino las características de este, y el área de mantenimiento debe ser estricto en la aplicación de los lubricantes sugeridos por el fabricante; es posible tomar un único proveedor que homologue y estandarice todos los aceites requeridos, a fin de facilitar la compra y seguimiento de la misma.

En conclusión, durante la lubricación preventiva, la definición de proveedores, la información técnica de los lubricantes, las asignación de las tareas al personal técnico especializado y el seguimiento de las recomendaciones dadas por el fabricante de los equipos, garantizan el éxito de los cambios periódicos y rutinarios de los aceites y lubricantes de acuerdo con las frecuencias definidas por el fabricante.

¹⁵ ALBARRACÍN, P. Tribología y Lubricación, Medellín, 2015.

Tabla 1 Lubricantes requeridos para un torno CNC

No.	Parte a lubricar	Lubricante	Frecuencia	Volumen
1	Unidad hidráulica	DTE 24	6 meses	200 L
2	Caja de engranajes	Velocite 10	3 meses	120 L
3	Guías	Vactra 2	Cuando sea necesario	6 L
4	Aire lubricador	DTE 24	Cuando sea necesario	700 cc
5	Tanque refrigerante	Mobilcut Oil	3 meses	550 L
6	Rodamientos eje X	Mobilux EP2	3 meses	4 cc
7	Rodamientos eje Z	Mobilux EP2	3 meses	4 cc
8	Intercambiador de herramientas	Mobilux EP2	3 meses	0,1 L

(FUENTE: Tomado del manual de operaciones del Torno CNC Hankook en Imocom.com)

2.3.3. Lubricación predictiva: En el programa de lubricación predictiva se busca monitorear las condiciones de los componentes rotativos de los mecanismos de los equipos a fin de adelantarse a la falla del componente y reducir los tiempos muertos del equipo por down inesperado.

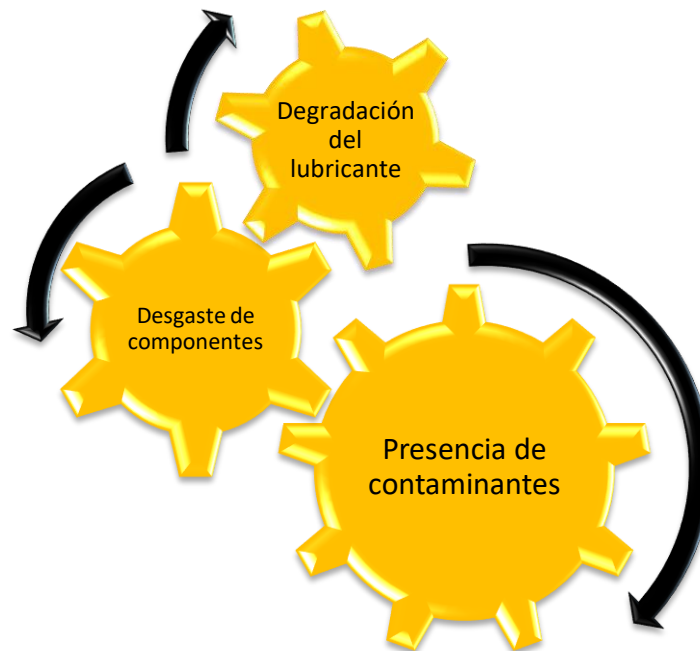
En esta etapa se le da prioridad al análisis de la condición contra las frecuencias de cambio de aceites y lubricantes. Es por esto que la toma de muestras de aceites y seguimiento al estado de los filtros y componentes, es necesario para determinar si es necesario completar niveles o el cambio del aceite analizado.

De acuerdo con estudios recientes, el 60% de las fallas de los equipos están relacionadas con la lubricación del equipo; y la lubricación adecuada incrementa hasta en un 70% la vida útil de los rodamientos y componente sometidos a fricción¹⁶. Es por esto, que el monitoreo de los aceites y lubricantes ofrece una herramienta útil para evaluar la degradación natural de los componentes y

aditivos. Esto lleva a que se tenga definido la toma de muestras, tiempo de oxidación y aditivos presentes en el lubricante¹⁷.

En las técnicas de análisis de aceites hay tres aspectos fundamentales que se deben analizar:

Figura 6 Aspectos fundamentales del análisis de lubricantes



- La **degradación de lubricante** permite establecer las sustituciones de aceites basado en el estado real del lubricante y no en el tiempo de servicio que este lleva en el equipo. Ya que las sustituciones basadas en las frecuencias sugeridas por el fabricante no tienen en cuenta el tiempo de servicio real del equipo.

¹⁶ TEROTECNIC, Análisis de aceites y lubricantes, [Online]. Available: www.terotecnic.com/mantenimiento-predictivo/tribologia.html. [Accessed 07 09 2019].

¹⁷ WAKIRU, J. PINTELON, L. MUCHIRI, P. and CHEMWENO, P. A review on lubricant condition monitoring information analysis for maintenance decision support, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 118, pp. 108-132, 2019.

Es decir, el fabricante puede sugerir cambios de aceite semestralmente, sin importar si el equipo opera 8, 16 o 24 horas diarias. A partir de este concepto, es posible incrementar las frecuencias de cambio de aceites si este se encuentra en buen estado; o en su defecto, adelantar los cambios cuando la viscosidad no asegura una lubricación eficaz para los componentes¹⁸.

- El **desgaste de los componentes del equipo** es posible percibirlo por la presencia de partículas férricas y no férricas suspendidas en el aceite. De acuerdo con la composición y cantidad de material particulado, es posible predecir la fuente del desgaste, bien sea por cojinetes, engranajes, rodamientos o cualquier otro componente¹⁹.
- Por último, con el análisis de muestras de aceites es posible determinar la **presencia de componentes sólidos y líquidos** diluidos en las unidades hidráulicas del equipo. En este caso las principales fuentes son la humedad o filtraciones de refrigerante, cuando hay presencia de líquidos; u hollín cuando se debe a contaminación por componentes sólidos. En cualquiera de los casos, la presencia de contaminantes requieren el cambio inmediato del aceite, ya que estaría afectando la integridad del lubricante, y también advierte de la corrección de fisuras, grietas o fugas que estén permitiendo el acceso de los contaminantes²⁰.

¹⁸ PREDITECNICO [04 03 2013] [Online]. Available: www.preditecnico.com/2013/03/el-analisis-de-aceites-como-tecnica.html. [Accessed 07 09 2019].

¹⁹ PREDITEC [Online]. Available: <http://www.preditec.com/servicios/analisis-de-aceites-322621/>. [Accessed 07 09 2019].

²⁰ RELIANZ Mining Solutions, Interpretación de resultados de análisis de lubricantes como herramienta en el monitoreo de condiciones, Soledad: Cat SOS Services.

Luego de conocer los aspectos fundamentales de la lubricación predictiva, es necesario saber que este programa ofrece mayores beneficios, tales como extender la duración de los aceites, prevenir fallas por degradación del lubricante, advertir y tomar acciones por la presencia de elementos de desgaste, reducir gastos y el impacto ambiental por el uso racional de los aceites, llevando todo esto a la planificación oportuna de las revisiones de componentes y cambios de aceites.

Figura 7 Beneficios de la lubricación predictiva



2.3.4. Lubricación proactiva: Como resultado de la lubricación predictiva, la presencia de contaminantes suspendidos o diluidos en aceites advierten de fallas reales o potenciales del equipo, por lo que es del campo de la lubricación proactiva buscar y corregir el origen de dicha falla incrementando de esta manera la confiabilidad del equipo^{21,22}.

En este programa de lubricación además, se busca la corrección de las fallas mediante la aplicación del lubricante correcto, con el fin de trabajar activamente por la extensión de la vida útil del lubricante y el desempeño del equipo. Es por esto, que en esta etapa se consideran el uso de filtros y elementos autolimpiantes que mantengan la integridad del fluido en la máquina.

Para el éxito del programa, es necesario involucrar al fabricante y proveedor de los lubricantes para que brinde asesoría en las mejoras de lubricación e incrementar su desempeño, impactando en el menor consumo de energía por fricción. También representa una figura importante al proveer nuevas tecnologías y estudios que permitan implementar lubricantes ecoamigables o con menor toxicidad para el ambiente²³.

Como complemento al análisis de aceite, se debe monitorear la temperatura, a fin de los recalentamientos del equipo no excedan el tope máximo que afecte la viscosidad del equipo; y también realizar análisis de vibraciones con el fin de determinar los efectos de desgastes en rodamientos y cojinetes.

En conclusión, el programa de lubricación proactiva busca el mejoramiento continuo de los programas de lubricación que se hayan implementado²⁴.

