

REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

PROPUESTA DE LUBRICANTE PARA EL REDUCTOR DE
VELOCIDAD SEC – 103 PERTENECIENTE A LA UNIDAD
BÁSICA DE PRODUCCIÓN PREPARACIÓN DE MINERAL

Jorge Luis Mena Pérez

MOA, 2017

REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

**PROPUESTA DE LUBRICANTE PARA EL REDUCTOR DE
VELOCIDAD SEC – 103 PERTENECIENTE A LA UNIDAD
BÁSICA DE PRODUCCIÓN PREPARACIÓN DE MINERAL**

Autor: Jorge Luis Mena Pérez

Tutores: Prof. Asist., Ing. Amauris Gilbert Hernández. Ms. C.
Prof. Tit., Ing. Isnel Rodríguez Gonzáles. Dr. C.

MOA, 2017

DECLARACIÓN DE AUTOR

Yo Jorge Luis Mena Pérez, autor de este trabajo de diploma, así como los tutores, Máster en Ciencias: Amauris Gilbert Hernández y el Doctor en Ciencias: Isnel Rodríguez González, declaramos la propiedad intelectual al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, para que disponga de su uso cuando estime conveniente.

Diplomante: Jorge Luis Mena Pérez

Tutor: Amauris Gilbert Hernández

Tutor: Isnel Rodríguez Gonzáles

PENSAMIENTO

Bienaventurado el hombre que halla la sabiduría, y que obtiene la inteligencia. Porque su ganancia es mejor que la ganancia de la plata, y sus frutos más que el oro fino. Más preciosa es que las piedras preciosas, y todo lo que puedes desear, no se puede comparar a ella. Largura de días está en su mano derecha, en su izquierda, riquezas y honra. Sus caminos son caminos deleitosos, y todas sus veredas paz. Ella es árbol de vida a los que de ella echan mano, y bienaventurados son los que la retienen.

Proverbios: 3: 13 - 18.

DEDICATORIA

“Busqué a Jehová, y él me oyó; y me libró de todos mis temores.” Largo es el camino que hay que superar para alcanzar la meta, pero al que cree todo le es posible y más si se está acompañado de personas que te aman, aprecian y brindan su incondicional apoyo, por todo le dedico este trabajo a:

A DIOS

Por siempre ser fiel y no haberse apartado de mí, aun cuando yo no siempre he permanecido junto a él.

A MI QUERIDA ESPOSA NAYVIS SUÁREZ

Por el amor que nos une, por su comprensión en todo momento y porque sin su apoyo la terminación del trabajo hubiera sido casi imposible.

A MI HIJO FERNANDO DANIEL

Han sido duro los momentos que hemos atravesado con él, pero ha sido mi principal fortaleza y motivación para lograr el título como profesional.

A MIS QUERIDOS PADRES OLVIS Y LUIS FELIPE

Por haber sido los causantes de que hoy yo esté en este mundo y siempre brindar el apoyo incondicional en los momentos en que la vida te golpea.

A MI PRECIOSA HERMANA YILENA

Por ser la hermana que todos desearan tener, porque me cuida y me ama.

A MIS ABUELOS LUIS RAMÓN, ELÍAS Y MELVA

Porque han sido padres para mí y porque bajo ninguna circunstancia dudan en apoyarme y brindarme amor.

AGRADECIMIENTOS

Todas las personas que rodean mi vida tienen un pedazo de mi corazón, por lo que les agradezco infinitamente y aunque se me queden algunos en este papel, los voy a recordar siempre.

A mi Dios, porque es el principio y el fin y sin el nada existiría.

A La Revolución Cubana, porque me brindó la posibilidad de formarme como Ingeniero Mecánico.

A mis tutores principales, el Ms. C. Amauris Gilbert Hernández y el Dr. C. Isnel Rodríguez González por haber llegado en el momento en que más orientación necesitaba, por su valiosa e impagable ayuda, por su dedicación ilimitada y apasionada a la investigación y por siempre mostrar la profesionalidad que de ellos esperaba.

A mis suegros, Odalis y Pedro por la amistad sincera y desinteresada que me brindan, y por las reiteradas ayudas ofrecidas durante estos años.

A mis tíos, Yoannis, Norvelis y Yinet por el apoyo brindado en todo momento.

A todas las personas que de una forma u otra me han apoyado, a todos gracias.

RESUMEN

En el presente trabajo se establecieron los parámetros del aceite lubricante mediante los cuales, se garantiza la lubricación hidrodinámica del reductor de velocidad TT – 850E – CHEVRÓN de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Se aplicaron los criterios desarrollados por Widman y AGMA, considerando las características tecno constructivas y de explotación en la selección de la viscosidad del aceite, demostrándose que la formación de la lubricación hidrodinámica de los pares engranados del reductor se logra con aceites de índice de viscosidad 95 y 160 para grado de viscosidad de 460 y 680 según los métodos empleados, demostrándose que para el lubricante existente no se garantiza la lubricación hidrodinámica, debido a que bajo las condiciones actuales de explotación el mismo posee una viscosidad de 63,0 mm²/s; la cual se encuentra 57,1 y 97,3 mm²/s por debajo respecto a los aceites ISO VG 460 y 680 respectivamente. Con el propósito de contribuir a soluciones relacionadas a los métodos aplicados, se llegó a la conclusión que el logro de la lubricación ideal se puede posibilitar utilizando los aceites industriales de Castrol y CUBALUB, Alpha SP 680, Reductor 680 y Alphasyn T 460.

ABSTRACT

In the present research the parameters of the lubricating oil were established by which the hydrodynamic lubrication of the speed reducer TT – 850E – CHEVRÓN from the Commandant Ernesto Che Guevara Company is guaranteed. The criteria developed by Widman and AGMA were applied considering the techno-constructive and operational characteristics in the selection of the viscosity of the oil, demonstrating that the hydrodynamic lubrication and formation of the geared pairs of the reducer is achieved with viscosity index oils 95 And 160 for viscosity grade of 460 and 680 according to the methods used, demonstrating that hydrodynamic lubrication is not guaranteed for the existing lubricant, because under current operating conditions it has a viscosity of 63.0 mm²/s; which is 57.1 and 97.3 mm²/s being lower than the ISO VG 460 and 680 oils respectively. In order to contribute to solutions related to the applied methods, it was concluded that the achievement for a proper lubrication may allow its obtention by using the Castrol and CUBALUB industrial oils, Alpha SP 680, Reducer 680 and Alphasyn T 460.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.1. Introducción	4
1.2. Trabajos relacionados con la lubricación de reductores de velocidad	4
1.3. Clasificación de los reductores de velocidad	6
1.3.1. Características de los reductores de velocidad	7
1.4. Regímenes de lubricación.....	8
1.4.1. Lubricación hidrodinámica	8
1.4.2. Lubricación mixta.....	9
1.4.3. Lubricación límite.....	9
1.4.4. Parámetros que influyen en la formación de la lubricación hidrodinámica	9
1.5. Normas de lubricación	10
1.6. Tipos de lubricantes para engranajes	12
1.6.1. Aceites minerales puros	12
1.6.2. Aceites inhibidores contra la herrumbre y la corrosión	12
1.6.3. Aceites minerales de extrema presión (EP).....	12
1.6.4. Aceites compuestos	13
1.6.5. Aceites sintéticos.....	13
1.7. Características de los lubricantes para los engranes.....	13
1.8. Propiedades de los aceites lubricantes.....	14
1.8.1. La viscosidad como propiedad fundamental de los lubricantes.....	14
1.8.2. Índice de viscosidad	15

1.8.3. Otras propiedades de los aceites lubricantes	16
1.9. Lubricación de engranajes en reductores de velocidad	17
1.9.1. Lubricación de rodamientos en reductores de velocidad.....	17
1.10. Sistemas de lubricación	18
1.11. Mantenimiento del sistema de lubricación	19
1.11.1. Período inicial de cambio de lubricante	19
1.11.2. Intervalo siguiente de cambio de aceite	19
1.12. Descripción del proceso tecnológico de la planta	20
1.12.1. Características del reductor de velocidad TT – 850E – CHEVRÓN.	20
1.13. Conclusiones del capítulo	21
2. MATERIALES Y MÉTODOS DE LA INVESTIGACIÓN	22
2.1. Introducción	22
2.2. Lubricación de reductores de velocidad.....	23
2.3. Selección del grado de viscosidad.....	25
2.3.1. Cálculo de la velocidad circunferencial.....	28
2.3.2. Selección del aditivo del aceite.....	29
2.3.3. Determinación de la viscosidad del aceite para los rodamientos	29
2.4. Sistemas de lubricación de reductores de velocidad	34
2.4.1. Lubricación por inmersión o salpicadura de aceite.....	34
2.4.2. Lubricación por circulación de aceite.....	34
2.5. Curva de viscosidad del aceite	34
2.6. Instrumentos de medición empleados en la investigación	36
2.7. Parámetros condenatorios de los aceites para engranajes	38
2.7.1. Análisis de laboratorio	38

2.8. Conclusiones del capítulo	40
3. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	41
3.1. Introducción	41
3.2. Mediciones en el reductor de velocidad	41
3.2.1. Mediciones realizadas con el pirómetro	42
3.2.2. Mediciones realizadas con la cámara termográfica	42
3.2.3. Mediciones realizadas con el Vibro Pen	43
3.3. Resultado de la lubricación en el reductor de velocidad	44
3.3.1. Aceite Reductor y Alpha SP	45
3.3.2. Aceites Castrol Alphasyn T	46
3.3.3. Viscosidad del aceite	48
3.4. Resultados de la selección del grado de viscosidad del lubricante	50
3.4.1. Velocidad circunferencial de las ruedas dentadas del reductor	50
3.4.2. Aditivo del aceite del reductor	53
3.4.3. Lubricación de los rodamientos del reductor	53
3.5. Propuesta del aceite lubricante	56
3.6. Análisis económico	57
3.7. Impacto ambiental	57
3.8. Conclusiones del capítulo	58
CONCLUSIONES GENERALES	60
RECOMENDACIONES	61
BIBLIOGRAFÍA	62
ANEXOS	I

INTRODUCCIÓN

Uno de los procesos tecnológicos que desarrolla un papel importante dentro de la economía nacional de Cuba, es el que se emplea en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. Este consiste en obtener un concentrado de níquel más cobalto mediante la tecnología de lixiviación carbonato - amoniacal, o proceso CARON como también es conocido, el cual ya era utilizado desde el año 1942 en la empresa “Comandante René Ramos Latour” de Nicaro ([Góngora, 2014](#)).

El proceso de obtención de níquel más cobalto en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, comienza en la Unidad Básica Minera con la extracción del mineral en las minas a cielo abierto, en yacimientos lateríticos del territorio nororiental de Cuba, y este se incorpora al flujo tecnológico, a través de la Unidad Básica de Producción (UBP) planta de “Preparación de Mineral”, a partir de donde el material circula por diferentes unidades básicas de producción ([Ferrer, 2014](#)).

Para que se logre la obtención de estos productos, en el proceso se utilizan máquinas que son universalmente conocidas como son hornos de soleras múltiples, espesadores, columnas de destilación, grúas que transportan el mineral y los secadores de mineral. Algunas de las máquinas utilizadas en el proceso necesitan de la utilización de motorreductores o reductores de velocidad, para reducir de forma segura y eficiente la velocidad de rotación de las mismas ([Góngora, 2014](#)).

Los reductores de velocidad son mecanismos que sirven para reducir las velocidades angulares, y elevar los momentos de torsión, se ejecutan como conjuntos sueltos, y tienen numerosos usos, sobre todo en la construcción de máquinas elevadoras y transportadoras, construcción de maquinaria para la metalurgia, para la industria química y construcción naval ([Reshetov, 1985](#)).

La aplicación de una correcta lubricación en los reductores es primordial, sobre todo si ha de garantizarse un trabajo ininterrumpido. La misma tiene la función de reducir el contacto metálico entre las superficies. La mayoría de los daños registrados en los reductores son debido a una lubricación deficiente o que los parámetros de diseño se seleccionaron incorrectamente. Una lubricación defectuosa en las zonas de contacto

origina desgaste, surcos de resbalamiento, estrías y huellas de gripado (Rodríguez, 2015).

Situación Problemática:

En la Unidad Básica de Producción Planta “Preparación de Mineral” de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, existen varios reductores que contribuyen en el proceso de secado del mineral, entre ellos el reductor TT – 850E – CHEVRÓN. En la actualidad, la planta no cuenta con un método para la selección del grado de viscosidad del aceite para la lubricación del reductor de velocidad, y se obvian parámetros operacionales como la temperatura de trabajo a la que está sometido el lubricante. Todo esto trae consigo significativas pérdidas económicas por concepto de aumento considerable del tiempo empleado en su reparación y la paralización de equipos mineros destinados a la producción directa. Otras pérdidas son reportadas al no poder recuperar algunas piezas durante su mantenimiento, las cuales pasan a formar parte de la acumulación de desechos que afectan el medio ambiente de la región.

Problema:

Desconocimiento de métodos para seleccionar y evaluar el aceite apropiado, para la lubricación del reductor de velocidad TT – 850E – CHEVRÓN.

Objeto de estudio:

Reductor de velocidad TT – 850E – CHEVRÓN, de la planta “Preparación de Mineral” de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Campo de acción:

Lubricación de reductores de velocidad.

Objetivo general:

Proponer el aceite que garantice la lubricación adecuada en los pares tribológicos del reductor de velocidad TT – 850E – CHEVRÓN.

Hipótesis:

La medición de la temperatura operacional del reductor y el cálculo de la velocidad circunferencial de las ruedas dentadas, relacionadas al índice de viscosidad del aceite

evaluado; permitirá proponer a través de métodos apropiados, el lubricante para el reductor de velocidad SEC – 103 perteneciente a la Unidad Básica de Producción “Preparación De Mineral”.

Objetivos específicos:

- Determinar el grado de viscosidad para la lubricación del reductor de velocidad, evaluando diferentes índices de viscosidad.
- Seleccionar los lubricantes con las propiedades adecuadas que posibiliten un régimen hidrodinámico en el reductor.

Tareas:

- Establecimiento del estado del arte en relación con la lubricación de reductores de velocidad.
- Medición de la temperatura operacional del reductor de velocidad.
- Cálculo de la velocidad circunferencial de las ruedas dentadas.
- Caracterización geométrica y operacional de los rodamientos.
- Selección del aditivo para el aceite lubricante.
- Valoración de resultados y determinación de los impactos económico, social y ambiental.

1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

Los motorreductores o reductores de velocidad; juegan un papel fundamental en la Unidad Básica de Producción “Preparación de Mineral” en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, empleados en máquinas y equipos estrechamente vinculados a la producción. Las estrategias de mantenimiento para estos equipos están encaminadas a garantizar la disponibilidad y eficiencia requerida para su buen funcionamiento, asegurando la duración de su vida útil y minimizando los costos.

[Albarracín \(2005\)](#), plantea que la lubricación es el proceso o técnica empleada para reducir el rozamiento entre dos superficies que se encuentran muy próximas y en movimiento una respecto de la otra, interponiendo para ello una sustancia entre ambas denominada lubricante, que soporta o ayuda a soportar la carga y presión generada entre las superficies en contacto, esta sustancia puede ser gaseosa, líquida o sólida, que colocada entre dos piezas móviles, no se degrada, y forma así mismo una película que impide su contacto, permitiendo su movimiento incluso a elevadas temperaturas

El desgaste al que están sometidos los reductores de velocidad, debido a las grandes tensiones que se producen en los pares engranados; ha permitido que la lubricación se convierta en la garantía de su durabilidad. Es por esto que se declara como **objetivo** del capítulo: exponer los fundamentos teóricos de la lubricación en reductores de velocidad, a partir de la sistematización del conocimiento de la literatura consultada.

1.2. Trabajos relacionados con la lubricación de reductores de velocidad

[Rodríguez \(2009\)](#) plantea que los reductores de engranajes son aquellos en que toda la transmisión mecánica se realiza por pares de engranajes de cualquier tipo, excepto los basados en tornillo sin fin. Sus ventajas son el mayor rendimiento energético, menor mantenimiento y menor tamaño.

[AGMA \(2002\)](#) plantea que la aplicación del lubricante en engranajes se realiza fundamentalmente para el control de la fricción y el desgaste entre las superficies en contacto, y en transmisiones de engranajes cerrados, para transferir el calor lejos de la zona de contacto. También sirve como un medio para llevar a los aditivos que pueden

ser necesarios para funciones especiales. Existen muchos tipos de lubricantes disponibles para realizar estas tareas. Los lubricantes pueden ser muy variados en función de la aplicación, la base y el tipo de aditivo utilizado.

[Benlloch \(1984\)](#) plantea que donde las condiciones de velocidad, carga, temperatura y viscosidad son tales que la película de lubricante permanece entre los dientes sin romperse, el aceite lleva íntegramente toda la carga. Siendo la viscosidad la característica más importante en estos casos. El método ideal para lubricar un engranaje cerrado sería el de poner la cantidad y calidad de aceite lubricante que fuera más adecuado, dentro del cárter y no volver a renovar el aceite durante toda la vida del mecanismo.

La lubricación inapropiada es una de las causas principales de fallas en las transmisiones a base de engranajes, por lo que deben seguirse las instrucciones del fabricante de los engranajes para asegurar la operación apropiada. Para la lubricación de reductores de velocidad debe llevarse a cabo verificaciones periódicas de los niveles del aceite, aceiteras y accesorios para grasa. Si se está utilizando lubricación a presión, debe vigilarse con frecuencia el funcionamiento apropiado de la bomba, el filtro y del enfriador ([Albarracín, 2005](#)).

En la mayoría de los aceites utilizados para la lubricación de reductores se ha observado una disminución exponencial de la viscosidad con el incremento de la temperatura, comportamiento análogo a los trabajos para petróleo crudo expuestos por [Balagui, 2010](#); [Bourbon et al, 2010](#); [Chenlo et al, 2010](#); [Colby, 2010](#).

[Según Malisshev \(1975\)](#) en la lubricación de las transmisiones de engranajes cerrados, los materiales lubricantes se destinan para asegurar un largo plazo de vida de las partes con roce en las máquinas. El líquido lubricante se suministra a las piezas rozantes de la máquina, creando entre esas superficies una película que disminuye el área de contacto metálico inmediato y de esa manera se reduce el coeficiente de rozamiento y la pérdida de potencia de la máquina.