2.3.5. Aceites y lubricantes: Los lubricantes son clasificados de acuerdo con las condiciones de servicio que van a desempeñar y el tipo de equipo en el que se utilizarán. De acuerdo con esto, el desempeño del lubricante variará si se usa en un equipo automotriz a si se usa en un equipo industrial.

²¹ GRANADOS, A. Política de lubricación en una empresa industrial, Tribología y la competitividad, vol. 1, pp. 26-30, 2008.

²² MEZA, A. Lublearn by Noria Latin America, [23 01 2015] [Online]. Available: noria.mx/lublearn/lubricacion-proactiva-en-practica/. [Accessed 07 09 2019].

²³ SMYTH, L. Taking a proactive approach to lubrication management, World Pumps, vol. 2009, no. 508, p. 8, 2009.

²⁴ GALLEGO, D. Implementación del programa de lubricación productiva PLP en la planta de Colanta Armenia, Medellín, 2009.

Las funciones básicas de los lubricantes son: reducir la fricción, disipar el calor generado como resultado del contacto entre las superficies, desplazar los contaminantes, disminuir el rozamiento y el desgaste, minimizar la herrumbre y corrosión y transmitir la potencia. Todas funciones van ligadas a las características del aceite y su aditivos, así como la viscosidad, la resistencia a la oxidación y su punto de fluidez²⁵.

Los principales componentes de un lubricante se pueden observar en la figura 8:

Figura 8 Componentes de los lubricantes



➤ **Bases**

- **Aceites minerales**

Son aceites compuestos principalmente por moléculas de carbono, y representan entre el 80 al 90% de la base del lubricante, aportando el porcentaje restante los aditivos. Las principales características, tales como viscosidad, resistencia a la oxidación, punto de inflamación y fluidez, son definidas por el tipo de hidrocarburo que se utilice como base.

²⁵ ESQUIVEL, R. Tipos de aceites lubricantes para máquinas, herramientas y mucho más, Revista Ferrepat, 2018.

De acuerdo con el porcentaje de hidrocarburo (moléculas de carbono) que contenga el aceite, este tendrá mayor estabilidad a temperaturas altas, ofreciendo como ventaja que la viscosidad no varíe significativamente a cambios bruscos de temperatura.

Las principales bases minerales son las parafínicas, nafténicas y aromáticas, las cuales son explicadas en la Tabla 2.

Tabla 2 Características de los aceites minerales

Base	Índice de Viscosidad	Resistencia a la Oxidación	Volatilidad	Formación de carbón
Parafínica	Alto (poca variación de la viscosidad con cambios de temperatura)	Bajo	Bajo	Formación de carbones durante el proceso de degradación
Nafténicas	Bajo	Bajo	Alto	Reducida tendencia a formar carbones
Aromáticas	Muy bajo	Alto	Alto	Tienden a formar gomas y resinas durante el proceso de degradación

(FUENTE: Tomado de Tribología y Lubricación, P. Albarracín, 2015)

- **Aceites sintéticos**

Los lubricantes sintéticos provienen de la mezcla entre un hidrocarburo y otras sustancias químicas que potencialicen o supriman las propiedades de la base de hidrocarburo. Mediante este método se obtienen lubricantes con un alto índice de viscosidad, permitiendo que el lubricante mantenga sus propiedades a variaciones abruptas de temperatura, Otro beneficio que se obtiene con estos lubricantes es su alta resistencia a la oxidación, prolongando la vida útil y reduciendo los costos por cambios rutinarios de aceite.

Mediante el uso de otras sustancias químicas, se puede reducir la inflamabilidad, reducir las emisiones de sustancias contaminantes, incrementar la resistencia a corrosión, incrementar la conductividad térmica y optimizar el uso de la energía.

Tabla 3 Características de los aceites sintéticos

Base	Índice de Viscosidad	Resistencia a la Oxidación	Volatilidad	Formación de carbón
Hidrocarburos sintetizados	Muy Alto	Alto	Bajo	No forman gomas ni residuos de carbón
Esteres orgánicos	Alto	Alto	Bajo	Formación de cauchos durante la degradación
Poliglicoles	Muy Alto	Alto	Muy alto	Las moléculas de carbono se evaporan sin formar cenizas
Esteres de fosfato	Bajo	Bajo	Bajo	Tienden a formar productos corrosivos
Siliconas	Alto	Muy alto	Bajo	Tienden a formar productos abrasivos
Esteres de silicato	Alto	Alto	Bajo	Tienden a disolverse en el agua
Esteres de polifenil	Muy Alto	Muy Alto	Bajo	Formación de gomas por la muy alta viscosidad
Fluorocarbonos	Alto	Muy Alto	Muy Alto	Tienden a evaporarse

(FUENTE: Tomado de Tribología y Lubricación, P. Albarracín, 2015)

- **Aceites vegetales**

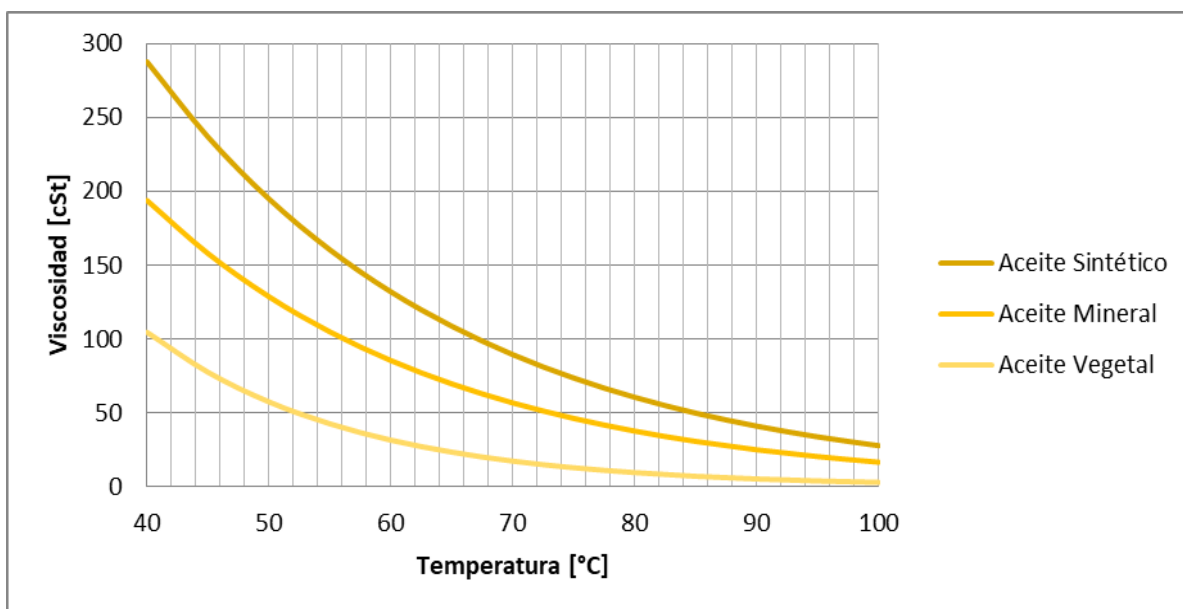
Los lubricantes vegetales provienen de derivados agrarios, permitiendo que estos sean biodegradables y renovables. La principal ventaja del uso de estos aceites es que una vez degradados no son tóxicos ni ejercen efectos negativos sobre el ambiente. Las principales fuentes para los aceites vegetales son el olivo, coco, girasol, lino, soya, palma, entre otros.

En general estos lubricantes tienen alto índice de viscosidad; sin embargo, son mejorados con aditivos para tener un mejor desempeño a nivel comercial. También tienen un alto punto de inflamación y baja resistencia a la oxidación, esto hace que estos lubricantes sean utilizados en rangos variados de temperatura.

En términos generales, estos fueron los primeros lubricantes en ser desarrollados, junto con los de base animal, sin embargo se han visto eclipsados por el uso de los lubricantes minerales y sintéticos.

En la Figura 9, se muestra cómo varía el índice de viscosidad de los distintos lubricantes de acuerdo con las variaciones de la temperatura.

Figura 9 Variación de la viscosidad en distintas bases lubricantes



➤ **Aditivos**

Debido a las condiciones operacionales, los lubricantes son sometidos a altos estándares de calidad con el fin de mantener las propiedades bajo distintos rangos de temperatura y/o presión. Esto ha llevado a que la gran mayoría de lubricantes tengan mínimo un aditivo, el cual varía ente el 1% y el 30% del volumen total del lubricante²⁶.

Los aditivos más comunes que se suelen agregar a las bases lubricantes son:

- Mejoradores de índice de viscosidad
- Depresores de punto de fluidez
- Modificadores de fricción
- Supresores de la oxidación
- Supresores de corrosión
- Supresores de herrumbre
- Antiemulsionantes
- Antiespumantes
- Detergentes
- Aditivos de alta presión
- Depresores de toxicidad
- Colorantes

➤ **Espesantes**

En algunos lubricantes, y principalmente en las grasas, aparte de la base y los aditivos, se utilizan espesantes que permiten que determinadas propiedades sean mejoradas, incluso más allá de lo que lo logran los aditivos.

²⁶ ALBARRACÍN, P. Tribología y Lubricación, Medellín, 2015.

Las principales propiedades modificadas son la capacidad de soportar altas temperaturas o humedad, acidez y otras condiciones que degradan el lubricante²⁷.

Las principales sustancias espesantes son:

- **Sodio:** Mejora el rendimiento a temperaturas altas y a condiciones vibratorias. Brinda resistencia a la oxidación y son de fácil remoción. El contenido volumétrico varía entre el 14% y el 18%.
- **Calcio:** Ofrecen resistencia al efecto de agua sin absorberla, lo que hace que sea corroído con facilidad. Ofrece buen rendimiento en condiciones moderadas de vibración. El contenido volumétrico varía entre el 21% y el 25%.
- **Litio:** Ofrecen resistencia al agua mas no a sus efectos corrosivos. Son útiles para condiciones de alta temperatura y humedad. El contenido volumétrico varía entre el 9% y el 11%.
- **Aluminio:** Además de la resistencia al agua, ofrece resistencia a la corrosión. Su uso se ve limitado debido al alto costo.
- **Bisulfuro de molibdeno (MoS₂):** Poseen bajo coeficiente de fricción, lo que ofrece resistencia al desgaste de los componentes. Presentan buen desempeño en condiciones de humedad, por su resistencia al agua.
- **Poliurea:** Es útil en condiciones de alta temperatura, con carga elevada y alta velocidad.

2.3.6. Rutinas y cartas de lubricación: La lubricación de los equipos no puede ser en periodos arbitrarios, sino que esta debe ser definida en frecuencias acordes a las sugeridas por el fabricante del equipo. Adicional a esto, el área de mantenimiento debe ejercer control en el uso y manejo de los aceites y lubricantes, a fin de que durante la ejecución de las rutinas no se apliquen cantidades desconocidas de lubricante.

²⁷ ARCINIEGAS, G. Grasas lubricantes, La tribología y la competitividad, vol. 1, pp. 31-38, 2008.

Todas estas medidas llevan a que el equipo se desempeñe dentro de las indicaciones técnicas del fabricante²⁸.

Dentro del proceso de lubricación, la información debe estar disponible y completa, para que el personal de operaciones y mantenimiento tengan acceso a ella. Esto lleva a que se desarrollen cartas tribológicas en las que se inventorean todos los aceites que lleva cada equipo, junto con las frecuencias de las rutinas y la descripción del aceite.

En las cartas de lubricación se deben detallar las actividades a realizar y los sistemas involucrados en el equipo. Con esto se logra una alta confiabilidad en el equipo. Por tanto, la descripción detallada del equipo, componentes y mecanismos debe estar especificada en el formato, así como el número de puntos de lubricación con los que el equipo cuenta.

Las cartas deben detallar además, las frecuencias y métodos de lubricación requerido por el equipo; y esto debe estar acompañado de la descripción detallada del lubricante utilizado y la cantidad que se debe aplicar²⁹.

El uso de las cartas de lubricación trae los siguientes beneficios:

- Tener información completa, actualizada y a la mano para todos los equipos rotativos de la planta.
- Reducir el número de lubricantes a los necesarios.
- Reducir los costos con la optimización del uso de los lubricantes.
- Configurar los equipos con las válvulas de drenaje, indicadores de nivel de aceite y rótulos que permitan mejorar el seguimiento de las rutinas de lubricación.

²⁸ CALLEJAS, D. Diseño de rutinas y cartas de lubricación para los centros de mecanizado CNC de la compañía General de Aceros SA Sucursal Av. 68, Bogotá, 2015.

²⁹ INGENIEROS DE LUBRICACIÓN SAS [Online]. Available: www.ingenierosdelubricacion.com/productos/cartas-de-lubricacion/. [Accessed 09 09 2019].

- Contar con información de la toma periódica de muestras de aceite y los resultados de los análisis de laboratorio; así como de las fechas de los cambios de filtros de aceite.
- Evaluar las propiedades de los aceites y el nivel de desgaste de los componentes de acuerdo con la norma ASTM que se esté siguiendo.

Figura 10 Carta de lubricación

NOMBRE DEL EQUIPO									
Nombre del componente									
Nombre del sistema						Cantidad de lubricante [L]			
Lubricación			Lubricante						Rótulo
Punto	Frecuencia	Método	Clase	Fabricante	Referencia	Grado	Tipo	Categoría	
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									

(FUENTE: Tomado de ingenierosdelubricacion.com)

Las cartas de lubricación están compuestas por las siguientes partes:

- **Datos de equipo:** donde se especifica el nombre del equipo, componente y sistema en el que se realizará la lubricación.
- **Cantidad de lubricante:** se especifica la cantidad de lubricante que lleva el reservorio, esta puede estar expresada en litros (L), galones (gal) o metros cúbicos (m³).
- **Punto de lubricación:** se especifican los puntos por los cuales se realiza la lubricación del equipo.
- **Frecuencia:** en este punto se debe especificar la frecuencia con la que se deben realizar las rutinas de lubricación, diaria, semanal, mensual, anual, etc.
- **Método:** una vez identificado el punto de la máquina por el que se realizará la lubricación, se debe manifestar el método más óptimo para realizar una

buena lubricación, ya que en un buen diseño de la máquina, el lubricante debe llegar en las cantidades requeridas a los rodamientos y engranajes.

Los métodos son muy variados, pero se pueden destacar los siguientes:

- Lubricación manual mediante el uso de elementos como aceitera, pistolas engrasadoras, bombas y otros accesorios de bajo costo.
 - Lubricación mecánica gota-gota, en la que se instalan flautas que dosifican el paso del aceite a las áreas de contacto.
 - Lubricación por cadena, en la que la cadena, además de transmitir el movimiento, transporta el aceite desde el reservorio hasta el eje a través de los eslabones.
 - Lubricación térmica, en este método se deja un espacio en el reservorio para que con el aumento de la temperatura, el aire se expanda e impulse el aceite a la válvula dosificadora; permitiendo el paso de aceite a las áreas de contacto.
 - Lubricación neumática, en este método, la unidad lubricadora trabaja en conjunto con el flujo de aire del sistema, el cual mediante la presión, impulsa el paso del lubricante a través de los ductos.
 - Lubricación por salpique de aceite, en el cual el elemento conducido se encuentra parcialmente sumergido en el reservorio de aceite, a fin de que al realizar movimientos giratorios lubrique el eje y la superficie de contacto con el elemento conductor.
- **Clase:** la información del lubricante debe ser lo más detallada y clara posible, ya que con esto se evitarán errores como aplicar lubricantes incorrectos o en frecuencias atípicas. La clase hace referencia al estado de la materia en el que se encuentra el lubricante, es decir, líquido, semisólido (grasas) o sólido.
- **Fabricante:** se especifica el proveedor o fabricante del lubricante requerido.
- **Referencia:** se expresa la referencia o parte número con el que se obtiene el lubricante.

- **Grado:** de acuerdo con el sistema ISO, que es el principal ente internacional para la estandarización, clasifica los aceites en grados. El grado hace referencia al valor en el que oscila la viscosidad medida en [cSt]. De esta manera, un aceite grado ISO 10, puede tener una viscosidad entre 9 cSt y 11 cSt. Otros sistemas conocidos para clasificar aceites son la ASTM, AGMA, SAE y la API. En este punto también se describe si el aceite es monógrado o multígrado.
- **Tipo:** el tipo del lubricante dependerá de la base que se utilice, bien sea mineral, sintético o vegetal (los cuales se explicaron en la sección 2.3.5).
- **Categoría:** la categorización de los lubricantes está estandarizada por distintas entidades y dependerá del sector en el que se desempeña el equipo o la compañía. Es así como hay categorías para la industria alimenticia, automotriz, para engranaje y motores y para equipos de tipo industrial.
- **Rótulo:** la rotulación dependerá de lo que defina la compañía para identificar cada tipo de lubricante.

2.3.7. Consecuencias de una mala lubricación: La implementación de un correcto plan de lubricación depende de distintos factores como la selección y monitoreo del lubricante, control de la contaminación y mantenimiento del nivel de aceite. Un mal manejo de alguno de estos factores genera distintas consecuencias en la salud del equipo y en el estado general del aceite.