Las propiedades físicas de un lubricante, tales como viscosidad y punto de fluidez, se derivan en gran parte de la base de la que se producen. Mientras la viscosidad es la propiedad más común asociada con un lubricante, hay muchas otras propiedades que

pueden contribuir a la composición y la calidad del producto terminado. Las propiedades de los aceites lubricantes son el resultado de una combinación o selección de aceites base y tecnología de aditivos ([ANSI/AGMA, 2002](#)).

[Peña \(2015\)](#), analiza las características tecnoconstructivas y de explotación en la selección de la viscosidad del aceite para el reductor de velocidad TT – 850E – CHEVRÓN, pero solo considera evaluar la viscosidad en los rodamientos del reductor empleando aceites con índice de viscosidad 95 y el cálculo lo realiza para aceites de la compañía Castrol únicamente.

1.3. Clasificación de los reductores de velocidad

[Dobrobolski \(1980\)](#) plantea que en muchos casos, las transmisiones se utilizan como grupos independientes que tienen el fin de reducir el número de revoluciones del árbol conducido. En estos casos, la transmisión se aloja en una armazón rígida, independiente y hermética al aceite y al polvo, portante de rodamientos para los árboles. Si el engranaje asegura la relación de transmisión constante y sirve para reducir las velocidades del árbol conducido lleva el nombre de reductor y si la velocidad del árbol conducido puede variarse durante su explotación, lleva el nombre de variador de velocidad.

[Zayas y Martínez \(2008\)](#) clasifican los reductores de acuerdo a la disposición de los ejes de la siguiente manera:

- Reductores con los ejes de los extremos de árboles paralelos.
- Reductores con los ejes de los extremos de árboles perpendiculares.
- Reductores con los ejes de los extremos de árboles cruzados.

Los reductores de velocidad se suelen clasificar de un modo bastante anárquico, solapándose en algunos casos las definiciones de modo intrínseco y en otros casos hay que usar diversas clasificaciones para definirlos; los reductores se pueden clasificar por la tipología de sus engranajes, las clasificaciones más usuales según [Aponte \(2012\)](#) son:

- Sin fin-corona
- Engranajes

- Planetarios

Según su relación de transmisión y el número de revoluciones, los reductores poseen un amplio uso, por lo que según [Reshetov \(1985\)](#) se clasifican en:

- Reductores de escalones únicos
- Reductores de tres escalones
- Reductores cónicos
- Reductores coaxiales
- Reductores combinados cónicos y cilíndricos

1.3.1. Características de los reductores de velocidad

Entre las clasificaciones más usuales de reductores de velocidad (sin fin-corona, engranajes, planetarios), el más sencillo es el reductor de velocidad sin fin-corona. Se compone de una corona dentada, normalmente de bronce en cuyo centro se ha embutido un eje de acero (eje lento), la corona está en contacto permanente con un husillo de acero en forma de tornillo sin fin. Una vuelta del tornillo sin fin provoca el avance de un diente de la corona y en consecuencia la reducción de velocidad. La reducción de velocidad de una corona sin fin se calcula con el producto del número de dientes de la corona por el número de entradas del tornillo sin fin según [Dobrobolski & Zablonki \(1980\)](#). [Aneiros \(1983\)](#) coincide que es el reductor de velocidad más empleado y comercializado y a su vez todas las tendencias de la ingeniería lo consideran obsoleto por sus grandes defectos que son, el bajo rendimiento energético y la pérdida de tiempo entre ciclos.

Entre los reductores de velocidad dentados se encuentran los reductores de escalón único, que generalmente se utilizan cuando se necesitan bajas relaciones de transmisión, las cuales se eligen no más de 8 a 10, habitualmente hasta 6,3, para evitar el aumento de las dimensiones exteriores. Principalmente están extendidos los reductores de dos escalones, para estos reductores son típicas las relaciones de transmisión de 8 a 40. En caso de relaciones de transmisión más altas que éstas, se emplean reductores de tres escalones, no obstante existe la tendencia a sustituirlos por reductores planetarios más compactos ([Reshetov, 1985](#)).

Los reductores planetarios se distinguen por su capacidad, dando grandes relaciones de transmisión y en muchos casos sustituyen felizmente los reductores comunes de engranajes y por tornillo sin fin. Los reductores planetarios son reductores de engranajes con la particularidad de que no están compuestos de pares de engranajes sino de una disposición algo distinta, y sirve para diferentes tipos de variaciones de velocidad. Se llama planetarios las transmisiones (engranajes) que llevan las ruedas dentadas con ejes geométricos desplazable. El movimiento de estas ruedas que se llaman planetarios o satélites, es semejante al de los planetas, por lo que han recibido sus nombres. Los satélites van rodando por la rueda central que tiene engranajes exterior o interior. Los ejes de los satélites se sujetan a un portasatélite y, junto con este giran alrededor del eje central. Si giran todos los árboles, el mecanismo se llama diferencial y se utiliza para componer y descomponer los movimientos (Dobrobolski & Zablonki, 1980).

1.4. Regímenes de lubricación

Cada equipo posee régimen de operación específico, diferente velocidad de rotación y temperatura de trabajo. Diversos especialistas e investigadores han tenido en cuenta estos factores en la lubricación y la han diversificado a fin de cumplir con las aplicaciones y características deseadas para cada equipo. La tendencia y naturaleza de los contactos entre las diferentes piezas que se están lubricando, las presiones y los tipos de carga, así como la naturaleza y características físico químicas de los lubricantes utilizados, influyen en el tipo o régimen de lubricación.

La lubricación siempre mejora la suavidad del movimiento de una superficie sobre otra. Esto puede ser logrado en una variedad de formas. El tipo de lubricación que cada sistema necesita se basa en la relación de los componentes en movimiento. Los diferentes tipos de lubricación normalmente son denominados regímenes de lubricación (Delgado, 2006).

1.4.1. Lubricación hidrodinámica

La lubricación hidrodinámica (Figura 1.1) se presenta en superficies con una lubricación por película fluida. En este tipo de lubricación las películas son gruesas de manera que se previene que las superficies sólidas opuestas, entren en contacto. Con frecuencia se

le llama la forma ideal de lubricación, porque proporciona baja fricción y alta resistencia al desgaste. La lubricación de las superficies sólidas se rige por las propiedades físicas del volumen del lubricante, especialmente de la viscosidad (Farías, 2008).



Figura 1.1. Lubricación hidrodinámica (Fuente: Shell, 2011)

1.4.2. Lubricación mixta

La lubricación mixta es una condición intermedia entre las películas límite e hidrodinámica, en la cual un porcentaje de las crestas de las dos superficies interactúan, presentándose la película límite y otras ya están separadas en las cuales la película límite no desempeña ninguna labor. En la lubricación mixta el desgaste y el consumo de energía dependen tanto de las características de la película límite, como de la resistencia a la cizalladura de la película fluida y de su estabilidad (Farías, 2008).

1.4.3. Lubricación límite

La lubricación límite se genera por la formación de una capa que se adhiere a las superficies metálicas, e impide que cuando estas se deslicen la una sobre la otra, se presente el contacto metal - metal y por consiguiente el desgaste adhesivo. La lubricación por película límite, se presenta siempre que un mecanismo arranque o se detenga (Albarracín & Pizón, 2004).

Por otro lado esta lubricación es considerada la menos eficiente ya que la película que forma es tan delgada que el contacto entre las superficies tiene lugar sobre una área similar a cuando no hay lubricante (Shell, 2011).

1.4.4. Parámetros que influyen en la formación de la lubricación hidrodinámica

Los factores que inciden en el establecimiento de la lubricación hidrodinámica son la velocidad del mecanismo, la temperatura, la carga y la viscosidad del aceite que se está utilizando, pero cada uno de ellos influye de una manera específica dependiendo de las circunstancias que se presenten en el mecanismo lubricado. Si el mecanismo opera a

altas velocidades, este factor será el más influyente en el logro de la lubricación fluida o hidrodinámica y para estos casos se utilizan aceites de baja viscosidad y tanto más baja será ésta, cuanto más alta sea la velocidad de funcionamiento; por el contrario, si la velocidad es muy baja, es factible que la lubricación hidrodinámica por velocidad no se logre alcanzar y sea necesario compensar la falta de velocidad con aceites de alta viscosidad, pero entonces se presenta el inconveniente del consumo de energía por fricción fluida en el interior de la película lubricante, que será tanto mayor cuanto mayor sea la viscosidad del aceite, dando lugar a que si se quiere lograr una condición de lubricación hidrodinámica mediante el uso de aceites de alta viscosidad, no sea factible desde el punto de vista energético y de las altas temperaturas que se van a presentar en el mecanismo lubricado. Para tal caso se considera que la lubricación es elastohidrodinámica, y se deben emplear por lo tanto aditivos de extrema presión (EP) y la viscosidad del aceite que se debe utilizar se selecciona de tal manera que garantice un consumo de energía por fricción razonable pero que adicionalmente ayude a formar una película que proteja las superficies lubricadas sin llegar a ser fluida.

La viscosidad es el factor más importante en el establecimiento de la película hidrodinámica, cuando para una velocidad dada se tiene un valor específico de viscosidad, en este caso, el factor que más impacta la película hidrodinámica es la velocidad, porque es la única variable que hay y si esta se reduce, la condición de lubricación hidrodinámica puede llegar a ser elastohidrodinámica sin que el aceite tenga aditivos EP, dando lugar a que se presente el contacto metal - metal y por consiguiente el desgaste adhesivo entre las superficies lubricadas (Albarracín, 2004).

1.5. Normas de lubricación

A través de los años se han adaptado distintos sistemas para clasificar la viscosidad de los lubricantes líquidos industriales, basados en la medición de la viscosidad en distintas unidades, la cual llevaba a que continuamente se emplearan tablas de conversión para pasar de un sistema a otro. Dicha situación, aunaba el deseo de establecer un lenguaje común a fin de que los usuarios de los lubricantes, los proveedores y los diseñadores de equipos tuvieran una base común para designar y seleccionar los lubricantes industriales y llevó a que los institutos de normalización de

varios países miembros de la ISO (International Organization for Standardization), a través de un esfuerzo cooperativo, desarrollaran la clasificación ISO de viscosidades; la cual se basa en las siguientes pautas:

- Establecer 18 grados de viscosidad (Tabla 1.1), comprendido entre 2 y 1 500 centistokes (cSt) a 40 °C, esto cubre todo el intervalo posible desde el aceite de una mínima viscosidad hasta el de máxima viscosidad, en lo que a productos líquidos de petróleo se refiere.
- Cada grado de viscosidad se designa por el número entero más cercano a su viscosidad cinemática media, expresada en cSt a 40 °C y se permite una variación de $\pm 10\%$ de este valor.

Dicho sistema, de acuerdo con lo pautado por ISO, se adoptó a partir de enero de 1978 por sus distintos países integrantes, (entre ellos Cuba, a través del Instituto de Metrología Normalización Control de la Calidad), así como por gran parte de las empresas petroleras internacionales (CUBALUB, 2008).

Tabla 1.1. Sistema de clasificación ISO

Grado de viscosidad ISO	Viscosidad media a 40 °C (mm ² /s)	Límites de viscosidad cinemática a 40 °C		AGMA
		mín.	máx.	
ISO VG 2	2,2	1,98	2,42	-
ISO VG 3	3,2	2,88	3,52	-
ISO VG 5	4,6	4,14	5,03	-
ISO VG 10	10	9	11	-
ISO VG 15	15	13,5	16,5	-
ISO VG 22	22	19,8	24,2	-
ISO VG 32	32	28,8	35,2	0
ISO VG 46	46	41,4	50,6	1
ISO VG 68	68	61,2	74,8	2
ISO VG 100	100	90	110	3
ISO VG 150	150	135	165	4
ISO VG 220	220	198	242	5
ISO VG 320	320	288	352	6
ISO VG 460	460	414	506	7 EP (2)
ISO VG 680	680	612	748	8 EP
ISO VG 1000	1 000	900	1 100	8 A EP (2)
ISO VG 1500	1 500	1 350	1 650	9

Fuente: CUBALUB, 2008

1.6. Tipos de lubricantes para engranajes

La clasificación de los lubricantes empleados en engranajes puede ser diversa, cada uno de ellos tiene sus propios requisitos y el propósito de facilitar el rendimiento correcto para cada aplicación.

1.6.1. Aceites minerales puros

Los aceites minerales puros se aplican en engranajes que trabajan bajo condiciones moderadas de operación. Los aceites minerales proceden del petróleo, y son elaborados del mismo después de múltiples procesos en sus plantas de producción, en las refinerías. El petróleo crudo tiene diferentes componentes que lo hace indicado para distintos tipos de producto final.

1.6.2. Aceites inhibidores contra la herrumbre y la corrosión

Los aceites inhibidores contra la herrumbre y la corrosión se utilizan cuando las temperaturas son altas y existe el riesgo de contaminación con agua, que conduce a la formación de herrumbre en los metales ferrosos. Poseen aditivos antiherrumbre, antiespuma, antidesgaste y antioxidantes. Estos aceites no tienen muy buena adhesividad, pero trabajan bien en sistemas de circulación donde se aplica en forma continua (Shell, 2011).

ANSI/AGMA (2002), plantea que estos se denominan comúnmente lubricantes de R & O. Están formulados con aceites de petróleo altamente refinados o sintéticos. Sus estabilidades superiores de oxidación típicamente los diferencian de otros tipos de aceites de engranajes. Sin embargo, sus capacidades de carga pueden ser menores que otros. Estos aceites se asocian generalmente con aplicaciones de mayor velocidad y cargas más ligeras.

1.6.3. Aceites minerales de extrema presión (EP)

Los aceites minerales de extrema presión se utilizan cuando los engranajes tienen que soportar altas cargas o cargas de choque y bajas velocidades. Son aceites inhibidos, a los que se les incorporan aditivos de extrema presión, los cuales son normalmente de azufre y fósforo; es necesario tener mucho cuidado con estos aceites, cuando se aplica en reductores que trabajan en ambientes de alta humedad, ya que el vapor de agua

presente puede reaccionar con el azufre y el fósforo formando ácido sulfúrico y ácido fosfórico, que atacan las superficies metálicas (Shell, 2011).

Además de la protección contra la corrosión y la oxidación, estos aceites contienen aditivos que proporcionan protección contra el desgaste y suprimen la espuma. Estos aceites se formulan con petróleo refinado o aceites de base sintética. Generalmente se usan en ISO VG 150 o más, y se desarrollaron para proteger sistemas engranados que operan a cargas elevadas y severas condiciones de impacto (ANSI/AGMA, 2002).

1.6.4. Aceites compuestos

Los aceites compuestos tienen como característica principal su elevada adhesividad. Son una mezcla de aceite mineral y sebo animal en proporciones variables. Se utilizan en reductores con engranajes de tornillo sin fin corona, en donde la acción de deslizamiento es muy elevada. Estos aceites se pueden filtrar y enfriar sin que se separe el sebo animal del aceite base. La adhesividad también se logra adicionando al lubricante un pequeño porcentaje de aditivo (Shell, 2011).

ANSI/AGMA (2002), coincide en que estos lubricantes se emplean con frecuencia en transmisiones de engranajes de tornillo sin fin y plantea que los aceites compuestos para engranajes son una mezcla de aceites de base de petróleo con 3 a 10 % de aceites grasos naturales o sintéticos.

1.6.5. Aceites sintéticos

Se utilizan generalmente en engranajes que presentan alto grado de deslizamiento, o que trabajan a altas temperaturas por períodos prolongados. Los lubricantes sintéticos requieren una adecuada combinación de aditivos y bases sintéticas fluidas para incrementar los beneficios sobre los aceites minerales. Los más usados son las Polialfaoleinas (Shell, 2011).

1.7. Características de los lubricantes para los engranes

La eficiencia con la cual un engranaje opera, depende no solo de la forma en la cual ellos son usados, sino también del lubricante que les sea aplicado. Los lubricantes para engranajes, según Linares (2005), tienen varias funciones importantes para llevar a cabo:

Función de lubricación: Cuando los engranajes transmiten potencia, los esfuerzos sobre sus dientes se concentran en una región muy pequeña y ocurre en un tiempo muy corto. Las fuerzas que actúan en esa región son muy elevadas, si los dientes de los engranajes entran en contacto directo, los efectos de la fricción y el desgaste destruirán rápidamente los engranajes.

La principal función de un lubricante para engranajes es reducir la fricción entre los dientes del engranaje y de esta forma disminuir cualquier desgaste resultante. Idealmente, esto se logra por la formación de una película delgada de fluido la cual mantiene separadas las superficies de trabajo.

Refrigeración: particularmente en engranajes cerrados, el lubricante debe actuar como un refrigerante y extraer el calor generado a medida que el diente rueda y se desliza sobre el otro.

Protección: los lubricantes deben garantizar la protección contra la corrosión y la herrumbre de los engranajes.

Limpieza: los lubricantes para engranajes deben sacar todos los desechos que se forman durante el engrane de los dientes.

1.8. Propiedades de los aceites lubricantes

Las propiedades de los aceites se resumen en cuatro grandes grupos, los aceites minerales puros, aceites minerales de extrema presión, aceites compuestos y aceites sintéticos. Estas propiedades se establecen para controlar la calidad de los lubricantes y determinar su comportamiento ante una determinada aplicación. La adecuada consideración de cada una de estas propiedades, permite seleccionar adecuadamente el lubricante, que permita la eficiente protección y lubricación de los diferentes pares de rozamientos de los sistemas tribológicos (Álvarez, 1999).

1.8.1. La viscosidad como propiedad fundamental de los lubricantes

La viscosidad de un fluido puede definirse desde el punto de vista práctico como su resistencia a fluir, es por tanto una medida de su fricción interna. La viscosidad determina la capacidad del lubricante para formar una película que separe las superficies metálicas en movimiento relativo.

Existen dos tipos de viscosidad, absoluta o dinámica y cinemática. La primera es la se definió inicialmente, mientras que la viscosidad cinemática es la relación entre la viscosidad absoluta de un aceite y su densidad, a la temperatura a la cual se efectúa la determinación de la viscosidad. Ésta es la que se utiliza comúnmente para la clasificación de los aceites lubricantes. La unidad de medida de la viscosidad cinemática es el centistokes (mm^2/s). La viscosidad de un fluido resulta ser función fundamentalmente de la temperatura (Shell, 2011)

En los líquidos, la viscosidad disminuye al incrementar la temperatura y aumenta al disminuir la temperatura (Figura 1.2). En el caso de aceites lubricantes se refiere específicamente a las propiedades de los líquidos como fluidos newtonianos, es decir, que los esfuerzos cortantes en el fluido son proporcionales a las velocidades de deformación tangenciales.