La mala selección de un aceite, o la selección de uno de baja calidad, pueden generar el crecimiento acelerado de la corrosión o la oxidación, ya que como se vio en la sección 2.3.5, los aditivos influyen en que el lubricante tenga determinadas propiedades beneficiosas para el contexto operativo del equipo.

En el caso del monitoreo, es sabido que los lubricantes sufren un proceso de degradación natural, hecho que se ve reflejado en la reducción de la viscosidad o en la formación de gomas o carbones; todo esto genera que la película que separa

el contacto de metal-metal se vaya reduciendo, generando desgaste en los componentes.

Por otro lado, el sistema de lubricación no está exento a la presencia de fugas y accesos de material particulado. Es por esto, que fugas de refrigerante al reservorio de lubricante generan que este pierda sus propiedades principales. Así como el paso del hollín o de la tierra incrementa los valores de silicio y aluminio, por lo que resulta más abrasivo para los componentes³⁰. Las principales consecuencias de un mal proceso de lubricación son:

- Desgaste prematuro de los componentes o acortamiento de la vida útil del activo.
- Ruidos producidos por el contacto de metal-metal.
- Roturas y otras fallas catastróficas en elementos móviles al no haber lubricantes que eviten el rozamiento.
- Incrementos en la temperatura de operación del equipo, lo cual puede generar pandeos y deformaciones en los componentes por dilatación térmica.
- Debido a la contaminación de los aceites, se puede generar efectos en la calidad y precisión de los equipos.

Todas estas consecuencias tendrán un impacto económico y en el peor de los casos, puede repercutir en consecuencias legales por incumplimiento de contratos o por la pérdida de vidas humanas.

³⁰ RELIANZ Mining Solutions, Interpretación de resultados de análisis de lubricantes como herramienta en el monitoreo de condiciones, Soledad: Cat SOS Services.

3. MARCO CONCEPTUAL

Entre los principales servicios de la empresa de la industria metalmecánica, se encuentra la reparación y reconstrucción de componentes, manteniendo los más altos estándares de calidad y precisión. La compañía servicios de metalización, mecanizado y soldadura.

Las distintas líneas de proceso de la compañía evalúan no solo componentes de clientes del sector automotriz e industrial, sino que también brindan soporte a proyectos mineros y de construcción civil. Uno de sus principales mercados es el de rectificación y maquinado de piezas, es decir, dar medida y tolerancia a los componentes que procesan en los equipos de control numérico computarizado (CNC).

Los equipos CNC son de los más variados con el fin de ser versátiles a las necesidades de los clientes. Es así como fresadoras, tornos paralelos y verticales, rectificadoras, alesadoras y centros de mecanizado, maquinan más del 80% del lote de piezas que recibe la empresa de la industria metalmecánica. Bajo este contexto, la correcta operación y mantenimiento de estos equipos impactan en la producción e imagen de la compañía.

Es por esto que la compañía cuenta con personal capacitado en herramientas computacionales de CAD/DAM para simular el maquinado de componentes, cuenta con tecnología de medición 3D y herramientas tecnológicas que permiten integrar los requerimientos del cliente a la planeación de los trabajos. Todo esto, con la visión de garantizar precisión, menores tiempos de entrega y calidad en las reparaciones, con la mayor eficiencia durante el proceso; reduciendo así la generación de partículas contaminantes y optimizando el uso de los equipos.

Debido a la criticidad de los equipos CNC, la compañía ha dispuesto abastecimiento de repuestos críticos y partes de alta rotación que pueden

impactar negativamente durante una parada prolongada del equipo. Esto incluye el abastecimiento de lubricantes y refrigerantes que garanticen que los equipos, tribológicamente, estén en un estado óptimo. El listado de equipos representativos se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4 Listado de equipos CNC de la empresa de la industria metalmecánica

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
ALESADORAS CNC	5 EQUIPOS
CENTROS DE MECANIZADO	4 EQUIPOS
RECTIFICADORAS VERTICALES CNC	6 EQUIPOS
TORNOS PARALELOS CNC	7 EQUIPOS
TORNOS VERTICALES CNC	2 EQUIPOS

El listado de equipos real se mantiene en completa reserva debido a la confidencialidad con la empresa de la industria metalmecánica en la cual se realizaron notables avances del presente proyecto. Sin embargo, como se expuso en la justificación del proyecto, se tomarán los parámetros para el siguiente equipo en particular:

Tabla 5 Alesadora CNC Doosan

DESCRIPCIÓN	MARCA	MODELO
ALESADORA CNC	DOOSAN	DBC110

4. MARCO LEGAL Y NORMATIVO

La normatividad colombiana no cuenta con regulaciones sobre la adquisición de aceites y lubricantes. Sin embargo el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible ha desarrollado manuales y resoluciones sobre la disposición final de los aceites usados producto de la operación de las empresas. Es por esto que la Resolución 1188 de 2003 contiene los procedimientos, obligaciones y prohibiciones para todos los involucrados en el proceso de manejo, almacenamiento, transporte, uso y disposición de los aceites usados. En esta resolución se busca minimizar los riesgos, buscar la seguridad y proteger las vidas humanas y el medio ambiente³¹.

La Resolución 1188 de 2003 nace como resultado del Convenio de Basilea, en el que Colombia participó y firmó el tratado junto a otros 170 países. En este tratado se establecieron los procedimientos para la protección del medio ambiente en función del manejo y la disposición de los residuos peligrosos. Dentro de los apartados, se toca el tema de los aceites usados, los cuales según la Ley 253 de 1996 son considerados residuos peligrosos^{32,33}.

Dentro del marco normativo de la ASTM (American Society for Testing and Materials), se han desarrollado distintas pruebas para establecer las propiedades físico-químicas de los lubricantes y verificando que estos se mantengan desempeñando sus funciones. De esta manera se logra garantizar su calidad y evaluar su comportamiento en distintas aplicaciones.

³¹ Resolución 1188 de 2003 - Manual de normas y procedimientos para la gestión de aceites usados, 2003.

³² Ley 253 de 1996 - Aprobación del Convenio de Basilea, 1996.

³³ Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Manual técnico para el manejo de aceites lubricantes usados de origen automotor e industrial, 2014.

Es así como se han desarrollado las siguientes normas que tienen un enfoque en el marco de las propiedades físicas, térmicas, químicas y superficiales de los aceites, que buscan evaluar el color, la viscosidad, el punto de inflamación, el punto de combustión, el punto de fluidez, el contenido de residuos de carbón y cenizas sulfatadas, su disposición a la corrosión o la herrumbre, la emulsibilidad, entre otras propiedades para los cuales está el procedimiento a seguir en un análisis de aceite.

Tabla 6 Propiedades físico-químicas de los lubricantes

Tipo	Propiedad	Método	Función
Propiedades físicas	Gravedad específica	ASTM D287	Relación entre el peso de un volumen de aceite y el peso de un volumen idéntico de agua
	Color o fluorescencia	ASTM D1500	Comparativo entre un aceite nuevo y uno usado
	Viscosidad	ASTM D88	Resistencia interna de las moléculas de aceite a fluir a una temperatura determinada
		ASTM D445	Estabilidad de la viscosidad de un aceite a variaciones de temperatura
	Índice de viscosidad	ASTM D567	Estabilidad de la viscosidad de un aceite a variaciones de temperatura
Propiedades térmicas	Rigidez dieléctrica	ASTM D877 ASTM D1816	Capacidad de aislamiento eléctrico del aceite
	Punto de inflamación	ASTM D92	Temperatura mínima a la que los gases se inflaman en contacto con una llama
		ASTM D93	Temperatura más baja a la que la aceite se mantiene como fluido
	Punto de fluidez	ASTM D97	Temperatura a la que no se observa fluidez del aceite
Propiedades químicas	Punto de congelación	ASTM D97	Temperatura a la que no se observa fluidez del aceite
	Residuos de carbón	ASTM D189	Cantidad de carbón expuesto luego de un proceso de evaporación del aceite
		ASTM D524	Cantidad de materiales no combustibles presentes en el aceite
	Cenizas sulfatadas	ASTM D482 ASTM D874	Cantidad de base requerida (KOH) para neutralizar la acidez de la muestra de aceite
	Número de neutralización	ASTM D664 ASTM D974	Cantidad de ácido requerido (HCL) para neutralizar la alcalinidad de la muestra de aceite
	Número básico total	ASTM D664 ASTM D2896	Cantidad de ácido requerido (HCL) para neutralizar la alcalinidad de la muestra de aceite

Propiedades superficiales	Corrosión	ASTM D130	Tendencia a la corrosión
	Herrumbre	ASTM D665	Tendencia a la oxidación
	Demulsibilidad	ASTM D1401	Resistencia del aceite a emulsificarse en contacto con el agua
		ASTM D2711	
	Emulsibilidad	ASTM D1401	Capacidad del aceite no soluble en agua a emulsificarse
		ASTM D2711	
Formación de espuma	ASTM D892	Tendencia a formación de espuma por agitación enérgica	
Tensión interfacial	ASTM D971	Resistencia de dos fluidos no miscibles a la separación	

(FUENTE: Tomado de Tribología y Lubricación, P. Albarracín, 2015)

5. METODOLOGÍA - LUBRICACIÓN CENTRADA EN CONFIABILIDAD

Cuando se implementan programas de lubricación que buscan mejorar la confiabilidad del equipo y reducir los costos operativos, se debe tener un panorama general de toda la línea de proceso que recorre el lubricante, desde su adquisición hasta su disposición final. Por lo que para lograr los resultados deseados, se deben integrar todas las áreas involucradas en el ciclo de vida del aceite.