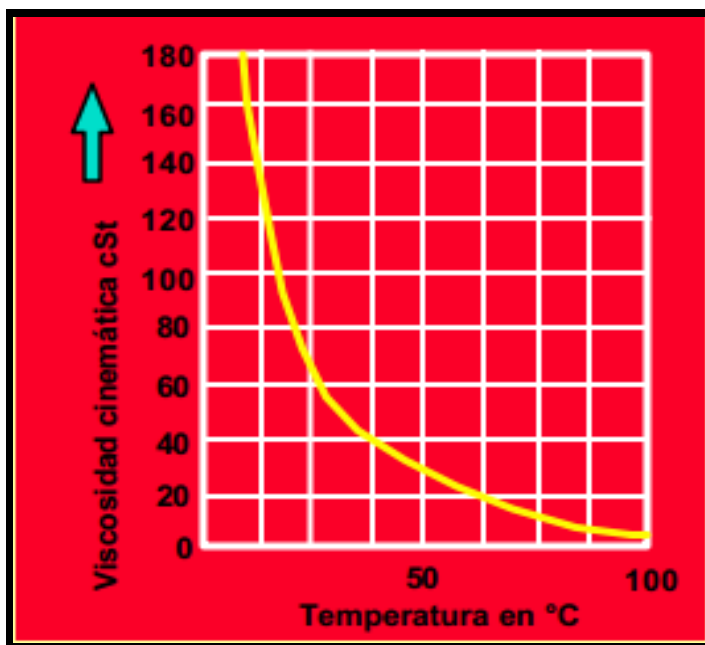


Figura 1.2. Influencia de la temperatura en la viscosidad del aceite lubricante (Fuente: Shell, 2011).

1.8.2. Índice de viscosidad

El índice de viscosidad indica la variación que sufre la viscosidad de un aceite con la variación de la temperatura. Para determinar el índice de viscosidad en un aceite lubricante, se determina su viscosidad a 40 °C (104 °F) y 100 °C (212 °F); de acuerdo

con la variación que sufra la viscosidad al incrementarse la temperatura hasta 100 °C, así será el índice de viscosidad. Mientras menor varíe la viscosidad del aceite lubricante, mayor será su índice de viscosidad (Salgado, 1978). Lo antes expuesto nos da un dato de suma importancia, relacionado con la calidad de un aceite lubricante, pues determina la posibilidad de su utilización en determinados equipos, donde existen altas temperaturas.

1.8.3. Otras propiedades de los aceites lubricantes

La adecuada consideración de cada una de estas propiedades, permite seleccionar adecuadamente el lubricante, que permita la eficiente protección y lubricación de los diferentes pares de rozamiento de los sistemas tribológicos (Álvarez, 1999).

Peso específico: se define como la relación entre el peso y el volumen de un aceite dado a una temperatura determinada.

Peso específico relativo: Se define como la relación entre el peso específico del aceite y el peso específico del agua, a una temperatura dada, generalmente a 15,6 °C.

Densidad: es la relación entre la masa y el volumen de un aceite a una temperatura dada, generalmente de 20 °C.

Punto de fluidez: es la temperatura más baja a la cual el aceite puede fluir, el punto de fluidez es 3 °C sobre la última medición del aceite.

Punto de inflamación (Flash Point): el punto de inflamación se define como la temperatura a la cual los vapores generados por el aceite inflaman por la proximidad de una llama.

Resistencia a la oxidación: la oxidación ocurre cuando el oxígeno ataca cualquier producto petrolífero. El proceso se acelera por calor, luz, catalizadores metálicos, presencia de agua, ácidos o contaminantes sólidos.

Estabilidad térmica: Se define como la resistencia de un lubricante a descomponerse bajo condiciones de elevada temperatura. Es una propiedad específica del aceite base utilizado y no mejorable con aditivos.

Detergencia: Es la propiedad que posee un lubricante de evitar o reducir la formación de los compuestos que dan origen a depósitos, así como la acumulación de ellos en las piezas mecánicas cuando se opera a altas temperaturas.

Alcalinidad (T.B.N): La concentración de los componentes alcalinos de un lubricante está referida como T.B.N. (Total Base Number). Es la capacidad que un lubricante posee de neutralizar el ácido sulfúrico formado en la combustión diésel.

Demulsibilidad: Es la propiedad que tiene el aceite para separarse del agua.

Desaireación: Propiedad que tiene el aceite para separar el aire.

1.9. Lubricación de engranajes en reductores de velocidad

La lubricación de los engranajes con velocidad circunferencial de las ruedas dentadas desde 12,5 m/s hasta 15 m/s se hace preferentemente con aceite en cárter, este último se llena con aceite, que forma un baño de aceite. La capacidad del baño se establece a razón de 0,35 - 0,7 litros por cada kW de potencia transmitida (Los valores mayores se toman para mayor viscosidad de aceite, y viceversa). Las ruedas dentadas se recomienda sumergirlas en el aceite a una profundidad del orden 3 - 4 módulos. Sin embargo, debido a la variación del nivel de aceite, cuando trabaja el reductor, suele emplearse una inmersión más profunda. En las ruedas lentas es admisible, en caso de necesidad, sumergirlas a una profundidad de hasta la tercera parte del diámetro de la rueda.

A altas velocidades circunferenciales de las ruedas se usa la lubricación por barboteo. El aceite, a presión por bomba, pasa por un filtro y, si es necesario, por un refrigerador. El procedimiento óptimo de lubricación por barboteo es el suministro del aceite a los dientes del piñón directamente después de su desengrane. El aceite suele suministrarse por una tobera, y a las ruedas anchas, por distribuidores (tubos con orificios), que permiten distribuir uniformemente el aceite a lo largo de los dientes (Reshetov, 1985).

1.9.1. Lubricación de rodamientos en reductores de velocidad

Se realiza del modo más sencillo, por barboteo de aceite mediante las ruedas dentadas. Las salpicaduras de aceite penetran en los rodamientos directamente, o a través de los

canales recogeaceites. Si no se puede usar la lubricación por barboteo, por ejemplo, a causa de bajas velocidades circunferenciales de las ruedas dentadas (menor que 4 m/s) o por la presencia en el baño de aceite de productos de desgaste, se utiliza grasa consistente. En este caso se prevé un espacio para llenarlo con grasa consistente y se colocan arandelas de retención de grasa. Si son altas las velocidades de rotación y grandes las cargas se emplea la lubricación forzada desde el sistema general de lubricación. Los cojinetes de deslizamiento en los modernos reductores pesados y rápidos, generalmente tienen lubricación forzada (Reshetov, 1985).

1.10. Sistemas de lubricación

Los sistemas de lubricación pueden fraccionarse en dos grupos: cárter cerrado y descubiertos, ellos a su vez se dividen en otros como se puede observar en la Figura 1.3.

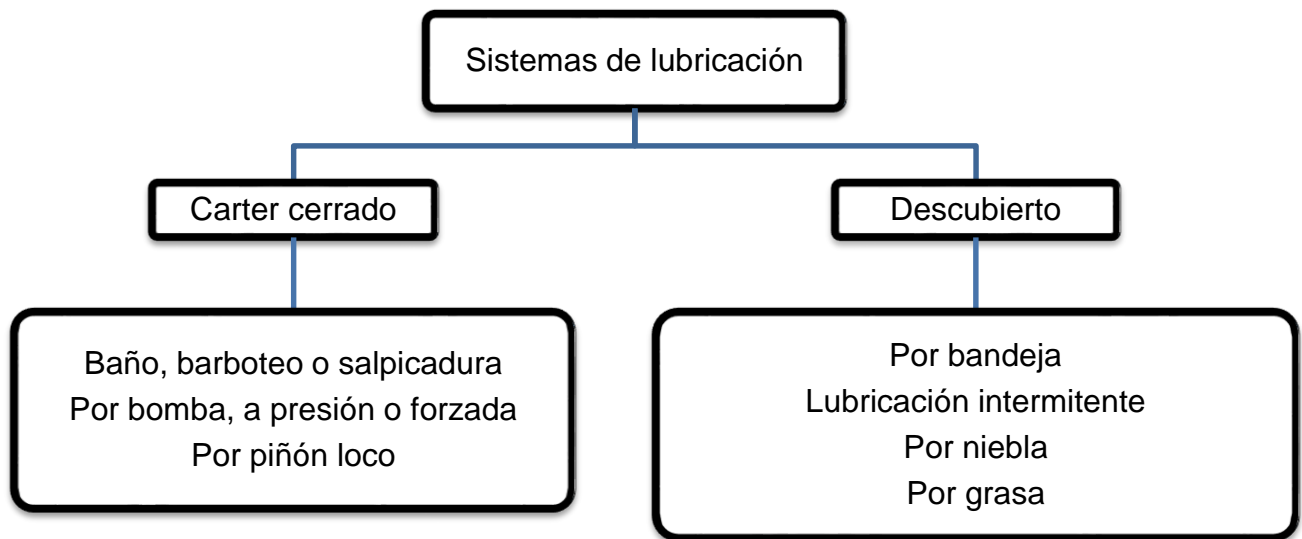


Figura 1.3. Sistemas de lubricación de engranajes.

En las transmisiones de engranajes de una máquina, el aceite puede aplicarse a partir de otros elementos giratorios de aquella por salpicadura o disponiendo la máquina de tal modo que, al girar, uno de los engranajes se sumerja en un baño de aceite. Para asegurar una alimentación adecuada sin que la acción de arrastre sea apreciable, la parte inferior del engranaje debe estar sumergida en el aceite a una profundidad de 1,9 a 3,8 cm. En algunos casos, sobre el punto en que los dientes engranan, se dirige un

chorro de aceite que se introduce entre las ruedas o bien se hace actuar sobre los dientes una niebla de aire y aceite procedente de un sistema de lubricación por aerosol o de un vaporizador que se alimenta de aceite con un engrasador mecánico centralizado.

Los engranajes cuya velocidad periférica es inferior a 7,5 m/min pueden montarse de tal modo que se introduzcan en un baño de lubricante y otros se lubrican por gota o aerosol, pero el método de lubricación más satisfactorio consiste en aplicarles un revestimiento de lubricantes adhesivos viscosos de los números AGMA 9, 10, 11 o más pesados (Álvarez, 1999).

1.11. Mantenimiento del sistema de lubricación

El aseguramiento de una correcta lubricación es indispensable para mantener el funcionamiento y la vida útil del equipo. El uso de aceites y filtros específicos en cada uno de los equipos es esencial. Sin las prácticas adecuadas de cambio de aceite, los equipos saturan de impurezas y partículas contaminantes evitando el correcto funcionamiento.

1.11.1. Período inicial de cambio de lubricante

El aceite inicial de puesta en marcha y funcionamiento de un nuevo engranaje debe ser cambiado después de un período de 500 horas de funcionamiento o cuatro semanas. La importancia de una limpieza completa de la caja de engranajes con aceite de lavado para eliminar partículas, durante el primer cambio de lubricante no ser violada (ANSI/AGMA, 2002).

1.11.2. Intervalo siguiente de cambio de aceite

ANSI/AGMA (2002), plantea que, en condiciones normales de funcionamiento, los lubricantes se deben cambiar cada 2 500 horas de funcionamiento o seis meses. Los períodos de cambio pueden ser programados en base al tipo de lubricante, cantidad de lubricante, tiempo de inactividad del sistema o consideración ambiental del lubricante usado.

Esto puede hacerse mediante la implementación adecuada de un programa de monitoreo integral, el cual puede incluir el examen de:

- ✓ cambio de aspecto y olor;
- ✓ viscosidad del lubricante;
- ✓ oxidación del lubricante, por ejemplo, número de ácido total;
- ✓ concentración de agua;
- ✓ concentración de contaminantes;
- ✓ porcentaje de sedimentos y lodos;
- ✓ agotamiento aditivo.

1.12. Descripción del proceso tecnológico de la planta

El mineral procedente de la mina se transporta hacia la Planta de Preparación de Mineral a través de transportadores de bandas, este mineral con una humedad de 38 % es secado en los tambores cilíndricos rotatorios (secaderos) hasta valores de 4,0 a 5,5 % de humedad, el cual es transportado por transportadores de bandas hacia la sección de molienda donde es sometido a un proceso de molienda en molinos cilíndricos de bolas (molienda seca) hasta valores de granulometría de: + 0,149 mm (4 a 7,5 %), + 0,074 mm (7 a 8 %), -0,074 mm (85 a 87 %).

En el proceso de transportación de secaderos a molienda, son de vital importancia los reductores de velocidad empleados para la regulación de la velocidad de rotación de los tambores cilíndricos giratorios, entre ellos el reductor TT – 850E – CHEVRÓN, perteneciente al secadero número tres de la planta.

1.12.1. Características del reductor de velocidad TT – 850E – CHEVRÓN.

El reductor de velocidad, modelo TT – 850E – CHEVRÓN, posee 400 kW de potencia y velocidades de entrada y salida máximas de 742 min^{-1} y 21 min^{-1} respectivamente. El mismo presenta tres escalones de reducción con una relación de transmisión total (i) de 35,5 y una masa de 19 000 kg, tiene seis ruedas dentadas del tipo doble helicoidal y el sistema de lubricación es por bomba, con un caudal de llegada de 90 litros/min y una viscosidad del aceite ISO VG 220 (AGMA 6 EP), cuenta además con ocho rodamientos que clasifican como rodillos a rótula o de barril, en los ocho puntos de apoyo del reductor, también cuenta con dobles retenes en entradas y salidas con laberintos externos y engrasadores, fue fabricado por el grupo Cotransa. Es utilizado en la traslación del mineral de la planta de secadero de la empresa Ernesto Che Guevara de

forma eficiente y segura como parte del proceso de homogenización del mineral. Estos reductores han sido proyectados y construidos para ser accionados por un motor eléctrico, con un conjunto de piezas o elementos, conectados sólidamente con el fin de realizar una acción bien determinada, y con la finalidad de aumentar su versatilidad.

1.13. Conclusiones del capítulo

- Quedaron establecidos los fundamentos teóricos, expuestos en la literatura consultada, que permiten determinar la influencia de los parámetros operacionales en la lubricación para reductores de velocidades.
- La bibliografía consultada respecto a la lubricación en los reductores de velocidad, es abundante; sin embargo, resulta complejo poder definir un procedimiento para la selección de los parámetros que posibiliten la formación de la lubricación hidrodinámica.

2. MATERIALES Y MÉTODOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Introducción

El actual desarrollo alcanzado en la esfera científico técnica a nivel internacional, ha obligado al hombre a crear y mejorar los métodos para mantener y preservar los activos de cualquier empresa o negocio para obtener de ellos un uso más eficiente, y al mismo tiempo, disminuir al máximo los gastos que impone ese mantenimiento, lo que influye de manera muy especial en la economía (Ferrer, 2014).

La información del funcionamiento de una máquina está almacenada en su lubricante. Las partículas metálicas y no metálicas generadas en una máquina lubricada, nos informan del estado de funcionamiento. El futuro del mantenimiento en las grandes empresas será la cooperación con el proveedor de lubricantes, de manera tal que se contrate el servicio completo de lubricación lo que contempla la venta de aceites, el control e inspección de los lubricantes actividad que asumirían empresas especializadas logrando una mayor eficiencia en el mantenimiento (Álvarez, 1999).

Las formas de encontrar un lubricante correcto pueden resultar muy costosas, por lo que es necesario recurrir a metodologías más precisas y fundamentar ecuaciones mediante las cuales al asignarles las variables de velocidad, carga y temperatura, principalmente, se pueda hallar la viscosidad del aceite requerido.

Bajo las nuevas filosofías de entender y llevar a cabo la lubricación, se desarrollaron teorías que son aplicables perfectamente a mecanismos que operaban bajo condiciones de movimiento relativo, surgiendo así las teorías de la lubricación hidrodinámica, sucediendo a la lubricación fluida, que era la que se presentaba prácticamente en los mecanismos de todas las máquinas. La selección de los aceites lubricantes para las transmisiones dentadas se realiza en base a recomendaciones obtenidas exclusivamente de la práctica; para la obtención de resultados altamente satisfactorios, debe tenerse en cuenta, la presión en las capas lubricantes, la velocidad de engranajes y rodamientos y la temperatura de funcionamiento en los reductores (Albarracín, 2005).

Se declara como **objetivo del capítulo**: establecer el procedimiento para la selección de la viscosidad del aceite, que posibilite la formación de la lubricación hidrodinámica en reductores de velocidad.

2.2. Lubricación de reductores de velocidad

Muchas veces llegan o se adaptan reductores sin una recomendación del fabricante para la selección de la viscosidad correcta. A través del procedimiento se consigue determinar la viscosidad ideal para arrancar y operar estos equipos. Una vez que esté en operación se puede variar esta viscosidad levemente, para compensar por la temperatura ambiente, trabajo, o simplemente ajustarlo para lograr la menor temperatura operacional posible del reductor (Gilbert, 2013).

Para realizar la selección, se necesitan conocer 4 factores:

- El tipo de lubricación que se emplea:
 - Salpicadura
 - Recirculación por bomba
- El tipo de reducción que se realiza:
 - Simple, con una reducción menor que 10 a 1
 - Múltiple, con una reducción mayor que 10 a 1
- La potencia del reductor en HP.
- La velocidad de salida del reductor en min^{-1} .

La Tabla 2.1 relaciona las combinaciones que puedan existir en cuanto al tipo de lubricación y tipo de reducción, relaciones que en conjunto con la potencia y la velocidad de salida del árbol, proporcionan el grado de viscosidad, el cual se selecciona de la Tabla 2.2.

Tabla 2.4. Posibles combinaciones de lubricación y reducción

	Tipo de lubricación
A	Salpicadura
B	Recirculación por bomba
	Tipo de reducción
C	Simple
D	Múltiple

Tabla 2.2. Viscosidad de aceites industriales para reductores de velocidad.

POTENCIA (HP)	VELOCIDAD FINAL (min ⁻¹)	Grado de Viscosidad ISO			
		Caso a c	Caso a d	Caso b c	Caso b d
0 a 1	0 a 150	460	460	150	320
	150 a 300	320	460	150	320
	300 a 1 000	150	320	68	150
	1 000 a 2 000	68	150	68	150
	2 000 a 5 000	46H	68	46H	68
	5 000 a 10 000	32 R&O	46 H	32 R&O	46 H
1 a 5	0 a 150	460	460	150	320
	150 a 300	320	460	150	320
	300 a 1 000	150	320	68	150
	1 000 a 2 000	68	150	68	150
	2 000 a 5 000	46 H	68	46 H	68
	5 000 a 10 000	46 H	68	46 H	68
5 a 10	0 a 150	460	460	150	320
	150 a 300	320	460	150	320
	300 a 1 000	150	320	68	150
	1 000 a 2 000	68	150	68	150
	2 000 a 5 000	68	150	68	150
	5 000 a 10 000	46 H	68	46 H	68
10 a 20	0 a 150	460	460	150	320
	150 a 300	320	460	150	320
	300 a 1 000	150	320	150	320
	1 000 a 2 000	150	320	68	320
	2 000 a 5 000	68	150	68	150
	5 000 a 10 000	68	150	68	150
20 a 30	0 a 150	460	460	150	320
	150 a 300	320	460	150	320
	300 a 1 000	150	460	150	320
	1 000 a 2 000	150	320	150	320
	2 000 a 5 000	150	320	68	320
	5 000 a 10 000	68	150	68	320
30 a 50	0 a 150	460	680	320	460
	150 a 300	460	680	320	460
	300 a 1 000	320	460	150	320
	1 000 a 2 000	150	320	150	320
	2 000 a 5 000	150	320	150	320
	5 000 a 10 000	68	150	68	150

Tabla 2.2. Viscosidad de aceites industriales para reductores de velocidad
(Continuación)

POTENCIA (HP)	VELOCIDAD FINAL (min)	Grado de Viscosidad ISO			
		Caso a c	Caso a d	Caso b c	Caso b d
50 a 75	0 a 150	460	680	320	460
	150 a 300	460	680	320	460
	300 a 1 000	460	460	150	320
	1 000 a 2 000	320	460	150	320
	2 000 a 5 000	150	320	150	320
	5 000 a 10 000	68	150	68	150
75 a 100	0 a 150	460	680	320	460
	150 a 300	460	680	320	460
	300 a 1 000	460	680	320	460
	1 000 a 2 000	320	460	150	320
	2 000 a 5 000	150	320	150	320
	5 000 a 10 000	68	150	68	150
100 a 1 000	0 a 150	680	680	680	680
	150 a 300	680	680	680	680
	300 a 1 000	460	680	320	460
	1 000 a 2 000	320	460	150	320
	2 000 a 5 000	150	320	150	320
	5 000 a 10 000	68	150	68	150
Más de 1 000	0 a 150	1000	1000	680	680
	150 a 300	680	680	680	680
	300 a 1 000	460	680	320	460
	1 000 a 2 000	320	460	150	320
	2 000 a 5 000	150	320	150	320
	5 000 a 10 000	68	150	68	150

2.3. Selección del grado de viscosidad

ANSI/AGMA (2002), recomienda el empleo de las Tablas 2.3; 2.4; 2.5 y 2.6 para la selección del grado de viscosidad adecuado en reductores de velocidad con aceites de índice de viscosidad 90, 120, 160 y 240. Las tablas mencionadas brindan los grados de viscosidad ISO a una temperatura específica, permitiendo considerar las características reales de funcionamiento. Para satisfacer las necesidades generales de la aplicación del lubricante, este debe ir complementado con un aditivo apropiado, ya que brinda propiedades indispensables si se requiere realizar una correcta lubricación. En caso de engranajes que realizan reducciones múltiples, se recomienda utilizar la velocidad circunferencial de la rueda dentada de mínima velocidad. La selección de la viscosidad

debe complementarse con un aditivo de rendimiento adecuado, para proporcionar un lubricante acabado con propiedades suficientes para satisfacer las necesidades generales.

Las tablas proporcionadas por AGMA para la selección del grado de viscosidad adecuado, se dividen en cuatro zonas fundamentales. La primera zona aparece subrayada con línea de color gris en diagonal, esto significa que en caso de que la selección del grado de viscosidad estuviera en esos límites, siendo menor que 32 mm²/s y mayor que 3 200 mm²/s, debe consultarse a los proveedores de los engranajes, rodamientos y lubricantes. La segunda zona es la que aparece con un color gris oscuro y significa que se debe realizar una previa revisión de las temperaturas operacionales de inicio y pico en el horario de servicio y revisar los rangos de cargas, cuando se consideran estos grados de viscosidad. La zona número tres se representa por la parte en que solo aparecen los valores con el fondo blanco y significa que se debe seleccionar el grado de viscosidad que sea más adecuado en el rango de temperatura operacional. Y la última zona representada por una doble línea significa que el aceite está estabilizado a la temperatura de funcionamiento.

Tabla 2.3. Grado de viscosidad a la temperatura de funcionamiento, para aceites con índice de viscosidad igual a 90.

Temp °C	Velocidad lineal m/s							
	1.0 - 2.5	2.5	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0
10	32							
15	46	32						
20	68	46	32					
25	68	46	32					
30	100	68	46	32				
35	100	100	68	46	32			
40	150	100	68	46	32	32	32	
45	220	150	100	68	46	46	32	32
50	320	220	150	100	46	46	46	32
55	460	220	150	100	68	68	68	46
60	460	320	220	150	68	68	68	46
65	680	460	320	220	150	100	100	68
70	1000	680	320	220	150	100	100	68
75	1500	680	460	320	220	150	150	100
80	2200	1000	680	460	220	220	220	150
85	3200	1500	1000	460	320	220	220	150
90	3200	2200	1000	680	460	320	320	220
95		3200	1500	1000	460	460	320	220
100		3200	2200	1000	680	460	460	320

Tabla 2.4. Grado de viscosidad a la temperatura de funcionamiento para aceites con índice de viscosidad igual a 120.

Temp °C	Velocidad lineal m/s							
	1.0 - 2.5	2.5	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0
10	32							
15	46	32						
20	68	46	32					
25	68	46	32	32				
30	100	68	46	32				
35	150	100	68	46	32			
40	150	100	68	46	32	32	32	
45	220	150	100	68	46	46	32	32
50	320	220	100	100	68	46	46	46
55	320	220	150	100	68	68	46	46
60	460	320	220	150	68	68	68	46
65	680	460	320	150	100	100	100	68
70	1000	460	320	220	150	150	100	68
75	1000	680	460	220	150	150	150	100
80	1500	1000	460	320	220	220	150	100
85	2200	1000	680	460	220	220	220	100
90	2200	1500	1000	460	320	320	220	150
95	3200	2200	1000	680	320	320	320	220
100		2200	1500	680	460	460	320	220

Tabla 2.5. Grado de viscosidad a la temperatura de funcionamiento para aceites con índice de viscosidad igual a 160.

Temp °C	Velocidad lineal m/s							
	1.0 - 2.5	2.5	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0
10	32	32						
15	46	32	32					
20	68	46	32					
25	68	46	32	32				
30	100	68	46	32				
35	150	100	68	46	32			
40	150	100	68	46	32	32	32	
45	220	150	100	68	46	46	32	
50	220	150	100	68	46	46	46	32
55	320	220	150	100	68	68	46	32
60	460	220	150	100	68	68	68	46
65	460	320	220	150	100	100	68	46
70	680	460	220	150	100	100	100	68
75	680	460	320	220	150	150	100	68
80	1000	680	320	220	150	150	150	100
85	1500	680	460	320	220	220	150	100
90	1500	1000	680	320	220	220	220	150
95	2200	1500	680	460	320	220	220	150
100	3200	1500	1000	460	320	320	220	150

Tabla 2.6. Grado de viscosidad a la temperatura de funcionamiento para aceites con índice de viscosidad igual a 240.

Temp °C	Velocidad lineal m/s							
	1.0 - 2.5	2.5	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0
10	46	46						
15	68	46	32					
20	68	68	32	32				
25	100	68	32	32				
30	100	68	32	32	32			
35	150	68	68	46	32	32		
40	150	100	68	46	32	32	32	
45	220	100	100	68	46	32	32	
50	220	100	100	68	46	46	46	32
55	320	150	150	68	68	46	46	32
60	320	150	150	100	68	68	46	46
65	460	220	150	100	100	68	68	46
70	460	320	220	150	100	68	68	46
75	680	320	220	150	100	100	68	68
80	680	460	220	150	100	100	100	68
85	1000	460	320	220	150	100	100	68
90	1000	680	320	220	150	150	100	100
95	1000	680	460	320	150	150	150	100
100	1500	1000	460	320	220	150	150	100

2.3.1. Cálculo de la velocidad circunferencial

En las tablas ofrecidas por [ANSI/AGMA \(2002\)](#), se asume que el lubricante conserva sus propiedades en el intervalo esperado de cambio de aceite. [Álvarez \(1999\)](#), propone calcular las velocidades circunferenciales para todos los engranajes por las ecuaciones 2.1 o 2.2, y que la selección del grado de viscosidad debe realizarse para el engranaje fundamental, teniendo en cuenta las condiciones de arranque en frío.

$$V_c = \omega \cdot \frac{d}{2} \quad (2.1)$$

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60} \quad (2.2)$$

Donde:

V_c : velocidad circunferencial; (m/s).

ω : velocidad angular de las ruedas dentadas; (s^{-1}).

d : diámetro de la rueda; (m).

n : velocidad de rotación; (min^{-1}).

2.3.2. Selección del aditivo del aceite

Hasta finales de 1930, todos los requisitos de lubricación eran cumplimentados con las propiedades de los aceites básicos. Sin embargo, el surgimiento de nuevas máquinas y mecanismos, impuso nuevas exigencias que no podían satisfacer los lubricantes, como es el caso de los engranajes hipoides. La investigación constante tuvo como resultado el surgimiento de los aditivos. Los mismos se definen como aquellas sustancias que se añaden en pequeñas cantidades a los aceites básicos, con el propósito de mejorar e impartirles nuevas propiedades necesarias para las condiciones de explotación de los mismos (Álvarez, 1999). La selección del aditivo del aceite empleado en reductores de velocidad, se realiza considerando fundamentalmente los niveles de choques de la máquina motriz y la máquina movida. ANSI/AGMA,(2002), proporciona una guía, para ayudar en la elección del tipo de aditivo para el aceite lubricante a ser utilizado en una determinada aplicación, la misma se presenta en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Guía para la selección del tipo de aditivo del aceite para reductores de velocidad.

Máquina motriz	Máquina movida			
	Uniforme	Choques ligeros	Choques moderados	Choques fuertes
Uniforme	RO	RO/ EP	EP	EP
Choques ligeros	RO	RO/EP	EP	EP
Choques moderados	RO	EP	EP	EP
Choques fuertes	EP	EP	EP	EP

2.3.3. Determinación de la viscosidad del aceite para los rodamientos

BDC International S.A. (2010), plantea que la lubricación de los rodamientos en los reductores de velocidad se realiza con aceite, aprovechando que se dispone de este dentro de la máquina. La viscosidad de funcionamiento real de un lubricante viene determinada por los siguientes factores:

- Viscosidad relativa de lubricante.
- Tamaño de rodamiento.
- Temperatura de funcionamiento.

- Velocidad de operación.

Realizando un cálculo sencillo aplicable para las mayorías de las aplicaciones de rodamientos, se puede precisar la viscosidad de funcionamiento de un lubricante en condiciones de trabajo. Para lo cual son necesarios los siguientes pasos:

Cálculo del diámetro medio del rodamiento

El cálculo del diámetro medio del rodamiento se obtiene a través de la semisuma de los diámetros del rodamiento y se realiza con el objetivo de seleccionar la viscosidad de funcionamiento necesaria del aceite lubricante mostrado de manera gráfica en la Figura 2.1 empleando las cartas SKF.

$$dm = \frac{D + d}{2} \quad 2.3$$

Dónde:

dm: Diámetro medio del rodamiento; (mm).

d: Diámetro del agujero del rodamiento; (mm).

D: Diámetro exterior del rodamiento; (mm).

Cálculo de la viscosidad de funcionamiento necesaria

La eficacia del lubricante viene determinada fundamentalmente por el grado de separación entre las superficies de contacto de rodadura (Peña, 2015). Para que se forme una película de lubricante adecuada, éste debe tener una viscosidad mínima cuando la aplicación alcance su temperatura de funcionamiento normal.

La viscosidad de funcionamiento necesaria del aceite lubricante para lograr la lubricación hidrodinámica en los rodamientos, puede determinarse por el método de gráfico (Figura 2.1) empleando las cartas SKF.

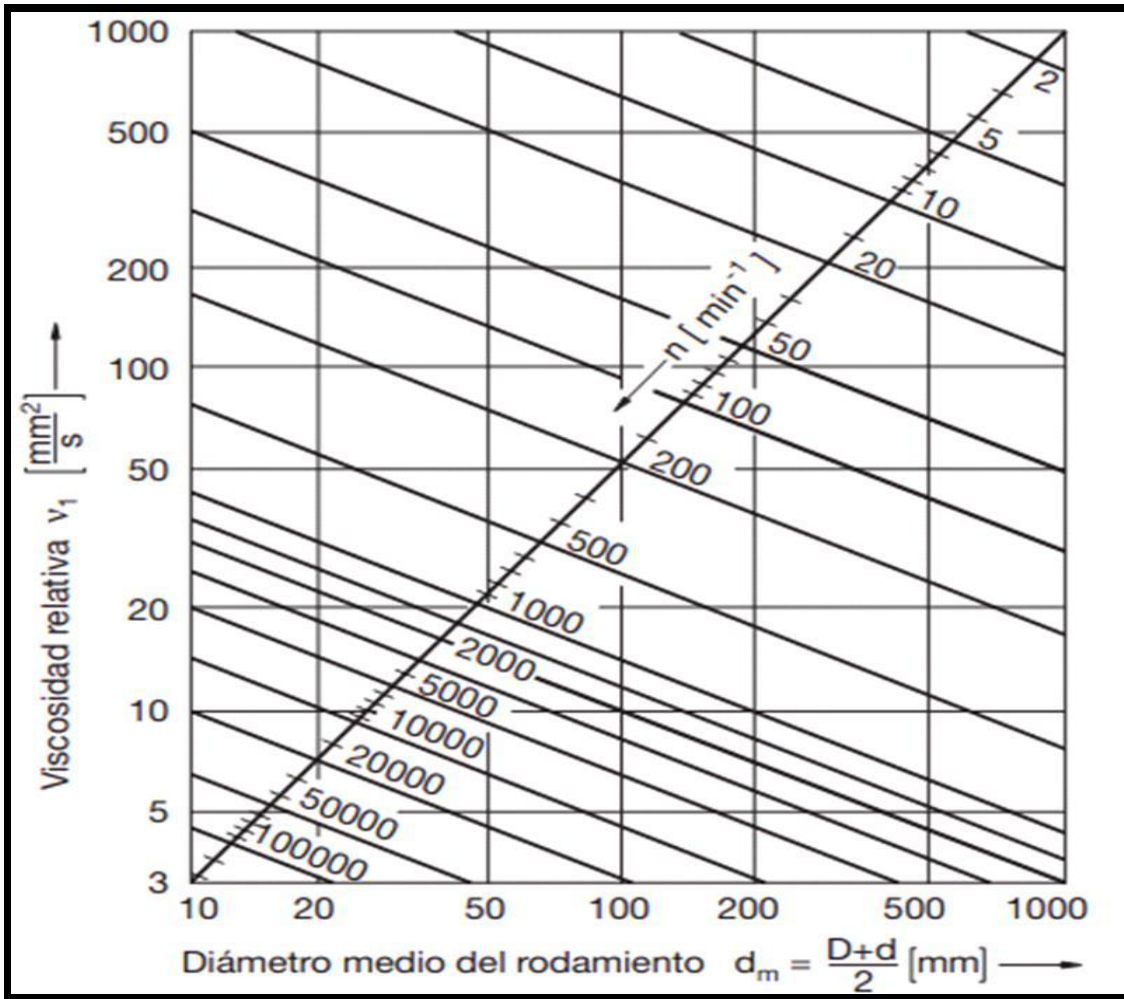


Figura 2.1. Diagrama para estimar la viscosidad mínima necesaria.

Determinación de la viscosidad, por el método analítico

En los rodamientos, debe garantizarse una viscosidad mínima necesaria a la temperatura de operación del lubricante, con el fin de formar una película de lubricante adecuada entre las superficies de contacto. Si se garantiza esta viscosidad se prolongará su vida útil.

$$v_1 = 45000 \cdot n^{-0,83} \cdot Dm^{-0,5} \quad \text{Para } n < 1000 \text{ min}^{-1} \quad (2.4)$$

$$v_1 = 45000 \cdot n^{-0,5} \cdot Dm^{-0,5} \quad \text{Para } n \geq 1000 \text{ min}^{-1} \quad (2.5)$$

Donde:

v_1 : viscosidad mínima necesaria; [mm²/s].

n : número de revoluciones [min^{-1}].

Determinación del grado ISO de viscosidad

La viscosidad de funcionamiento real se puede determinar igualmente empleando la carta SKF (Figura 2.2) y está determinada por la máxima temperatura registrada y la viscosidad relativa obtenida.

Para las mayorías de las aplicaciones, es preciso seleccionar de la viscosidad de funcionamiento real de un lubricante en condiciones de funcionamiento, esta selección se facilita en el procedimiento que se describe en el siguiente diagrama (BDC International S.A. 2010).