Es por esto que la metodología de la lubricación centrada en confiabilidad incluye la selección del lubricante; compra, recepción y almacenamiento del lubricante; manejo y aplicación de los lubricantes; control de contaminación; análisis de muestras de aceites, y la disposición final y mejora continua del proceso.

Figura 11 Metodología de lubricación centrada en confiabilidad



5.1. SELECCIÓN DE LUBRICANTES

Cuando se adquiere un equipo nuevo y se coloca en operación, el dueño del equipo debe cumplir con las especificaciones dadas por el fabricante con el fin de mantener la garantía durante el periodo pactado. Entre todas estas especificaciones, se encuentra el tipo de lubricante que se debe utilizar en el equipo, el cual cuenta con aditivos que evitan el desgaste prematuro de las piezas.

Luego del periodo de garantía, el dueño del equipo es libre de seleccionar proveedores locales que homologuen el aceite requerido por la máquina y que cumplan con el mismo objetivo de calidad, accesibilidad y rendimiento que el lubricante original. En función de esto, se pueden elaborar los planes de lubricación con las frecuencias sugeridas por el fabricante³⁴.

Para la selección de un lubricante, se debe tener en cuenta las especificaciones basadas en los estándares técnicos y desempeños requeridos por el equipo. Para cada equipo en particular se deben definir las siguientes especificaciones para lograr la selección correcta del lubricante:

- **Alcance:** Se define la función o propósito del lubricante, el sistema en el que interviene y los componentes en los que genera la película lubricante. Se define tipo de aceite y los principales aditivos, la temperatura de trabajo y características general de la aplicabilidad del lubricante.
- **Propiedades físicas y químicas:** En este punto se definen los parámetros esperados de acuerdo con las pruebas ASTM tales como, viscosidad, punto de inflamación, punto de fluidez, entre otras propiedades.
- **Propiedades de desempeño:** En concordancia con el punto anterior, se definen los parámetros de desempeño esperados del lubricante, tales como resistencia a la corrosión y a la oxidación, resistencia a la emulsibilidad, entre otras propiedades.
- **Compatibilidad:** En este punto se deben definir las características compatibles y de homologación entre el lubricante sugerido por el fabricante y el lubricante de consecución con proveedores locales. Es decir, se definen materiales presentes en el aceite, formulaciones especiales e interacción con otros fluidos.

³⁴ MEZA, A. Lublearn by Noria Latin America [23 01 2015]. [Online]. Available: noria.mx/lublearn/lubricacion-proactiva-en-practica/. [Accessed 07 09 2019].

- **Aprobación del lubricante:** En algunos casos específicos, el lubricante puede contar con estándares de calidad certificados por alguna entidad internacional, por lo que una vez seleccionado el aceite, se debe validar que este cumpla y sea certificado por el mismo ente; a fin de garantizar que su uso es seguro en el equipo.
- **Restricciones:** Se describen las propiedades no deseadas, bien sea por aspectos ambientales, de seguridad o toxicológicos.
- **Requisitos para el proveedor:** De acuerdo con las certificaciones que tenga la empresa, es posible que el proveedor esté certificado por la ISO 9001 o ISO 14001 para cumplir con normas de calidad o requisitos ambientales producto del manejo de sustancias peligrosas.
- **Precio:** No sólo importará el cumplimiento de las especificaciones dadas, sino que el proveedor debe ofrecer precios competitivos o descuentos de acuerdo con el volumen de aceites que se adquieran.
- **Disposición final:** Se definen requisitos para la disposición final del aceite, de acuerdo con los elementos contaminantes y la proporción de estos en el volumen total. Se debe tener claro que se debe cumplir con las regulaciones y normativas corporativas y estatales³⁵.

Figura 12 Elementos para la selección de un lubricante



³⁵ MEZA, A. Lublearn by Noria Latina America, [15 03 2018]. [Online]. Available: noria.mx/lublearn/seleccion-de-lubricantes-con-base-en-especificaciones/. [Accessed 12 09 2019].

5.2. ALMACENAMIENTO DE LUBRICANTES

Una vez se adquiere un lubricante, se debe inspeccionar que cumple con los estándares de calidad y que viene en la cantidad y presentación solicitada, en algunos casos, se deben realizar pruebas a una muestra con el fin de que se pueda aceptar o rechazar el lubricante. Luego que se recibe, el aceite se debe almacenar en un área que asegure la integridad y vida útil. Se deben seguir todos los procedimientos de seguridad y ambientales para asegurar que el lubricante permanezca en óptimas condiciones en el lugar de acopio.

En este punto también se deben definir las etiquetas e identificaciones de los lubricantes a fin de no confundirlos en la etapa de aplicación. Además de esto, el área en la que se ubiquen deben prevenir las siguientes causas de deterioro:

- Contaminantes y otros materiales particulados
- Humedad y condensación
- Equipos deteriorados
- Exposición a químicos o vapores
- Poca ventilación
- Exposición al calor excesivo
- Exposición al frío excesivo
- Exceder el tiempo de vida útil del aceite

La disposición de los contenedores, debe ser tal que eviten el contacto con la humedad y los desniveles del terreno, ya que la mayoría de contenedores son metálicos, por lo que pueden corroerse y afectar la integridad del aceite o en su defecto, fugarse e impactar negativamente en la seguridad o el ambiente.

5.3. MANEJO Y APLICACIÓN DE LUBRICANTES

La manipulación de los lubricantes debe ser cuidadosa, de manera que se proteja la integridad del producto; por lo que se debe contar con implementos de seguridad, herramientas, contenedores, kits antiderrames y personal entrenado en el manejo de aceites y la atención de derrames. Dentro de esta fase se deben elaborar las cartas de lubricación, con el fin de detallar la correcta aplicación, inspección y administración de los lubricantes durante el tiempo de servicio.

5.4. CONTROL DE CONTAMINACIÓN

Uno de los elementos más importante del manejo de los lubricantes es el control de la contaminación y la disposición final de los aceites usados. Esta fase está relacionada con la limpieza del lubricante, procesos de filtración y medidas de control.

Como medida de control, se debe remover, o en su defecto, restringir la interacción con elementos contaminantes hasta valores tolerables por la compañía. En este punto se deben definir las frecuencias de monitoreo de niveles de contaminación, verificando que se mantenga en los niveles parametrizados.

Los principales métodos para el control de contaminación son:

- Pruebas de parche y comparador de contaminación del fluido, mediante el análisis de los niveles de limpieza de manera visual.
- Conteo de partículas con microscopio.
- Conteo automático de partículas mediante el uso de sensores.
- Monitoreo por oscurecimiento de malla basado en códigos de contaminación.

5.5. ANÁLISIS DE LUBRICANTES

El análisis de muestras de aceite es una herramienta para medir la calidad, condición y tipo de lubricantes, lo cual permitirá determinar la vida remanente del aceite. En estas pruebas es posible evidenciar la presencia de contaminantes o el desgaste prematuro de los componentes. Incluso es un método útil para el análisis de causas de falla y la optimización de las frecuencias de lubricación.

En el análisis de aceites se deben considerar ciertos elementos que permitan diagnosticar correctamente el estado del lubricante. Estos elementos son:

- Identificar el equipo se monitorea, parámetros de operación, horómetros y frecuencias de inspección y cambio de aceites.
- Identificar el entorno operacional del equipo y del lubricante.
- Identificar los componentes y sistemas que interactúan con el aceite que se está analizando.

- Identificar el lubricante y sus principales propiedades, así como los parámetros base que sirven como soporte para comparar los resultados del aceite usado.
- Identificar el tiempo de servicio del lubricante en el equipo.
- Conocer el historial de fallas y reparaciones que pueden explicar la presencia de contaminantes o la degradación prematura del aceite.
- Conocer la tendencia de muestreos anteriores.
- Conocer los límites y objetivos de los factores evaluados en la muestra de aceite.
- Generar diagnóstico y decisiones de mantenimiento.