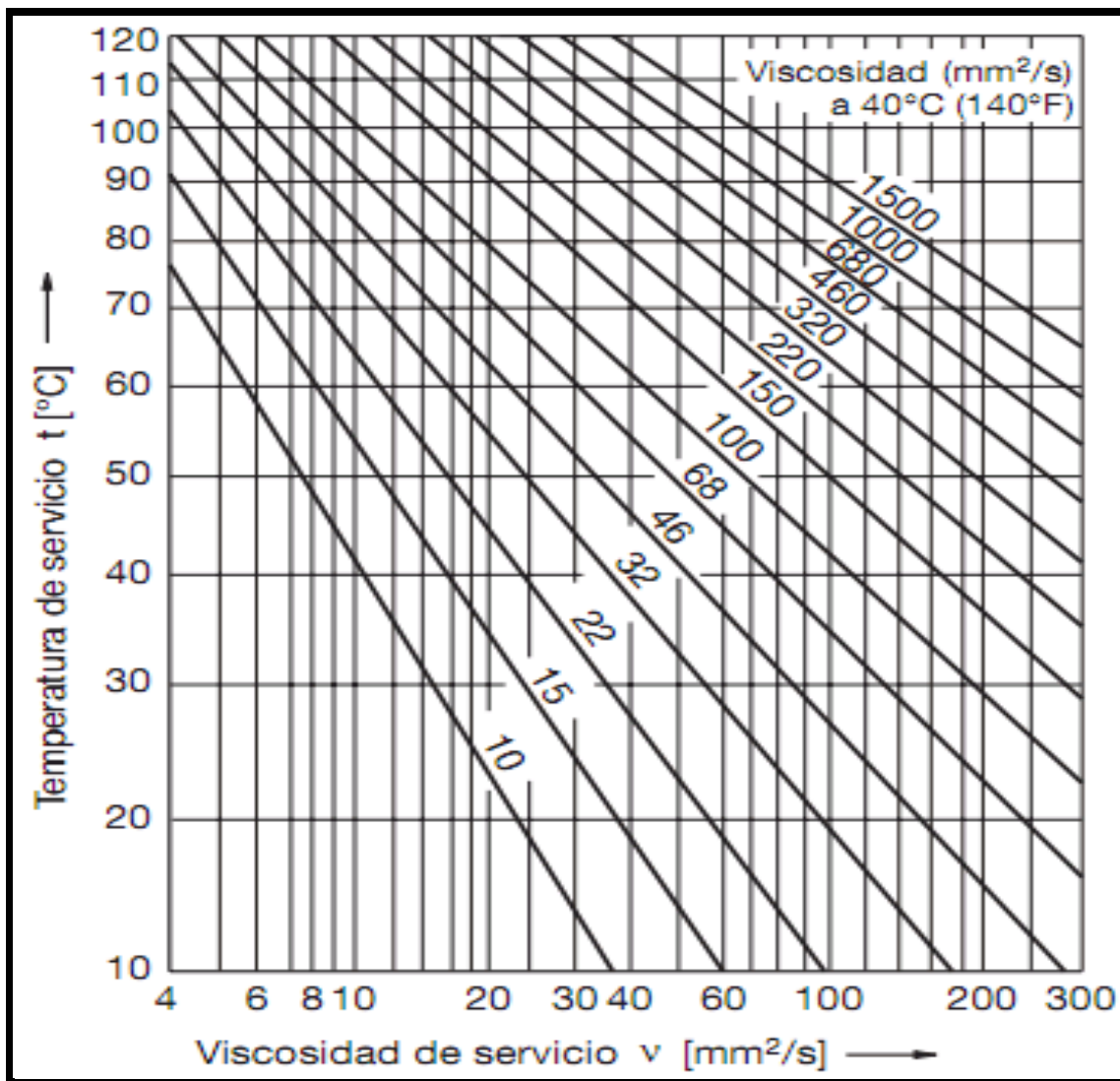


Figura 2.2. Diagrama para estimar la viscosidad de funcionamiento real.

Selección del método de lubricación

El método de lubricación que vaya a utilizarse, siempre depende de las condiciones particulares de funcionamiento, incluidas las velocidades de funcionamiento, el rango de la temperatura y el entorno. La capacidad de velocidad de un rodamiento y la capacidad de la lubricación utilizada para alcanzar velocidades específicas resultan importantes (Rodríguez, 2015).

Gilbert (2013), plantea que las denominadas características de velocidad, proporcionan una ecuación importante para evaluar la capacidad de un lubricante o de un cierto método de lubricación.

$$Fv = n \cdot dm \quad (2.6)$$

Donde:

Fv : factor de velocidad; [mm/min].

n : velocidad de funcionamiento del rodamiento; [min^{-1}].

En la Tabla 2.8 se relaciona el método de lubricación con el factor de velocidad. Para factores de velocidad mayores que 1 000 000, la experiencia práctica reviste también gran importancia. Pueden ser necesarios dispositivos especiales como refrigeradores de aceite, bombas adicionales para la lubricación con aceite y aire (BDC, 2010).

Tabla 2.8. Valores típicos de factor de velocidad.

Métodos de lubricación	Fv
Lubricación con grasa:	
Grasas estándar para rodamientos	$\leq 500\,000$
Grasas especiales	$\leq 1\,000\,000$
Lubricación con aceite:	
Lubricación por baño de aceite	$\leq 500\,000$
Lubricación por circulación de aceite	$\leq 750\,000$
Lubricación por salpicadura de aceite	$\leq 800\,000$
Lubricación por neblina de aceite	$\leq 1\,500\,000$
Lubricación por cantidad mínima (aire/aceite)	$\leq 3\,000\,000$

La decisión de seleccionar el método de lubricación más adecuado que vaya a utilizarse para cada aplicación debe tomarse en la temprana etapa del diseño, ya que ello tiene influencia sobre el diseño de las piezas adyacentes.

2.4. Sistemas de lubricación de reductores de velocidad

Existen diversos sistemas de lubricación; por inmersión, circulación o nebulización entre otros. El sistema más adecuado en cada caso particular depende condiciones específicas como las condiciones de servicio, la aplicación de los rodamientos y las condiciones constructivas.

2.4.1. Lubricación por inmersión o salpicadura de aceite

Con este método, la rociada o salpicadura de aceite procedente de las ruedas de engranajes giratorios inmersas en el aceite se utiliza para la lubricación de los rodamientos.

Algunas aplicaciones sencillas de cajas de engranajes utilizan anillos salpicadores que giran sueltos sobre el eje, creando una distribución de aceite sobre los rodamientos dentro de la carcasa de la caja de engranajes. En los casos en que sea necesario, deben incluirse características auxiliares (es decir, ranuras, conductos y huecos de aceite) para garantizar volúmenes satisfactorios de aceite. La lubricación eficaz de los rodamientos debe garantizarse en todas las condiciones de funcionamiento (Pista, 1993).

2.4.2. Lubricación por circulación de aceite

Con este método, el aceite necesario para lubricar reductores se recoge en un colector de lubricante. Desde este colector el aceite es enviado por bomba y tuberías a las diferentes posiciones donde están ubicados los engranes.

Este método es muy eficaz cuando la evacuación de calor es necesaria. Tanto el volumen del aceite como el del colector de lubricante deben ajustarse a los requisitos de la evacuación de calor. Antes de que el aceite vuelva a circular por el sistema de lubricación debe ser filtrado para evitar la entrada de algún tipo de contaminante. Este efecto puede también utilizarse para respaldar la circulación de aceite por el sistema de lubricación.

2.5. Curva de viscosidad del aceite

Para determinar la variación de la viscosidad del aceite con el incremento de la temperatura, se empleó el calculador de la compañía Widman International (figura 2.3).

Con el empleo de este programa es posible evaluar simultáneamente hasta cuatro aceites, de los cuales es necesario conocer los siguientes datos:

- Nombre del aceite que se desea evaluar.
- Viscosidad cinemática del aceite a 40 °C, expresada en mm²/s.
- Viscosidad cinemática del aceite a 100 °C, expresada en mm²/s.

Calcular													
	Aceite 1	Aceite 2	Aceite 3	Aceite 4	Temperatura								
Nombre de Producto					Mínima (Celsius)								
Viscosidad cSt a 40°C					0								
Viscosidad cSt a 100°C													
Temperatura	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	55

Figura 2.3. Calculador de curva de viscosidad de la compañía Widman International

La temperatura mínima (°C) a la que se requiere evaluar el aceite, debe ser definida en el programa, si en el rango de viscosidades mostrado no se observa el valor de viscosidad requerido, debe incrementarse la temperatura mínima, hasta mostrar el comportamiento del aceite evaluado en el rango de temperatura para el cual se realiza el estudio.

En la figura 2.4 se muestra una aplicación complementaria del calculador de la compañía Widman International, empleado para la determinación de la viscosidad a 100 °C, teniendo en consideración factores como el índice de viscosidad del aceite y la viscosidad del mismo a 40 °C.

Calcular la viscosidad cSt a 100°C	
Indice de Viscosidad	<input type="text"/>
Viscosidad cSt (mm ² /s) a 40°C	<input type="text"/>
Viscosidad cSt (mm ² /s) a 100°C	<input type="text"/>
<input type="button" value="Calcular"/> <input type="button" value="Borrar"/>	

Figura 2.4. Calculador de viscosidad a 100 °C

2.6. Instrumentos de medición empleados en la investigación

Se emplearon instrumentos para las mediciones de temperatura, en el reductor de velocidad, tales como el pirómetro (modelo Testo 845, Figura 2.5) y la cámara termográfica (Fluke Ti30, Figura 2.7), las características de los mismos se presentan en las Tablas 1 y 2 de los anexos respectivamente.

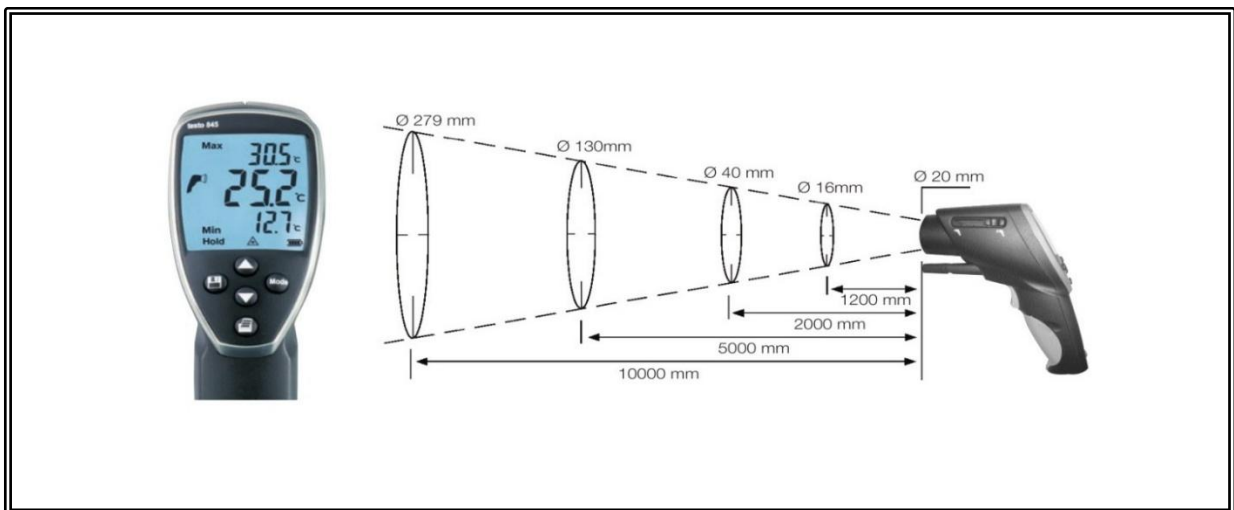


Figura 2.5. Pirómetro testo 845

Con el pirómetro testo 845 se realizaron mediciones puntuales en los ocho puntos de apoyo del reductor de velocidad a 1 m de distancia (figura 2.6). Se comenzaron las mismas desde las 8 AM hasta las 3 PM espaciadas a una hora. El pirómetro tiene un rango de medición de -35 a 950 °C y una precisión para las temperaturas registradas de $\pm 0,75$ °C.



Figura 2.6. Puntos de apoyo del reductor SEC -103

La cámara termográfica Fluke Ti30 es una unidad de toma de imágenes térmicas de última generación, ligera y con forma de pistola con la que se obtiene imágenes térmicas y lecturas radiométricas instantáneas y precisas a distancia de su objetivo. Ergonómicamente diseñada para un uso indistinto con la mano izquierda o derecha, la cámara termográfica Ti30 captura imágenes y datos térmicos con sólo oprimir el gatillo.

El software que se emplea con la cámara termográfica, el InsideIR™, le permite visualizar, examinar y analizar las imágenes y los datos para descubrir así tendencias cualitativas y cuantitativas asociadas al objetivo. El software InsideIR le permite definir bases de datos de mantenimiento dependiendo de la condición específica de su equipo, de monitoreo y según las necesidades de administración de sus activos.



Figura 2.7. Cámara termográfica Fluke Ti30.

La cámara termográfica fue empleada en el horario comprendido entre las 12 M y 1 PM, horario del día donde la temperatura ambiente es más elevada. El rango de medición de la misma es de -10 a 250 °C y el rango de precisión de $\pm 2 \%$ o $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (lo que sea mayor), las mediciones se realizaron a una distancia de 1 m.

Al reductor en estudio se le realizó un análisis de vibraciones complementario de descartar cualquier problema asociado a los niveles de vibraciones en el equipo, el mismo se realizó con un vibrómetro (Pluma de vibración) del tipo CMAS 100 SL SKF como se puede observar en la figura 2.8, en la Tabla 3 de los anexos se exponen las especificaciones fundamentales del mismo.



Figura 2.8. Pluma de vibración CMAS 100 SL SKF

2.7. Parámetros condensorios de los aceites para engranajes

La introducción de los parámetros condensorios para determinar la vida útil de un lubricante, depende en gran medida de aspectos tales como: calidad del lubricante, estado técnico del equipo, condiciones de explotación, medio ambiente. Esto implica que no siempre para un mismo nivel de calidad y diferentes modelos de equipos, se debe seguir estrictamente los valores de los parámetros que se deben analizar para efectuar el cambio de los productos ([Castrol, 2012](#)).

2.7.1. Análisis de laboratorio

Existen muchos métodos disponibles que pueden usarse para proporcionar información sobre la condición del lubricante. En todos los casos, las comparaciones deben hacerse con una muestra del nuevo aceite que se utilizó realmente en el equipo. Los valores de

referencia no deben proceder de un catálogo, sino de un análisis de la muestra real, para asegurarse de que el lubricante inicialmente estaba dentro de los límites especificados por el proveedor. Los análisis básicos deberían incluir:

Método	Prueba de propiedad
Viscosidad.....	ASTM D445
Contenido de agua.....	ASTM D6304
Número de ácido.....	ASTM D664
Aditivos y elementos de desgaste.....	ASTM D5185

Viscosidad: Es la propiedad más crítica de cualquier aceite, la viscosidad está directamente afectada por la temperatura y presión del sistema. Conforme aumenta la temperatura, la viscosidad decrece, conforme la presión crece la viscosidad crece. Cualquier cambio en la viscosidad (aumento/disminución) indica contaminación o degradación ([Termogram, 2015](#)).

El incremento de la viscosidad puede deberse a una oxidación profunda del producto, relleno con aceites de viscosidad superior o alta concentración de productos insolubles. Si existe un incremento de la misma en un 25 % del valor inicial se recomienda hacer cambio de aceite inmediato ([Castrol, 2012](#)).

Contenido de agua: El contenido de agua debe ser monitoreado, no importa si el aceite es acuoso o de otro tipo. Exceso de agua reducirá la viscosidad del aceite, lo que lo inhabilita para lubricar apropiadamente ([Termogram, 2015](#)).

[Castrol \(2012\)](#), recomienda que el contenido de agua en el aceite no debe ser mayor de un 0,5 %, de lo contrario el aceite tendría que renovarse.

Acidez: La acidez de un aceite permite evaluar los cambios químicos experimentados por el mismo como consecuencia de su oxidación. El TBN (Total Base Number) permite controlar la evolución de la basicidad de un aceite durante el servicio de este ([Benlloch, 1984](#)).

Insolubles: El conocimiento de insolubles de un aceite y su composición es siempre interesante, ya que dicho contenido está relacionado directamente con la degradación

del aceite, con la eficacia de los filtros y con el desgaste. Para su determinación existen varios métodos, todos ellos basados en la solubilidad o insolubilidad de los mismos en diversos disolventes, tales como pentano, hexano y heptano por un lado y por el otro el tolueno.

La norma más utilizada es la ASTM D893, que distingue entre “insolubles en pentano” e “insolubles en tolueno”. Los insolubles en pentano constituyen el total de los productos insolubles presentes en el aceite usado. Los insolubles en tolueno proporcionan el contenido en productos procedentes de una contaminación externa. Se recomienda que si es mayor que el 50 % en peso se realice cambio de aceite ([Benlloch, 1984](#)).

Contenido de metales: Se deben determinar metales en el aceite tales como, el hierro, cobre, aluminio, plomo, estaño y silicio. Los valores son fijados en función de las especificaciones de cada fabricante, ya que la concentración de partículas metálicas varía en dependencia del equipo.

2.8. Conclusiones del capítulo

- Quedó establecido el procedimiento para la selección de la viscosidad del aceite, que posibilite la formación de la lubricación hidrodinámica en reductores de velocidad, aplicando los criterios desarrollados por Widman y AGMA.
- Se caracterizó la instrumentación empleada para la determinación de la temperatura operacional en el reductor de velocidad, definiendo rango y nivel de precisión.

3. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. Introducción

La creación de nuevos patrones y modelos ha ido avanzando a pasos agigantados hacia la tecnificación, partiendo de la aplicación de nuevas tecnologías que garanticen un nivel de exigencia en la productividad, con el propósito de reducir los costos manteniendo la calidad que exige el cliente, y la certificación de empresas y productos que avalen el buen hacer. Es por ello que en la actualidad se dedica más tiempo y estudio al tema de la lubricación, ya que a medida que se desarrolla la técnica industrial, se hace necesaria la búsqueda de lubricantes y sistemas de lubricación más sofisticados, eficientes y duraderos que introduzcan notables mejoras que sin dudas redundan en una mejor eficiencia del servicio sin necesidad de frenar el proceso productivo. Por tal motivo, la formación de la lubricación hidrodinámica en engranajes, es uno de los ejemplos a seguir en la mejora de la eficiencia y la disminución de las pérdidas económicas, este régimen de lubricación aparece entre dos superficies en movimiento relativo que, arrastrando a un fluido a un espacio convergente, son capaces de crear una cuña de fluido a presión capaz de soportar la carga a la que están sometidas, reduciendo las posibilidades de fallo de cualquier equipo (Peña, 2015).

A partir de las teorías, las ecuaciones y los procedimientos planteados en el capítulo uno y dos, los cuales permiten la correcta selección de un aceite lubricante que posibilite un régimen hidrodinámico, corresponde aplicar el procedimiento planteado en el capítulo dos referido a la formación de la lubricación hidrodinámica aplicable a los reductores de velocidad. El correcto análisis del método, permite afirmar las bases para futuros trabajos que se desarrollen sobre la temática. Es por ello que se declara como **objetivo** del capítulo: realizar el análisis de los resultados siguiendo la metodología planteada en el capítulo anterior.

3.2. Mediciones en el reductor de velocidad

Para las mediciones de temperatura en el reductor de velocidad, como se mencionó en el capítulo dos se empleó el pirómetro y la cámara termográfica, además de un análisis complementario de vibraciones.