Dentro del resultado del reporte del análisis del aceite, es posible identificar parámetros que permiten conocer el estado del lubricante. Estos son:

- **Parámetros de desgaste:** Está dado por la evaluación de elementos como el aluminio (Al), cromo (Cr), cobre (Cu), hierro (Fe), plomo (Pb), silicio (Si) y estaño (Sn). Los niveles de alerta se establecerán en función de la revisión de muestreos anteriores.
- **Contaminantes:** El ingreso de suciedad o arena es posible identificarlo con el incremento de los parámetros de aluminio (Al) y silicio (Si) en una relación de 1:3; o en el conteo de partículas visibles en la muestra. El ingreso de refrigerante debido a fugas en el sistema es probable en este tipo de equipos; por lo que se puede identificar esta condición con el incremento de potasio (K) y sodio (Na) en proporciones mayores a los 25 ppm. Otro contaminante en lubricantes utilizados en la industria automotriz es el hollín, producto de la combustión.
- **Degradación del aceite:** Durante el proceso de degradación del aceite, se puede producir oxidación, nitración y sulfatación; lo cual promueve la formación de compuestos en el aceite que pueden ser observados mediante análisis infrarrojos. Otro factor que influye en la degradación del aceite es la viscosidad, la cual tiende a disminuir con el paso del tiempo de servicio del lubricante.
- **Presencia de agua:** La presencia de agua puede emulsionar el lubricante. Por lo que proporciones mayores al 0,5% confirman la presencia de agua.
- **Aditivos correctos:** La presencia de aditivos en el equipo ayuda a definir si el lubricante utilizado es el correcto. La presencia de calcio (Ca) y magnesio (Mg) se puede interpretar como la presencia de aditivos detergentes. En el caso del zinc (Zn) y fósforo (P) indican aditivos de antidesgaste y antioxidante. Otros elementos aditivos son el Molibdeno (Mo), boro (B) y bario (Ba).

5.6. DISPOSICIÓN DE LUBRICANTES USADOS

En la etapa de la disposición final del lubricante se involucran los roles de la empresa generadora del lubricante usado, la empresa transportadora en el marco de residuo peligroso, la empresa de acopio y almacenamiento y, por último las empresas encargadas de repotencializar el lubricante mediante la integración al mercado con otro uso, o en su defecto, la empresa que se encarga de realizar la disposición final.

Todas estas interacciones deben estar normalizadas y estandarizadas. Es por esto que el estado colombiano ha emitido manuales y reglamentos para el manejo de estos residuos³⁶. El manual para el manejo de aceites usados (emitido por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial) detalla los elementos y herramientas que debe poseer la empresa para manejar los residuos de forma segura y sin afectar la integridad del medio ambiente.

El punto clave de esta etapa es el etiquetado y rotulación de los aceites usados, y las condiciones generales para el transporte de los residuos de conformidad con el Decreto 1609 de 2002, que regula la manera segura de movilizar lubricantes usados desde el lugar de generación hasta el centro de acopio para su disposición final.

En esta etapa se busca realizar seguimiento y control de fugas, para reducir las emisiones de sustancias peligrosas y que afecte la seguridad y salud del personal operativo. También se busca reducir el consumo de lubricante e incrementar la productividad de la compañía, optimizando el uso de los recursos.

³⁶ Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, "Manual técnico para el manejo de aceites lubricantes usados," Bogotá, 2006.

6. RESULTADOS DE LA METODOLOGÍA

De acuerdo con la metodología expuesta en la sección 5 del presente documento, se procede a identificar los lubricantes requeridos por el equipo identificado previamente. De acuerdo con el manual del equipo, los distintos sistemas y subsistemas requieren los siguientes lubricantes:

Tabla 7 Tabla de lubricantes requeridos por la alesadora Doosan

Sistema	Lubricante	Cantidad [gal]
Unidad hidráulica	Mobil DTE 24	45
Bancadas	Vacuoline 533	6
Husillo	Mobil DTE 25	22
Unidad de bombeo	Vactra No. 2	12
Sistema oil mist	Mobil Velocite No. 6	1

(FUENTE: Tomado de Instruction Manual DBC 110, Doosan)

Conociendo los aceites requeridos por el equipo, se procede a documentar la metodología.

6.1. HOMOLOGACIÓN DE LUBRICANTES

De acuerdo con la metodología de la lubricación centrada en confiabilidad, la selección del lubricante se debe realizar en función de los factores descritos en la sección 5.1. Sin embargo, para facilidad del usuario del equipo, el fabricante en alianza con el representante de la marca en la región, provee el listado de lubricantes homólogos a los requeridos por el equipo para que se seleccione un lubricante óptimo, al mismo tiempo que este sea de fácil adquisición.

Tabla 8 Tabla de lubricantes equivalentes para la alesadora Doosan

Mobil	Shell	ESSO	Total
DTE 24	Tellus 32	Nuto H32	Azzola ZS32
Vacuoline 533	Tonna T32	Febis K32	Drosera MS32
DTE 25	Tellus 46	Nuto H46	Azzola ZS68
Vactra No. 2	Tonna T68	Febis K68	Drosera MS68
Velocite No. 6	Tellus C10	Spinesso 10	Azzola 10

(FUENTE: Tomado de Instruction Manual DBC 110, Doosan)

Dado que el fabricante del equipo ofrece la información para la selección del lubricante sin que este afecte la integridad del activo, se procede a seleccionar la opción de MOBIL™, que en Colombia está representado por TERPEL®, por la cercanía geográfica y la viabilidad estratégica.

6.2. ALMACENAMIENTO Y MANIPULACIÓN DE LUBRICANTES

Los lubricantes requeridos para el equipo que nos compete, y en general para todos los aceites y refrigerantes requeridos por los demás equipos CNC de la empresa de la industria metalmecánica, se distribuyen en presentación de 55 galones y se disponen en un área denominada ‘cuarto de lubricación’. De acuerdo con la sección 5.2, este espacio debe ser cerrado, sin embargo en este caso, si bien el área se encuentra entechada, no cuenta con muros perimetrales que aislen los aceites de las condiciones climáticas. Como primera medida se planteará la opción de encerrar el lugar, siempre manteniendo una excelente ventilación para evitar acumulación de vapores en espacios cerrados.

Los tambores de lubricante se ubican de acuerdo a la necesidad; ya que los lubricantes de mayor rotación se instalan en plataformas que facilitan la manipulación de estos tambores. Estas plataformas son similares a las mostradas en la Figura 13.

Figura 13 Almacenamiento de contenedores de aceite













Estas plataformas tienen dos funcionalidades principales:

- Facilitar extracción de lubricante en contenedores de menor capacidad, lo cual facilita la manipulación y traslado hacia los equipos.
- Evitar los derrames, contaminación y accidentalidad en el área, al contar con una base que sirve como reservorio para los excesos o fugas de lubricante.

Los de más lubricantes de uso menos frecuente se dejan en su tambor original y se extrae mediante bombas de succión en contenedores de 5 y 10 galones para las rondas de lubricación de los equipos CNC. Todos estos reenvasamientos de lubricantes, se deben realizar de la manera más limpia posible para evitar contaminación tanto en los contenedores como en los tambores de aceite.

Además de esto, el técnico lubricador debe tener claridad en el lubricante que utilizará ya que no se pueden permitir equivocaciones en el lubricante a utilizar. Para esto se establece un código de colores que permita identificar los distintos lubricantes que se encuentran en el área.

Tabla 9 Código de colores para identificación de lubricantes

Lubricante	Código de color
DTE 24	
Vacuoline 533	
DTE 25	
Vactra No. 2	
Velocite No. 6	
<i>Lubricante 6</i>	
<i>Lubricante 7</i>	
<i>Lubricante 8</i>	
<i>Lubricante 9</i>	
<i>Lubricante 10</i>	

En este mismo punto, se planteará al área de procesos y gestión documental el levantamiento de un procedimiento transversal a todas las áreas que involucre al almacén de repuestos e insumos, al área de mantenimiento y a las operaciones, para el recibo, transporte y almacenamiento de tambores de aceites, ya que un mal manejo de estos elementos ocasionaría el emulsionamiento y deterioro del aceite.

6.3. RUTINAS DE LUBRICACIÓN

Posterior a la selección del lubricante, y de acuerdo con la sección 5.3 de la metodología, se definen las rutinas de lubricación e inspección de los distintos reservorios del equipo. Para la empresa de la industria metalmecánica en cuestión, las rutinas se están haciendo de forma empírica sin revisar el horómetro del equipo y sin tener en cuenta la composición y desempeño en el activo. No obstante, el fabricante sugiere unos tiempos en los cuales se debe inspeccionar y cambiar el lubricante para el óptimo desempeño del equipo.

De esta manera, la presente monografía busca visibilizar los tiempos requeridos por el lubricante, y la importancia del seguimiento del horómetro. A continuación se muestran los horómetros a tener en cuenta para el monitoreo y cambio de lubricante.

Tabla 10 Horómetros para la inspección de lubricantes

Sistema	Revisar [h]	Reponer [h]	Monitorear [h]	Cambiar [h]
Unidad hidráulica	8	-	1000	2000
Bancadas	8	-	-	2000
Husillo	-	1000	-	-
Unidad de bombeo	8	40	-	-
Sistema oil mist	8	-	1000	2000

(FUENTE: Tomado de Instruction Manual DBC 110, Doosan)

De acuerdo con la Tabla 10, el lubricante de la unidad hidráulica, que es uno de los que en mayor proporción se encuentra presente en el equipo, se debe monitorear a las 1000 horas y cambiar a las 2000 horas. Contrario a esto, el lubricante se está cambiando anualmente sin saber el estado en el que se encuentra el lubricante. Esto puede estar ocasionando pérdidas a nivel económico, o en su lugar, se puede estar exponiendo el equipo a operar bajo condiciones de lubricante degradado.

En la Tabla 10, también se expone que el lubricante se debe revisar cada 8 horas y completar nivel de ser necesario. Esta información es útil para la definición de las cartas de lubricación. Ya que en ellas se puede especificar el sistema o componente al que se le está aplicando el aceite, así como la cantidad aplicada. Esto se expone con más detalle en la sección 6.4.

6.4. CARTAS DE LUBRICACIÓN

La implementación de la carta de lubricación hace parte de las mejoras respecto a la lubricación tradicional, ya que en este documento se puede hacer seguimiento a la cantidad de lubricante aplicado, al horómetro del equipo, a las condiciones del sistema. Es por eso que se sugiere el siguiente documento para poder medir y controlar la gestión del lubricador.

Figura 14 Carta de lubricación

CARTA DE LUBRICACIÓN					
Frecuencia Diaria <input type="checkbox"/> Semanal <input type="checkbox"/> Quincenal <input type="checkbox"/> Mensual <input type="checkbox"/> Semestral <input type="checkbox"/> Anual <input type="checkbox"/>		Tipo de Lubricante DTE 24 <input type="checkbox"/> Vacuoline 533 <input type="checkbox"/> DTE 25 <input type="checkbox"/> Vactra No. 2 <input type="checkbox"/> Velocite No. 6 <input type="checkbox"/>			
Sistema a lubricar	Lubricante	Cantidad	Horómetro	Método de aplicación	Observaciones
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					

En la Figura 14, se observa el formato sugerido para el seguimiento de las rutinas de lubricación. Este es aplicable para un equipo específico y para varios sistemas en simultáneo. En la frecuencia se debe marcar la(s) rutina(s) que se están lubricando al momento de la aplicación. De igual forma, se marca el o los lubricantes que apliquen. En este campo se establece un código de colores con los cuales se marcarán los tambores en los que se deposita el lubricante para facilitar la identificación. Uno de los campos de mayor relevancia es el horómetro del equipo; ya que este facilitará la determinación de fechas para monitoreo y

cambio del lubricante. De igual forma, la cantidad de lubricante aplicado y el seguimiento a este valor, permitirá identificar fugas o posibles ineficiencias en el proceso del lubricador.

6.5. INSPECCIÓN DE LOS LUBRICANTES

De acuerdo con la sección 5.5 de la metodología planteada, el monitoreo de los lubricantes es uno de los pilares que garantiza el éxito de la lubricación basada en confiabilidad. Por lo que se establecen tomas de muestra a las 1000 horas tal como se muestra en la Tabla 11. Sin embargo, dado que esta práctica no se ha implementado en la empresa de la industria metalmecánica, se realiza de forma inicial el monitoreo del aceite de la unidad hidráulica (DTE 24) del cual se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 11 Monitoreo de aceite - Elementos de desgaste

Elementos de desgaste (ppm)	Cu	Fe	Cr	Al	Pb	Sn	Si	Na	K	Mo	Ni	V	Ca	Mg	Zn	P
R460-48218-1309	3	2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	137	1	706	485

(FUENTE: Tomado de Laboratorio de Fluidos S•O•S)

Tabla 12 Monitoreo de aceite - Conteo de partículas

Condición de aceite / Conteo Partículas	ST	OXI	NIT	SUL	W	A	V100	ISO	4μ	6μ	10μ	14μ	21μ	38μ	50μ
R460-48218-1309	0	3	2	12	N	N	6.1	22/20/16	20316	5206	1284	480	120	15	5

(FUENTE: Tomado de Laboratorio de Fluidos S•O•S)

La muestra se tomó cuando el equipo tenía el horómetro en 26513 horas, el 6 de diciembre de 2019. Inicialmente el valor del horómetro no nos dice nada ya que se desconoce el tiempo de servicio del aceite, lo cual impide tomar decisiones en función del tiempo de servicio del aceite y de los cambios sugeridos por el fabricante del equipo.

En las conclusiones dadas por el laboratorio, se tiene lo siguiente:

Normal

DESCONOCIDO EL PERIODO DE SERVICIO DEL LUBRICANTE EN USO. DESGASTE DE METAL ACEPTABLE, SIN EMBARGO, POR CONTEO DE PARTICULAS EL ACEITE APARECE SUCIO, ALGUNAS PARTICULAS DEL SUELO SON VISIBLES, POSIBLE CONTAMINACION AL TOMAR LA MUESTRA. TOMA OTRA MUESTRA, INDIQUE EL TIEMPO DE USO DEL ACEITE PARA SEGUIMIENTO.

De acuerdo con esta información, el aceite se encuentra en buen estado por lo que no se requiere drenar y cambiarlo; sino que se mantiene en seguimiento hasta las próximas 500 horas del equipo. Se toma este valor como sugerido ya que se desconoce el tiempo de uso del aceite, lo cual puede llevar a usar el aceite más allá de sus capacidades. Además, dado que el valor del Silicio (Si) es diferente a

cero (0), es posible que haya suciedad, partículas de arena, al interior del sistema, por lo que se debe monitorear si corresponde a una mala toma de la muestra o a contaminación en el aceite.

Una vez se haga necesario el cambio del aceite, se tomará el horómetro del equipo y se establecerá como tiempo 0 horas del lubricante, a partir de lo cual se podrá analizar la tendencia de desgaste del aceite. Paulatinamente el seguimiento a los valores de desgaste del aceite permitirá incrementar la vida útil más allá de las 2000 horas sugeridas por el fabricante, así como anticipar fallas relacionadas con componentes rotativos al interior del equipo.

6.6. CONTROL DE CONTAMINACIÓN Y DISPOSICIÓN FINAL

Como se mostró en la sección 5.6, la disposición de lubricantes usados está regulada por la normatividad colombiana, por lo que la empresa de la industria metalmecánica se ajusta a estas normas que son además motivos de auditorías periódicas. Es por esto que se han establecido procedimientos para la demarcación de tambores de aceites con aceites usados y aguas oleosas resultantes de la operación normal de los equipos CNC. Además de esto hay procedimientos para el retiro de los lubricantes usados de las instalaciones a través de un ente especializado y regulado en el transporte de residuos peligrosos, el cual expide certificado por la disposición final de los mismos.

6.7. CAPACITACIÓN Y MEJORA CONTINUA

Como parte del programa de lubricación centrada en confiabilidad, el talento y las competencias humana juegan un papel importante para el seguimiento y la mejora del programa. Es por esto que las capacitaciones orientadas al personal que interviene el proceso de la lubricación permiten identificar fortalezas en el proceso manipulación, almacenamiento y disposición de aceites.

Las capacitaciones deben estar enfocadas en los siguientes temas inherentes a la metodología implementada:

- Divulgación del código de colores para la identificación de los lubricantes, como medida de prevención de uso de lubricantes incorrectos.

- Divulgación del uso y manejo de las cartas de lubricación y la importancia del diligenciamiento completo del documento.
- Desde el fabricante, se brindarán generalidades de los componentes sometidos a desgaste, la importancia de su correcta lubricación y los elementos del equipo en los cuales se realizan estas rutinas.
- Interpretación de los resultados de los análisis de aceites e importancia del seguimiento del horómetro del equipo.

De acuerdo con la metodología expuesta, se pueden identificar las fortalezas y debilidades que tiene la compañía para la implementación de un programa de lubricación centrado en confiabilidad.