3.2.1. Mediciones realizadas con el pirómetro

Al realizar la medición de la temperatura operacional en el reductor de velocidad con el pirómetro, se registraron variaciones entre los 30 y 65 °C. Se comprobó la viscosidad para otras temperaturas, alcanzables de estar presente el efecto de sobrecarga, aunque se hizo énfasis en la máxima temperatura registrada. En las Tablas 3.1 y 3.2 se muestran las mediciones realizadas en días diferentes y en condiciones meteorológicas distintas.

Tabla 3.1. Mediciones realizadas el 13/03/2017 (día soleado)

Puntos de apoyo/Horas	8 AM	9 AM	10 AM	11 AM	12 M	1 PM	2 PM	3 PM
Punto 1	54,3	57,6	57,3	58,8	59,2	60,7	59,9	59,3
Punto 2	58,5	59,0	61,3	61,5	61,6	64,1	61,3	59,8
Punto 3	34,8	36,2	37,1	37,5	38,0	39,1	38,6	37,8
Punto 4	41,3	42,5	42,4	42,1	41,3	41,5	39,3	39,0
Punto 5	34,6	35,8	37,0	37,3	37,8	38,2	36,7	36,3
Punto 6	36,8	36,9	36,9	37,3	37,0	36,4	37,0	37,2
Punto 7	33,3	34,5	35,4	35,9	36,5	35,6	37,1	35,6
Punto 8	33,3	33,4	33,2	33,7	33,5	33,0	33,3	33,0

Tabla 3.2. Mediciones realizadas el 24/03/2017 (día nublado)

Puntos de apoyo/Horas	8 AM	9 AM	10 AM	11 AM	12 M	1 PM	2 PM	3 PM
Punto 1	50,3	50,8	50,9	51,2	53,9	55,2	55,1	52,5
Punto 2	59,3	59,9	60,2	61,3	61,4	61,8	60,2	58,3
Punto 3	35,4	35,5	36,1	36,3	35,8	35,7	35,0	35,7
Punto 4	43,6	43,9	40,0	40,5	38,2	42,1	38,4	43,4
Punto 5	33,9	34,8	35,5	35,2	35,0	35,5	36,1	33,5
Punto 6	35,8	36,1	36,9	36,7	35,6	37,0	34,0	34,2
Punto 7	34,2	32,7	34,6	33,7	33,1	33,2	33,5	32,6
Punto 8	30,8	31,1	32,4	31,8	31,3	33,0	32,3	30,9

Como se puede apreciar en estas mediciones, la temperatura más elevada que se registró con el pirómetro fue el día 13 de marzo, en el punto de apoyo número dos a la 1 PM, con un valor de 64,1 °C debido a que esta es la hora en que hay mayor incidencia del sol sobre el reductor de velocidad.

3.2.2. Mediciones realizadas con la cámara termográfica

La cámara termográfica Fluke Ti 30 se empleó en el horario de la 1 PM, realizándose mediciones puntuales en el lado del reductor donde se registraron mayores

temperaturas (lado del acoplamiento reductor – piñón) y en el punto más caliente del mismo, que según las mediciones realizadas con el pirómetro corresponde al punto de medición dos (punto de apoyo del árbol de entrada, Figura 3.1).

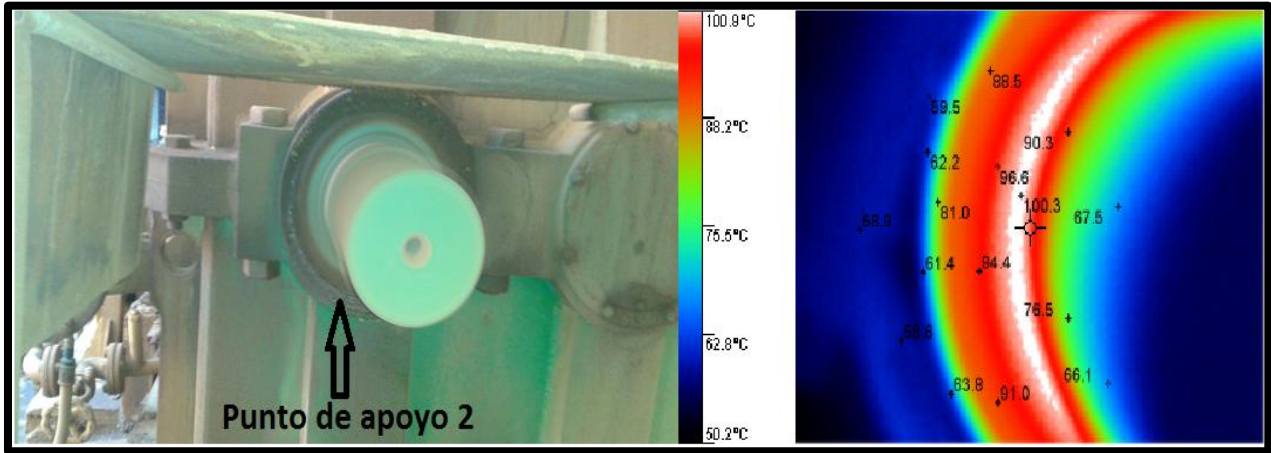


Figura 3.1. Termografía del punto de apoyo 2.

Como se puede apreciar en la imagen termográfica, la temperatura máxima que se recoge es de 100,9 °C, pero la misma corresponde a un casquillo que se encuentra acoplado al árbol motriz. En el punto de apoyo, la medición de la temperatura es relativamente igual a la temperatura medida con el pirómetro, alcanzando los 65 °C, que de estar presente una sobrecarga en el árbol o el reductor; esta pudiera incrementarse.

3.2.3. Mediciones realizadas con el Vibro Pen

Para descartar problemas asociados a las vibraciones en el equipo, se realizó un análisis de vibraciones complementario, examinando los puntos que se muestran en la figura 3.2.

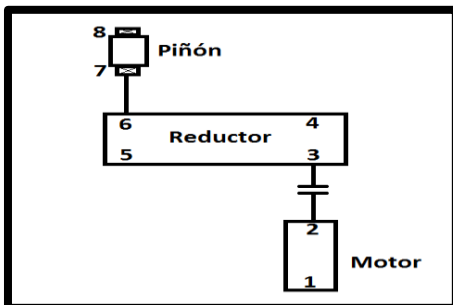


Figura 3.2. Puntos donde se realizó las mediciones de vibración.

En la Tabla 3.3 se exponen los resultados de las vibraciones medidas en cada uno de estos puntos. Estos valores han sido comprobados en la Tabla 4 de los anexos (tabla de severidad), para descartar que existan problemas mecánicos, que causen bajas frecuencias de vibración como las pérdidas mecánicas, desequilibrios, mala cimentación, falta de alineamiento, resonancias, entre otros.

Tabla 3.3. Mediciones realizadas con el Vibro Pen

Motor	Punto 1	Punto 2
Vertical	0,7 mm/s	0,8 mm/s
Horizontal	1,3 mm/s	1,1 mm/s
Axial	0,8 mm/s	0,8 mm/s
Reductor	Punto 3	Punto 4
Vertical	0,1 mm/s	0,2 mm/s
Horizontal	0,3 mm/s	0,4 mm/s
Axial	0,3 mm/s	0,3 mm/s
Reductor	Punto 5	Punto 6
Vertical	0.2 mm/s	0.3 mm/s
Horizontal	0.1 mm/s	0.4 mm/s
Axial	0.3 mm/s	0.8 mm/s
Piñón	Punto 7	Punto 8
Vertical	0,2 mm/s	1,1 mm/s
Horizontal	0,1 mm/s	1,2 mm/s
Axial	0,0 mm/s	0,0 mm/s

Conociendo los valores y la clase de máquina, se empleó la Tabla de severidad (Tabla 4 de los anexos), pudiendo diagnosticar el estado técnico del reductor, concluyendo que los valores obtenidos en la medición están bien, el golpe del diente que se siente esporádicamente no armónico a la velocidad de rotación del tambor, está asociado al desbalance de carga interno del secadero sin generar niveles de vibraciones de consideración, por lo que se descarta cualquier tipo de problema asociado con las vibraciones en el reductor de velocidad.

3.3. Resultado de la lubricación en el reductor de velocidad

Para los aceites de reductores disponibles en las empresas del tipo CUBALUB y Castrol, se realizó el cálculo de las viscosidades desde los 40 a los 100 °C espaciadas a 5 grados, a través del calculador de la curva de viscosidad de [Widman \(2009\)](#). En la Tabla 3.4 se exponen los resultados de los Aceites Reductor de CUBALUB y de los

aceites Castrol Alpha SP con índice de viscosidad de 90 y en la Tabla 3.5 se describe el comportamiento del Alphasyn T con índice de viscosidad de 160, todos con grado de viscosidad de 220, 320, 460 y 680.

3.3.1. Aceite Reductor y Alpha SP

El aceite Reductor ha sido desarrollado para la lubricación de engranajes con dientes de tipo recto, helicoidal y sin fín, que funcionan bajo cargas elevadas a diferentes velocidades, lubricados por baños (salpicadura) o por circulación forzada de aceite a temperaturas que pueden exceder los 90 °C. Estos aceites se elaboran con aceites básicos parafínicos de alta calidad, a los cuales se les incorporan aditivos multifuncionales que le confieren propiedades antioxidantes, antiespumantes y un alto grado de extrema presión (EP) (CUBALUB, 2008).

Los aceites Castrol Alpha SP disponibles en varias clases ISO son lubricantes de primera calidad, exentos de plomo para ser utilizados en engranajes que trabajen en condiciones de extrema presión. Han sido formulados usando aceites básicos minerales de alta calidad y un aditivo de fósforo - azufre para presiones extremas especialmente seleccionados. En su formulación también son incluidos aditivos antioxidantes, anticorrosivos y antiespumantes. Se recomiendan para todo tipo de transmisiones de engranajes cerrados industriales, son convenientes para sistemas de circulación y de lubricación por salpicadura (Castrol, 2012).

Tabla 3.4. Viscosidad del aceite Reductor y Alpha SP a diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	Alpha SP 220	Alpha SP 320	Alpha SP 460	Alpha SP 680
40	220	320	460	680
45	165,5	237,4	336,5	489,9
50	126,9	179,6	251,2	360,4
55	99	138,3	191	270,4
60	78,4	108,3	147,7	206,5
65	63	86,1	116,1	160,3
70	51,3	69,4	92,6	126,3
75	42,3	56,6	74,8	101
80	35,3	46,8	61,2	81,8
85	29,7	39,1	50,7	67
90	25,3	33	42,4	55,5
95	21,7	28,1	35,8	46,5
100	18,8	24,1	30,5	39,3

Como se puede apreciar en la Tabla 3.4, los valores de viscosidad calculados a través de los calculadores de la compañía Widman International (Figura 2.3 y Figura 2.4) para los aceites Reductor y Alpha SP son análogos, debido a que presentan igual índice de viscosidad, por lo que los aceites mencionados se comportan de igual manera (Figura 3.3).

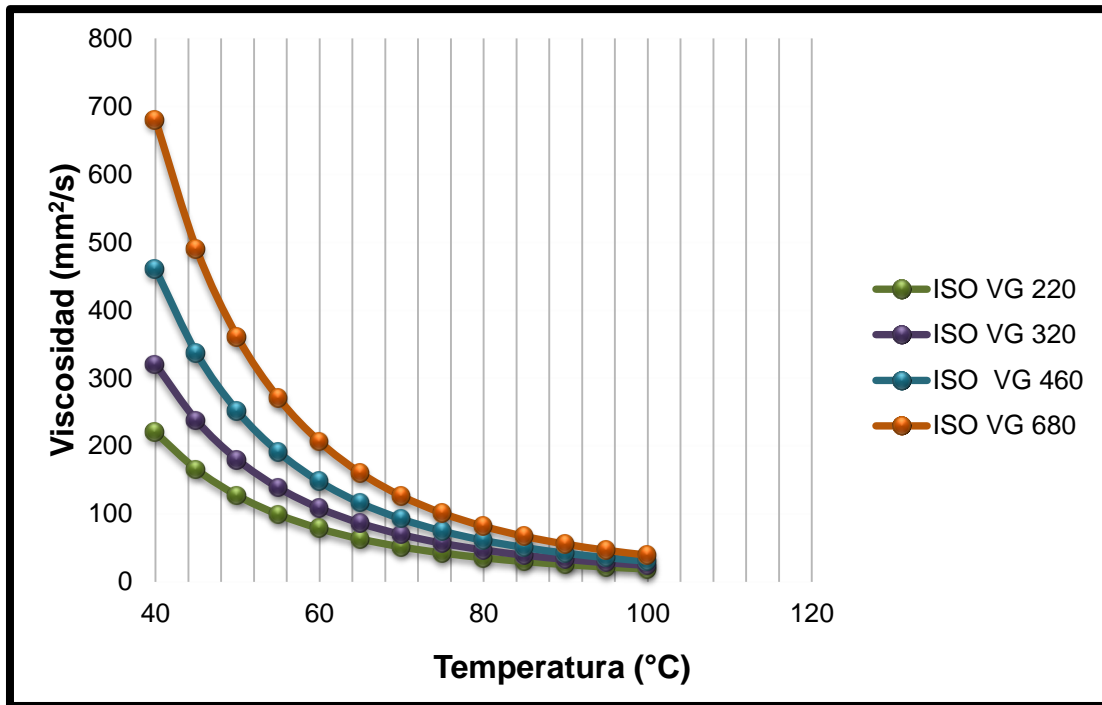


Figura 3.3. Comportamiento del aceite Reductor y Alpha SP al aumentar la temperatura

3.3.2. Aceites Castrol Alphasyn T

Estos lubricantes constituyen aceites para engranajes con base sintética y alto rendimiento, formulados a partir de polialfaoleinas y aditivos especialmente seleccionados para brindar una excelente estabilidad a altas temperaturas, habilidad superior para soportar cargas y beneficios protectores en exceso para los equipos. Están disponibles en varias clases, algunos se muestran en la Tabla 3.5, obtenidos a través de los calculadores de la compañía Widman International (Figura 2.3 y Figura 2.4). El uso del aceite Alphasyn T tiene grandes beneficios; como la extensión de la vida de servicio de la maquinaria, presenta bajo coeficiente de fricción ayudando al ahorro por consumo de energía y sobre todo, presenta alto índice de viscosidad, lo que lo hace apropiado para trabajar en altas temperaturas ambientales y de operación.

Tabla 3.5. Viscosidad del aceite Alphasyn T a diferentes temperaturas con índice de viscosidad 160

Temperatura T (°C)	Alphasyn T 220	Alphasyn T 320	Alphasyn T 460	Alphasyn T680
40	220	320	460	680
45	174,8	251,6	358,1	523
50	140,7	200,5	282,6	408,1
55	114,6	161,8	225,9	322,7
60	94,4	132,1	182,8	258,3
65	78,6	109	149,5	209,2
70	66	90,8	123,5	171,3
75	56	76,3	103,1	141,6
80	47,9	64,8	86,8	118,2
85	41,2	55,4	73,7	99,5
90	35,8	47,7	63,1	84,5
95	31,3	41,4	54,4	72,3
100	27,46	36,23	47,19	62,29

Los aceites Castrol Alphasyn T son recomendados para engranajes que trabajen bajo altas cargas térmicas, hasta 160 °C en la temperatura del aceite y altas presiones, en los sistemas de circulación. Pueden ser utilizados en sistemas donde existan cargas desde ligeras hasta moderadas. (Castrol, 2012).

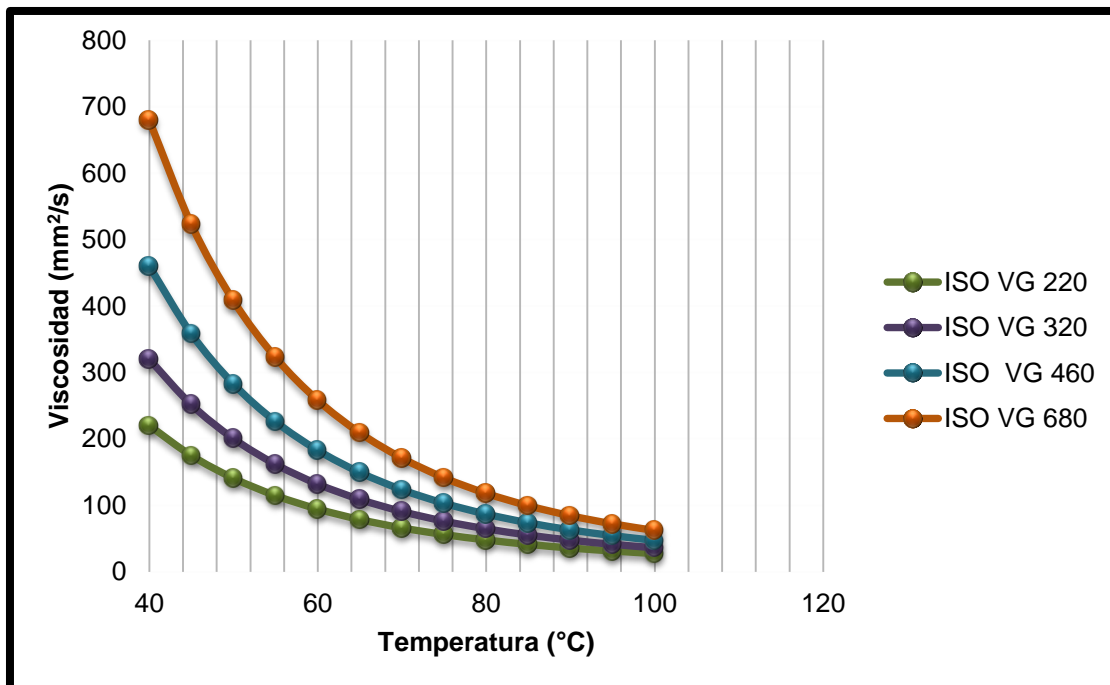


Figura 3.4. Comportamiento del aceite Alphasyn T al aumentar la temperatura.

En la gráfica se observó que los valores de viscosidad disminuyeron (Figura 3.3 y Figura 3.4), al aumentar la temperatura, comportamiento análogo a los expuestos por [Garcell \(1993\)](#); [Cárdenas y Fonseca \(2009\)](#) y [Trapeznikov \(2011\)](#), que plantean que al aumentar la temperatura surgen dos efectos, el primero es la disminución de la viscosidad del medio dispersante y la segunda, el debilitamiento de las estructuras instituidas debido a las partículas formadas por este aumento de temperatura.

3.3.3. Viscosidad del aceite

En la selección de la viscosidad del aceite para el reductor de velocidad TT – 850E – CHEVRÓN de la panta secaderos de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, fue de gran ayuda el calculador de viscosidad de reductores de la compañía Widman, el cual brinda de manera adecuada la viscosidad del lubricante (clase ISO), para ello es necesario introducir parámetros como: tipo de lubricación, tipo de reducción, potencia y velocidad del escalón final de reducción.

Conociendo que el reductor, posee una potencia de 536 HP (400 kW), la lubricación es por bomba y que el mismo realiza reducciones múltiples, las posibles viscosidades están en el rango de 150 a 680 mm²/s, lo cual depende de la velocidad de salida del reductor, siendo esta de 21 min⁻¹.

Empleando el calculador de viscosidad de la compañía Widman (Figura 3.5), se obtuvo que, para posibilitar la lubricación hidrodinámica en los pares tribológicos del reductor, es necesario un aceite industrial con una viscosidad de 680 mm²/s, condición que debe cumplir a 40 °C. De los aceites de CUBALUB y Castrol evaluados tanto en la rama de aceites Reductor, Alpha SP como en la Alphasyn T existen aceites con esas características, como son los aceites Reductor 680, Alpha SP 680 de origen mineral y el Alphasyn T 680 de origen sintético.

Selección de Viscosidad para Reductores	
Tipo de Lubricación:	Por Bomba <input type="button" value="v"/>
Tipo de Reducción:	Reducción Multiple >10:1 <input type="button" value="v"/>
Potencia (HP):	100-1000 <input type="button" value="v"/>
Velocidad Final (RPM):	0-150 <input type="button" value="v"/>
Viscosidad correcta (ISO)	680

Reductor simple	Reductor múltiple
-----------------	-------------------

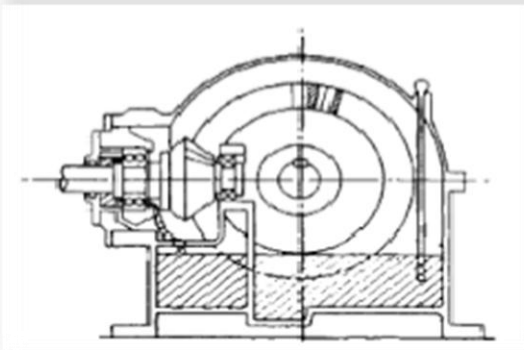
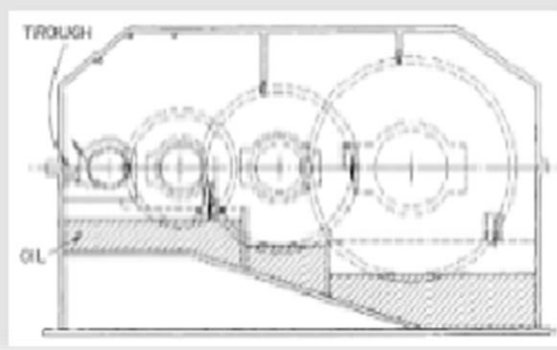



Figura 3.5. Ventana para el cálculo de viscosidad de reductores

A los tres aceites antes mencionados, se les realizó un análisis comparativo con el propósito de reflejar cuál de ellos presenta las mejores características de operación, bajo diferentes condiciones. El análisis reflejó que el comportamiento de los aceites, Reductor 680 y el Alpha SP 680 se comportan de igual manera, mientras que para el Alphasyn T 680, a diferentes temperaturas con igual viscosidad, este último se mantiene ligeramente por encima, permitiendo un descenso menos prolongado de la viscosidad del aceite con el aumento de la temperatura (figura 3.6).

La viscosidad del lubricante a la temperatura de funcionamiento, debe ser correcta para un rendimiento óptimo del engranaje y larga vida útil del mismo. Aunque los fabricantes de accionamientos pueden proporcionar grados de viscosidad para un lubricante sugerido para aplicaciones generales, estos son lineamientos basados en una temperatura de funcionamiento del lubricante en bruto.

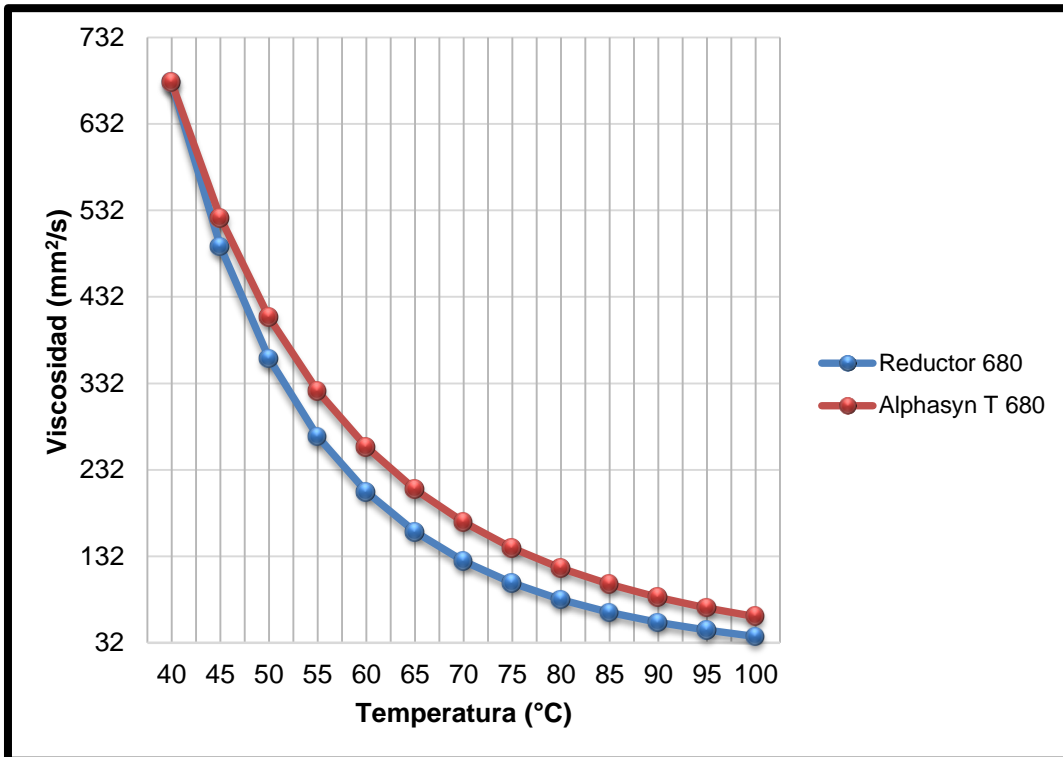


Figura 3.4. Comportamiento del aceite Reductor 680 y el Alphasyn T 680.

3.4. Resultados de la selección del grado de viscosidad del lubricante

Aunque se determinó la viscosidad del aceite para que el reductor trabaje de forma tal que se garantice la lubricación hidrodinámica, el método anterior se limita a evaluar en función de características constructivas operacionales y no toma en consideración la variable temperatura, la cual afecta en gran magnitud el comportamiento de la viscosidad y tampoco toma en consideración el índice de viscosidad del aceite empleado.

3.4.1. Velocidad circunferencial de las ruedas dentadas del reductor

Utilizando la expresión 2.2 se realizó el cálculo de la velocidad circunferencial de cada rueda dentada del reductor, evaluando para la velocidad de rotación del árbol donde estaban acopladas y teniendo en cuenta los diámetros de las ruedas siendo igual a $d_1 = 253$ mm, $d_2 = 822$ mm, $d_3 = 318$ mm, $d_4 = 1\ 017$ mm, $d_5 = 385$ mm y $d_6 = 1\ 319$ mm. En las Tablas 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9 se exponen los grados de viscosidad adecuados para la lubricación de cada rueda del reductor a la temperatura de 65 °C, con índices de viscosidad del aceite de 90, 120, 160 y 240 respectivamente.

Tabla 3.6. Grado de viscosidad ISO recomendado para aceites con índice de viscosidad de 90

Número de dientes	Velocidad circunferencial	Viscosidad ISO	
Z ₁	33	9,83 m/s	220
Z ₂	107	9,81 m/s	220
Z ₃	29	3,79 m/s	320
Z ₄	93	3,80 m/s	320
Z ₅	25	1,44 m/s	680
Z ₆	86	1,45 m/s	680

Realizada la selección del grado de viscosidad por el método expuesto en el capítulo anterior y para un índice de viscosidad de 90, los resultados obtenidos mostraron que a mayor velocidad circunferencial menor grado de viscosidad, revelando de igual manera que no existe similitud entre los pares engranados y que en el último par engranado el grado de viscosidad correcta para la lubricación del reductor es 680 mm²/s.

Álvarez (1999), propone calcular las velocidades circunferenciales para todos los engranajes y que la selección del grado de viscosidad debe realizarse para el engranaje fundamental, teniendo en cuenta las condiciones de arranque en frío.

Tabla 3.7. Grado de viscosidad ISO recomendado para aceites con índice de viscosidad de 120

Número de dientes	Velocidad circunferencial	Viscosidad ISO	
Z ₁	33	9,83 m/s	150
Z ₂	107	9,81 m/s	150
Z ₃	29	3,79 m/s	220
Z ₄	93	3,80 m/s	220
Z ₅	25	1,44 m/s	680
Z ₆	86	1,45 m/s	680

Los resultados obtenidos en la Tabla 3.7, para índice de viscosidad 120 se comportaron diferentes a los expuestos en la Tabla 3.6, excepto para el último escalón de reducción, por lo que no existe variación alguna del grado de viscosidad en este par engranado, lo que demuestra que para las condiciones operacionales del reductor y temperatura de 65 °C no existe influencia de estos índices de viscosidad en la selección de la clase de aceite.

Tabla 3.8. Grado de viscosidad ISO recomendado para aceites con índice de viscosidad de 160

Número de dientes	Velocidad circunferencial	Viscosidad ISO	
Z ₁	33	9,83 m/s	150
Z ₂	107	9,81 m/s	150
Z ₃	29	3,79 m/s	220
Z ₄	93	3,80 m/s	220
Z ₅	25	1,44 m/s	460
Z ₆	86	1,45 m/s	460

Los valores obtenidos en la Tabla 3.8, para índice de viscosidad 160 se comportaron de manera análoga a los expuestos en la Tabla 3.7, excepto por el último escalón de reducción formado por las ruedas Z₅ y Z₆ que indican que el grado de viscosidad adecuado para la lubricación es de 460.

Tabla 3.9. Grado de viscosidad ISO recomendado para aceites con índice de viscosidad de 240

Número de dientes	Velocidad circunferencial	Viscosidad ISO	
Z ₁	33	9,83 m/s	100
Z ₂	107	9,81 m/s	100
Z ₃	29	3,79 m/s	150
Z ₄	93	3,80 m/s	150
Z ₅	25	1,44 m/s	460
Z ₆	86	1,45 m/s	460

Los valores obtenidos en la Tabla 3.9 evaluados para índice de viscosidad 240, muestran una disminución de una clase para las ruedas Z₁, Z₂, Z₃ y Z₄, lo que refleja la influencia del índice de viscosidad en la selección de la clase de aceite. No obstante, el último escalón de reducción indica que el grado de viscosidad adecuado para la lubricación es 460.

Al evaluar el grado de viscosidad adecuado para la lubricación del reductor de velocidad para aceites con índice de viscosidad de 160 y 240; se demostró (Tabla 3.9 y 3.10) que, respecto a las Tablas 3.7 y 3.8, para el último escalón de reducción disminuyó el grado de viscosidad de 680 a 460, lo cual está asociado a la estabilidad de los aceites con índices de viscosidad elevados.

Los resultados mostrados en las Tablas 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9 manifiestan las variaciones en el grado de viscosidad de cada par engranado en correspondencia con la velocidad circunferencial y el índice de viscosidad, siendo este último desigual para cada caso, demostrándose que, a menor velocidad circunferencial, mayor será el grado de viscosidad. Resulta evidente que, para la lubricación del reductor de velocidad, con aceites de índice de viscosidad 90 y 120, debe emplearse un aceite con grado de viscosidad 680; y para aceites con índice de viscosidad de 160 y 240, debe emplearse un aceite con grado de viscosidad de 460, de forma tal que se alcance la lubricación hidrodinámica del último escalón de reducción, siendo este el que trabaja para las condiciones más críticas (velocidades circunferenciales más bajas).

3.4.2. Aditivo del aceite del reductor

El reductor de velocidad está acoplado a un horno de tambor giratorio, el cual constituye la máquina movida y está expuesta a choques moderados, debido a la masa del mineral que se mueve en su interior y las pequeñas rocas que no son rechazadas durante el proceso de cribado. La máquina motriz es un motor eléctrico que trabaja de forma uniforme, por tanto, aplicando lo expuesto en el tópico 2.3.2 mediante la Tabla 2.7, se obtuvo como resultado que los aditivos de extrema presión (EP) son los más adecuados. [Falk \(1995\)](#), expone que, para reductores con grandes cargas o reductores cargados por encima de la estimación inicial, es preferible usar lubricantes industriales de extrema presión a base de petróleo. Los aditivos EP que se recomiendan actualmente son del tipo azufre fósforo.

3.4.3. Lubricación de los rodamientos del reductor

El reductor de velocidad modelo TT – 850E – CHEVRÓN es de reducción múltiple, con tres escalones de reducción, lo que quiere decir que posee cuatro árboles. En cada árbol hay un par de rodamientos fabricados por la firma SKF, el primer árbol (árbol de entrada) y el segundo poseen los mismos rodamientos, con designación 23040. Este rodamiento clasifica como rodamientos de rodillos a rótula o de barril, posee diámetro interior y exterior de 200 y 310 mm respectivamente, un ancho de 82 mm y su capacidad de carga dinámica y estática es de 1 000 y 1 530 kN respectivamente, y la velocidad de referencia y límite está entre los 1 800 y 2 200 min^{-1} . Los rodamientos del

tercer árbol tienen designación 23056 (rodamientos de barril), con diámetro interior de 280 mm y exterior de 420 mm, un ancho de 106 mm, la carga estática y dinámica es de 1730 y 2 850 kN respectivamente y su velocidad de referencia es de 1 300 min⁻¹ y la límite de 1 600 min⁻¹. El último árbol posee el mismo tipo de rodamientos con designación 23964, diámetro interior y exterior de 320 y 440 mm respectivamente y ancho de 90 mm.

Para determinar la viscosidad relativa (viscosidad mínima necesaria) del aceite, la cual posibilita la formación de la lubricación hidrodinámica en los pares tribológicos del rodamiento, se aplicó el método analítico. Se calculó el diámetro medio del rodamiento empleando la ecuación 2.3, el cual depende del diámetro interior y exterior de los rodamientos. Para la primera serie 23040 el diámetro medio toma un valor de 255 mm, para la serie 23056 de 350 mm y la serie 23964 de 380 mm. Empleando la ecuación 2.6 para obtener el factor de velocidad que tiene en cuenta el diámetro medio del rodamiento y la velocidad de rotación del mismo, se tiene que la lubricación en los rodamientos es por baño de aceite.

Relacionando las velocidades de rotación con el diámetro medio calculado para cada serie de rodamientos, se obtuvo la viscosidad mínima necesaria, con la cual teniendo la temperatura de servicio y empleando el método analítico se determinó la viscosidad relativa o mínima necesaria. Utilizando el calculador de la compañía Widman para graficar la curva de viscosidad se obtuvo la clase clase ISO a utilizar en los rodamientos, resultados expuestos en las Tablas 3.10, 3.11, 3.12, y 3.13.

Tabla 3.10. Clase de viscosidad requerida con índice de viscosidad 90 para la lubricación de los rodamientos

Rodamientos	Velocidad de rotación (min ⁻¹)	Viscosidad relativa (mm ² /s)	Viscosidad ISO
23040	742	12	32
23040	228	31	100
23056	71,4	70	220
23964	21	185	680

Para un índice de viscosidad de 90, los resultados obtenidos mostraron que a mayor velocidad de rotación menor es el grado de viscosidad, corroborando que la velocidad

de los mecanismos es un factor importante conjuntamente con la temperatura, en la selección del grado de viscosidad adecuada para la lubricación del reductor y se puede apreciar que en el último rodamiento con designación 23964 el grado de viscosidad correcta para la lubricación del reductor es 680 mm²/s.

Tabla 3.11. Clase de viscosidad requerida con índice de viscosidad 120 para la lubricación de los rodamientos.

Rodamientos	Velocidad de rotación (min ⁻¹)	Viscosidad relativa (mm ² /s)	Viscosidad ISO
23040	742	12	22
23040	228	31	68
23056	71,4	70	220
23964	21	185	680

Al realizar el análisis se comprobó que, para este índice de viscosidad, el grado de viscosidad para cada rodamiento es menor que para el índice de viscosidad 95, excepto para los rodamientos 23056 y 23964, esto se debe a que para las condiciones operacionales del reductor y temperatura de servicio de 65 °C, no hay incidencia en la selección de la viscosidad para estos índices de viscosidad.

En la Tabla 3.12 se determinó la viscosidad requerida para la lubricación de los rodamientos con índice de viscosidad de 160.

Tabla 3.12. Clase de viscosidad requerida con índice de viscosidad 160 para la lubricación de los rodamientos

Rodamientos	Velocidad de rotación (min ⁻¹)	Viscosidad relativa (mm ² /s)	Viscosidad ISO
23040	742	12	22
23040	228	31	68
23056	71,4	70	220
23964	21	185	680

Al evaluar la viscosidad necesaria o requerida para la lubricación de los rodamientos, en aceites con índice de viscosidad 160, se puede apreciar que los resultados obtenidos en la Tabla 3.12 son análogos a los expuestos en la Tabla 3.11, evidenciándose que no existen diferencias significativas para los aceites con estos índices de viscosidad, según las condiciones operacionales del reductor.

Tabla 3.13. Clase de viscosidad requerida con índice de viscosidad 240 para la lubricación de los rodamientos

Rodamientos	Velocidad de rotación (min ⁻¹)	Viscosidad relativa (mm ² /s)	Viscosidad ISO
23040	742	12	22
23040	228	31	68
23056	71,4	70	150
23964	21	185	460

Los resultados expuestos en la Tabla 3.13 muestran que para los rodamientos 23056 y 23964 disminuye la viscosidad respecto a los índices de viscosidad 90, 120 y 160, lo cual está asociado a la estabilidad de los aceites con índices de viscosidad elevados.

3.5. Propuesta del aceite lubricante

La lubricación actual del reductor se realiza con un aceite clase 220, con viscosidad real de funcionamiento de 63,0 mm²/s; la cual se encuentra 53,1 mm²/s por debajo respecto al aceite clase 460 y 97,3 mm²/s respecto al aceite clase 680. Lo cual permite aseverar que no se posibilita la lubricación hidrodinámica de los pares engranados del reductor.