Tabla 13 Matriz de fortalezas y debilidades

Fortalezas	Debilidades
Disposición de la gerencia para la implementación del programa	Resistencia al cambio para la implementación de nuevas metodologías
Recursos económicos disponibles para la implementación de la metodología	No hay un área óptima para la localización de lubricantes
Personal técnico calificado	Tiempo limitado para el desarrollo de capacitaciones en el personal técnico
Laboratorio de aceites en las mismas instalaciones	
Facilidad de equipos de soporte para el traslado y almacenamiento de lubricantes	
Oportunidades	Amenazas
Establecer procedimiento para el recibo, transporte y almacenamiento de lubricantes	Cambios en la oferta y/o distribución de lubricantes específicos
Incrementos en la flota de equipos CNC	Cambios en la normatividad en materia de disposición de lubricantes usados
Homologación de lubricantes con proveedores locales	Inestabilidad del precio del dólar para la importación de lubricantes
Incremento del tiempo de servicio de los lubricantes en equipos CNC	

7. CONCLUSIONES

- Como resultado de la presente monografía, se estableció la importancia de la lubricación en los equipos de control numérico computarizado (CNC) para poder garantizar el funcionamiento óptimo de estos equipos, ya que este proceso ha sido llevado de manera empírica sin establecer ningunos parámetros que sirvan de guía para analizar el estado real de los equipos.
- Se identifican todos los lubricantes requeridos para el correcto funcionamiento de los equipos CNC. Se establecen códigos de colores que faciliten el uso de los lubricantes y de esta manera evitar el uso de lubricantes en componentes equivocados. Esto acompañado de capacitaciones para el personal técnico que se encarga de la manipulación de estos insumos.
- Se establece y se divulga la importancia del uso de las cartas de lubricación para identificación del lubricante utilizado en cada sistema y/o componente del equipo, el seguimiento que se le debe hacer al horómetro del equipo y el tiempo de servicio que lleva el lubricante en equipo. Esta medida ha sido una de las más difíciles de implementar debido a la resistencia del personal a utilizar un formato que antes no había sido requerido. Sin embargo, se manifiesta la importancia de esta herramienta para la optimización de los recursos, el incremento en la vida útil del lubricante y los beneficios económicos de esta metodología.
- Se establecen las rutinas de inspección y toma de muestras de los distintos aceites del equipo, de acuerdo con lo sugerido por el fabricante en los manuales del equipo. Si bien la empresa cuenta con procedimientos para la toma de muestras en distintos equipos, este no ha sido adaptado a las necesidades de los equipos CNC. Se sensibilizó al personal técnico en la importancia de realizar estas muestras bajo los más estrictos estándares de limpieza, a fin de no afectar los resultados de los análisis. En función de estos resultados se establecen las frecuencias de cambio de aceite y la generación de órdenes de trabajo para atención de distintos modos de falla resultantes del desgaste de componentes móviles del equipo.
- Se debe redactar un procedimiento transversal a las áreas de almacén de repuestos, operación y mantenimiento para el recibo, transporte y

almacenamiento de los tambores de aceites. Esto con el fin de evitar focos de contaminación durante el traslado de estos insumos. Esto va acompañado de la construcción de un área óptima que sirva de cuarto de lubricación, estando protegido de los efectos del clima y manteniendo una ventilación adecuada.

- Se resaltan las buenas prácticas de cambio de aceites, ya que se considera un procedimiento con altos estándares de orden y aseo, evitando derrames, demarcando el área e identificando correctamente los aceites usados y aguas oleosas resultantes de la degradación del lubricante. Se mantienen las frecuencias de recolección de aceites residuales por parte de empresas certificadas para el transporte y disposición final de residuos peligrosos.

- Si bien la monografía tiene alcance para todos los equipos CNC presentes en la empresa de la industria metalmecánica, en los resultados solo se le dio alcance a las Alesadora Doosan, por motivos de practicidad y la limitante del tiempo. Sin embargo, al implementarse en los demás equipos, la optimización en el uso de lubricantes se verá potenciada, reflejando mayores beneficios económicos del uso del mantenimiento centrado en lubricación.

BIBLIOGRAFÍA

- ALBARRACÍN, P. (2015). *Tribología y Lubricación*. Medellín.
- ARCINIEGAS, G. (2008). Grasas lubricantes. *La tribología y la competitividad*, 1, 31-38.
- CALLEJAS, D. (2015). *Diseño de rutinas y cartas de lubricación para los centros de mecanizado CNC de la compañía General de Aceros SA Sucursal Av. 68*. Bogotá.
- DIMITROV, D., & SZECSI, T. (2016). Machining accuracy on CNC lathes under the lack of unity of the process and design data. *Procedia CIRP*, 41, 824-828.
- DOOSAN. (s.f.). *Instruction Manual DBC110 (Specifications and Maintenance Data)*. Rio de Janeiro.
- ESQUIVEL, R. (2018). Tipos de aceites lubricantes para máquinas, herramientas y mucho más. *Revista Ferrepat*.
- FANG, D., & LEE, N. (2001). A new tooling mechanism for CNC lathes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(1), 89-101.
- GALLEGO, D. (2009). *Implementación del programa de lubricación productiva PLP en la planta de Colanta Armenia*. Medellín.
- GRANADOS , A. (2008). Política de lubricación en una empresa industrial. *Tribología y la competitividad*, 1, 26-30.
- Ingenieros de Lubricación SAS*. (s.f.). Recuperado el 09 de 09 de 2019, de <http://www.ingenierosdelubricacion.com/productos/cartas-de-lubricacion/>
- KIEF, H., & ROSCHI WAL, H. (2012). *CNC Handbook*. New York: McGraw-Hill Education.
- KRAR, S., GILL, A., & SMID, P. (2009). *Tecnología de las Máquinas Herramienta (Sexta Edición)*. Ciudad de México: Alfaomega.
- Ley 253 de 1996 - Aprobación del Convenio de Basilea (1996).
- LOSADA, C., OM, N., & RODRÍGUEZ, J. (2006). Tribología y Lubricación en Ensayo de Banco. *Ciencias Exactas y Aplicadas*.

- MANCILLA, M. (2004). *Diseño e implementación del plan de lubricación productiva para la empresa Fiber Glass Colombia SA planta Mosquera*. Bucaramanga.
- MEZA, A. (23 de 01 de 2015). *Lublearn by Noria Latin America*. Recuperado el 07 de 09 de 2019, de <http://noria.mx/lublearn/lubricacion-proactiva-en-practica/>
- MEZA, A. (15 de 03 de 2018). *Lublearn by Noria Latina America*. Recuperado el 12 de 09 de 2019, de <http://noria.mx/lublearn/seleccion-de-lubricantes-con-base-en-especificaciones/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). Manual técnico para el manejo de aceites lubricantes usados de origen automotor e industrial.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2006). *Manual técnico para el manejo de aceites lubricantes usados*. Bogotá.
- Mobil. (2009). Recuperado el 12 de 09 de 2019, de <https://www.mobil.com.mx/es-mx/industrial/lubricant-expertise/resources/industrial-lubricant-storage-and-handling>
- ORDÓÑEZ, M. Á. (2012). *Mantenimiento de sistemas de refrigeración y lubricación de los motores térmicos*. Málaga: IC Editorial.
- Predictivo, A. d.-M. (s.f.). *Terotecnic*. Recuperado el 07 de 09 de 2019, de <https://www.terotecnic.com/mantenimiento-predictivo/tribologia.html>
- Preditec. (s.f.). Recuperado el 07 de 09 de 2019, de <http://www.preditec.com/servicios/analisis-de-aceites-322621/>
- Preditécnico. (04 de 03 de 2013). Recuperado el 07 de 09 de 2019, de <http://www.preditecnico.com/2013/03/el-analisis-de-aceites-como-tecnica.html>
- RELIANZ Mining Solutions. (s.f.). *Interpretación de resultados de análisis de lubricantes como herramienta en el monitoreo de condiciones*. Soledad: Cat SOS Services.
- Resolución 1188 de 2003 - Manual de normas y procedimientos para la gestión de aceites usados (2003).
- ROTTLER. (s.f.). Recuperado el 24 de 08 de 2019, de <https://www.rottlermfg.com/>

- SARDHARA, T., & TAMBOLI, K. (2018). Design and development of automatic lubrication system for ATC of CNC. *Materialstoday: Proceedings*, 5(2), 3959-3964.
- SMYTH, L. (2009). Taking a proactive approach to lubrication management. *World Pumps*, 2009(508), 8.
- WAKIRU, J., PINTELON, L., MUCHIRI, P., & CHEMWENO, P. (2019). A review on lubricant condition monitoring information analysis for maintenance decision support. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 118, 108-132.