Al aceite de funcionamiento que se está empleando actualmente en la lubricación del reductor de velocidad, se le realizó un análisis de los parámetros condenatorios más importantes recomendados por AGMA (2002) para la lubricación de engranajes, como la viscosidad, contenido de agua e impurezas mecánicas; resultados que se exponen en la Tabla 3.14.

Tabla 3.14. Resultados del análisis de laboratorio

Muestra de aceite Reductor 220	Visc. 40°C(cSt)	Imp. %	H ₂ O %
Reductor Principal Secadero No.3	218.40	0.03	0.00

El último cambio de aceite del reductor se realizó un mes antes del análisis de laboratorio, por lo que los resultados obtenidos en el mismo fueron satisfactorios, no teniendo variación significativa de las propiedades iniciales del aceite.

Al realizar un análisis de los resultados obtenidos se llegó a la conclusión de que debe utilizarse un aceite clase de viscosidad ISO 680 para índices de viscosidad de 90 y 120; mientras que para índice de viscosidad de 160 y 240 se debe emplear un aceite clase de viscosidad ISO 460.

De los aceites disponibles en las compañías CUBALUB y Castrol para la lubricación de engranajes industriales, se encuentran los aceites Reductor, Alpha SP y Alphasyn T. A partir de los resultados obtenidos se puede aseverar que el lubricante que debe emplearse en el reductor de velocidad TT – 850E – CHEVRÓN para que se posibilite la lubricación hidrodinámica en los pares tribológicos del reductor, debe ser para índice de viscosidad 95, los aceites Reductor 680 y Alpha SP 680, mientras que para índice de viscosidad 160 debe emplearse el Alphasyn T 460.

3.6. Análisis económico

La salida de operación o avería que pudiera causar la paralización del reductor de velocidad objeto de estudio, causaría grandes pérdidas a la empresa comandante Ernesto Che Guevara, debido a que estos juegan un papel fundamental dentro del proceso productivo, por lo que el estado técnico de éste debe de estar en óptimas condiciones para su funcionamiento.

En el año 2015 la planta disminuyó su productividad, siendo esta de 245 toneladas /h, por problemas asociados a la violación de la lubricación del reductor, quedando este inhabilitado por 360 horas. Esto trajo consigo que se dejaran de alimentar 88 200 toneladas de mineral. Tomando en consideración que solo el 50 % de ese tiempo debía mantenerse en operación, se dejaron de incorporar 43 200 toneladas de mineral al proceso, esto asociado a una ley del níquel que plantea que 1,09 % equivale a 734,6 toneladas, de ahí que para una eficiencia de la planta del 70 %, la cantidad de níquel que se dejó de producir y exportar fuera igual a 514,2 toneladas, para el precio promedio actual por libra de 3 CUC, el valor de esta producción equivaldría a 3390,75 CUC, cifra dejada de ingresar por concepto de no producción.

3.7. Impacto ambiental

Los continuos y profundos estudios realizados a los lubricantes minerales y sintéticos a lo largo de los últimos años han arrojado que de cierto modo los mismos causan un efecto perjudicial tanto sobre el medio ambiente como sobre el propio hombre. La lubricación puede tener un impacto positivo o negativo sobre el medio ambiente, dependiendo de su manejo.

Los aceites industriales utilizados en el reductor, son productos ampliamente empleados en múltiples actividades y sus residuos pueden causar graves afecciones al medio ambiente y a la salud humana. Estos residuales representan más del 60 % de los aceites lubricantes consumidos, lo que los convierte en uno de los contaminantes más abundantes en la actualidad.

Acción y efecto de los lubricantes sobre la salud humana:

- Contacto directo con la piel (Puede generar irritaciones).
- Inhalación (Puede generar graves intoxicaciones).
- Ingestión (Puede provocar la muerte).

La manipulación indebida de los lubricantes es perjudicial, siendo este factor uno de los que mayores afectaciones causan tanto a la economía como al medio ambiente.

Tabla 3.15. Impactos ambientales asociados a la manipulación de lubricantes.

Accidente que provoca	Factor	Impactos ambientales
Derrame de aceite	Económico	• Pérdidas económicas
Derrame de aceite	Suelo	• Degradación del suelo • Pérdida del ecosistema endémico
Derrame de aceite	Agua	• Contaminación de las aguas • Inutilización del agua para fines comunes

Por otro lado, existe clara incidencia del efecto negativo que tiene un entorno ruidoso sobre las personas. Las molestias que ocasiona el ruido continuo provocado por un deficiente estado técnico del reductor, pueden provocar trastornos de diversos tipos e incapacidad para concentrarse, hasta lesiones en la membrana auditiva, dependiendo de la intensidad y duración del ruido.

De ahí que, este trabajo estuviese encaminado a disminuir estos factores dañinos para la supervivencia del ser humano y por ende sus consecuencias, que pueden ser de proporciones incalculables.

3.8. Conclusiones del capítulo

- Se demostró mediante el cálculo de las velocidades circunferenciales de las ruedas dentadas y las mediciones de temperatura en el reductor de velocidad, que con el

aceite Reductor 220, actualmente el lubricante empleado en el reductor, no se posibilita la formación de la lubricación hidrodinámica en los pares tribológicos del mismo.

- Se determinó que para los índices de viscosidad recomendados por AGMA (2002), 90, 120, 160 y 240 y temperatura de servicio de 65 °C, se deben emplear aceites con grado de viscosidad 460 o 680 mm²/s.

CONCLUSIONES GENERALES

- Se determinó que para garantizar la lubricación adecuada de los engranajes del reductor de velocidad TT – 850E – CHEVRÓN, es necesario emplear aceites con grado de viscosidad de 680 mm²/s, para índices de viscosidad de 90 y 120; y aceites con grado de viscosidad de 460, para índices de viscosidad de 160 y 240.
- Se demostró considerando los niveles de choques de la máquina motriz y los niveles de choques de la máquina movida, que el aditivo que debe emplearse en el aceite debe ser de extrema presión, del tipo azufre fósforo.
- Se propone que para el aceite suministrado por la compañía CUBALUB, para índice de viscosidad 95, se emplee el aceite Reductor 680, y para los aceites suministrados por la compañía Castrol, se emplee el aceite Alpha SP 680 para índice de viscosidad 95 y el Alphasyn T 460 para índice de viscosidad 160.

RECOMENDACIONES

- Emplear este trabajo como guía para la selección del lubricante del reductor de velocidad modelo TT – 850E – CHEVRÓN perteneciente a la planta secadero de Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.
- Aplicar los resultados obtenidos en la investigación para la lubricación del reductor de velocidad TT – 850E – CHEVRÓN.
- Evaluar un mayor número de propiedades, que permitan diagnosticar con mayor precisión el estado del aceite.
- Extender el estudio para la selección de la viscosidad de reductores, considerando criterios no valorados en la investigación.

BIBLIOGRAFÍA

1. **AGMA** 925-A02, *Effect of Lubrication on Gear Surface Distress*, 2002.
2. **Albarracín, P.** *Fundamentos de la lubricación*. Ejemplar No 05, Vol. 04, *Antioquia* 2005.
3. **Albarracín, P.** *Impacto del desgaste sobre los mecanismos lubricados*, Ingenieros de lubricación, 4(4): mayo, 2006 [en línea] mayo 2006.
4. **Albarracín, P y Pizón, R.** *Cálculo del ahorro de energía por menor fricción*. Universidad Nacional de Colombia, ISSN 0012-7353, Medellín, 2004.
5. **Álvarez, E.** *Tribología, Fricción, Desgaste y Lubricación*, 253pp., Universidad Central de Las Villas (UCLV), monografía, 2002.
6. **Álvarez, E.** *Tribología. Fricción, Desgaste y Lubricación*. Universidad Central de Las Villas (UCLV), Santa Clara, Cuba, 1999.
7. **Aneiros, J.** *Problemas de diseño de elementos de máquina*. La Habana: Enspes, 1983.
8. **ANSI/AGMA** 9005--E02, *Industrial Gear Lubrication*, Published by American Gear Manufactures Association, Alexandria, Virginia 22314, 2002.
9. **Aponte, J y Alonso, H.** *Incidencia de la lubricación en elementos mecánicos en movimiento*, Revista de la Facultad de Ingeniería, Nueva Granada, 1999.
10. **Balagui, S.** *Physicochemical and rheological characterization of gum tragacanth exudates from six species of iranian astragalus*. Journal of Food Biophys. 15(4) 59 71, 2010.
11. **Benlloch María, J.** *Lubricantes y Lubricación Aplicada*. 1984.
12. **Bourbon, A. et al** *Characterization of galactomannans extracted from seeds of gleditsia triacanthos and sophorajaponica through shear and extensional rheology*. Journal of Food Hydrocolloid. 12(4) 184-192, 2010.
13. **BDC International S.A.** *Seminario de rodamientos. Tema Lubricación y montaje*, Moa, 2010.

14. **Castrol.** *Catálogo general de lubricantes.* Madrid. 2012.
15. **Cárdenas, J. y Fonseca E.** *Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiado desde la relación viscosidad y temperatura.* EIA. 12(2) 125-137, 2009.
16. **Chenlo et al.** *Rheological behavior of aqueous systems of tragacanth and guar gums with storage time.* Journal of Food Engineering. 32(6) 107-113, 2010.
17. **Colby, R.** *Structure and linear viscoelasticity of flexible polymer solutions: comparison of polyelectrolyte and neutral polymer solutions.* Journal of Rheological. 24(9) 425-442, 2010.
18. **CUBALUB.** *Manual de Productos; Lubricación.* Vía Blanca y Belot, Refinería Níco López; Regla, Ciudad Habana, Cuba. 2008.
19. **Dobrobolski, V y Zablonski, K.** *Elementos de máquinas.* Moscú, Editorial MIR, 1980.
20. **Delgado, J.** *Sistemas de lubricación a bordo.* Universidad Austral de Chile, Valdivia. Tesis de grado, 2006.
21. **Falk.** *Instrucciones de instalación y mantenimiento,* Milwaukee, 1995.
22. **Farías, J.** *Diseño e implementación de un plan de lubricación para máquinas y equipos.* Guayaquil, Ecuador, 2008.
23. **Ferrer, B.** *Mantenimiento preventivo en reductor de velocidad de grúas indias de extracción de mineral.* Moa: Tesis de grado, 2014.
24. **Garcell, L.** *Composición mineralógica de las suspensiones de limonita de Moa, en períodos de sedimentación normal y crítica. Informe investigativo.* ISPJAM, Facultad de Ingeniería química, 1993.
25. **Gilbert, A..** *Conferencia de lubricación de reductores de velocidad.* Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, 2013.
26. **Góngora, E.** *Modelación del proceso de enfriamiento del mineral laterítico en cilindros horizontales rotatorios.* Moa: Editorial Digital Universitaria, Tesis de doctorado, 2014.

27. **Linares, O.** *Tribología y mantenimiento proactivo, Fundamentos de la lubricación, fricción y el desgaste.* Boletín ASME, EE.UU, 2005.
28. **Malishev, A.** *Tecnología de los metales.* Moscú: Mir, 1975.
29. **Nava, J.** *Teoría de mantenimiento. Definiciones y organización.* Carácas: Producciones editoriales C.A, 2006.
30. **Nikolaev, A.** *Opinión de experto.* Alejandro Nikolaev. Especialidad: Ingeniería en Minas. Profesor Titular, Instituto de Minas de San Petersburgo, Rusia, 2011.
31. **Orellana, J.** *Estudio de la lubricación para el ahorro de recursos en una empresa dedicada a la renta de grúas industriales.* Trabajo de graduación, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2005.
32. **Paul, C.** *Effect of chemical structure on the conduction and breakdown of paraffin oil.* Indian Journal Technological. 8(1) 64-78, 1978.
33. **Peláez, C; Stachenco, E.** *Estudio del efecto del campo magnético en crudos parafínicos por cromatografía de gases de alta resolución.* Ecopetrol-ICP, 1999.
34. **Peña, R.** *Evaluación de la lubricación hidrodinámica en el reductor de velocidad SEC-103 perteneciente a la UBP PREPARACIÓN DE MINERAL de ECG.* Moa: Tesis de grado, 2015.
35. **Pista, A.** *Manual de mantenimiento, ingeniería, gestión y organización.* 1993.
36. **Reshetov, D.** *Elementos de Máquinas.* La Habana. Editorial Pueblo y Educación, 1985.
37. **Reid, C; Sherwood, K.** *The properties of gases and liquids.* Mc. Graw-Hillbook Company, New York, 1966.
38. **Rodríguez, I.** Folleto de transmisiones mecánicas. Moa, 2009
39. **Rodríguez, Y.** *Influencia de la lubricación en la longevidad del rodamiento rígido de bolas 6208 bajo condiciones de trabajo variable.* Moa: Tesis de grado, 2015.
40. **Salgado Báez, E.** *Combustibles, Lubricación y Agua.* Playa, Ciudad de Laabana: Pueblo y Educación. 1978.

41. **Shell.** *Introducción a los lubricantes y a la lubricación.* Madrid, España. 2011.
42. **Shell, T. d.** *Módulo 4. Engranajes.* Madrid, España, 2011.
43. **Soca, J.** *Cálculo de Sistemas de Lubricación.* Universidad autónoma de Chapingo, México, 2009.
44. **Termogram. (s.f.).** *Usando el Análisis de Aceite para el monitoreo de la condición de maquinaria,* 2015.
45. **Trapeznikov, S.** *Fundamentación de los regímenes de temperaturas de trabajo de los oleoductos superficiales en caliente.* Tesis de Doctorado, Instituto de Minas de San Petersburgo, Rusia, 2011.
46. **Vandresen, S. et al.** *Temperature effect on the rheological behavior of carrot juices.* Journal of Food Engineering. 29(3) 269-274, 2009.
47. **Widman.** 2009. *Curva de viscosidad.* [En línea] 2009. [Citado el: 12 de enero de 2014.] <http://www.widman.biz>.
48. **Widman.** 2009. *Viscosidad de reductores.* [En línea] 2009. [Citado el: 12 de enero de 2014.] <http://www.widman.biz>.
49. **Zayas, E; Martínez, J.** *Tecnologías de fabricación y tecnología de máquinas.* Universidad politécnica de Cataluña, Barcelona, 2008.

ANEXOS

Tabla 1. Parámetros técnicos del pirómetro testo 845

Rango de medición °C	-35 a 950 °C
Rango espectral	8 a 14 μm
Precisión °C IR (a + 23 °C) ± 1 dígito:	± 2,5 °C (-35 a -20,1 °C) ± 1,5°C (-20 a 19,9°C) ± 0,75°C (20 a 99,9°C) ± 0,75% de m.v.(100 a 950°C)
Factor de emisión	Ajustable desde 0,1 a 1
Resolución óptica	Campo lejano 75:1 (16 mm, distancia 1,2 m) Primer plano: 1 mm, distancia 0,07 m
Material de la carcasa	ABS negro / gris, tapa metálica
Dimensiones	155 x 58 x 195 mm (LWH)
Peso	465 g
Suministro de voltaje	2 x AA AIMn o vía USB
Duración de la batería	25 h (Sin láser) 10 h (Con láser, sin retroiluminación) 5 h (Con láser y 50% de retroiluminación)
Temperatura de funcionamiento	-20 a 50 °C
Temperatura de almacenamiento	-40 a 70 °C
Garantía	2 años

Tabla 2. Especificaciones técnicas de la cámara termográfica Fluke Ti30

TÉRMICAS	Rango de medición térmica	-10 a 250 °C
	Presición	± 2 % o ± 2 °C (lo que sea mayor)
	Repetibilidad	± 1 % o ± 1 °C (lo que sea mayor)
	Presición de -10 a 0 °C	± 3 °C
	Resolución de indicación de temperatura	0,1 °C
ÓPTICAS	Rango espectral	7 – 14 micras
	Identificación de objetivo	Punto láser sencillo
	Resolución óptica	90:1
	Diámetro mínimo del área medida	Desde 7 a 610 mm
	Velocidad de captura de imagen	20 Hz
CONTROLES	Campo visual (FOV)	17° (Horizontal) x 12,8° (Vertical)
	Enfoque	Desde 610 mm hasta infinito
	Escala de temperatura	°C
	Modos de medición	Seleccionable
	Láser encendido/apagado	✓
	Control de ganancia	✓
	Control de nivel	✓
Iluminación de fondo en pantalla LCD	Seleccionable	

Tabla 2. Especificaciones técnicas de la cámara termográfica Fluke Ti30 (Continuación)

OPERACIONAL	Emisividad ajustable	Desde 0,1 a 1 (incremento de 0,01)
	Temperatura de fondo reflejado	-50 a 460 °C
	Temperatura ambiente de operación	-10 a 50 °C
	Humedad relativa	10 a 90 %sin condensación
	Temperatura de almacenamiento sin baterías	-25 a 70 °C
	Capacidad de almacenamiento	100 imágenes
	Icono de láser encendido	✓
	Icono de batería baja	✓
	Icono de paleta	✓
	Icono de modo de medición	✓
	Software de análisis térmico	InsidIR
	Sistemas operativos para software en PC	Windows XP o inferior a este

Tabla 3. Especificaciones del Vibration Pen CMAS 100 SL SKF

Mediciones	Velocidad	0,7 – 0,65 mm/s
		Frecuencia de 10 a 1000 Hz (ISO 10816)
	Envolvente de aceleración	Rango de 0,2 a 50 gE
		Frecuencia: banda 3 (500 a 10 000 Hz)
	Temperatura	-20 a 200 °C
Precisión infrarroja de ± 2 °C		
Distancia de 10 cm máximo desde el blanco		
Toma de vibraciones	Interna	Aceleración piezoeléctrica integrada
	Externa	Admite acelerómetros de 100 mV/g de tipo ICP™

Tabla 4. Severidad

Severidad de la vibración	Rango límite de velocidad y tipo de máquina ISO 2372			
	Máquinas pequeñas Clase I	Máquinas medianas Clase II	Máquinas más potentes	
			Soporte Rígido Clase III	Soporte flexible Clase IV
0,28				
0,45				
0,71				
1,12				
1,80				
2,80				
4,50				
7,10				
11,2				
18,0				
28,0				
45,0				
71,0				
R.p.m	R.p.m >2000	1000-2000	800-1000	R.p.m <800

Leyenda

- Bueno
- Satisfactorio
- Insatisfactorio