



**Universidad
de Holguín**

FACULTAD
DE INGENIERÍA
DPTO. INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO DEL LUBRICANTE EN MULTIPLICADORAS PERTENECIENTES A LOS AEROGENERADORES G52-850 DEL PARQUE EÓLICO GIBARA 1

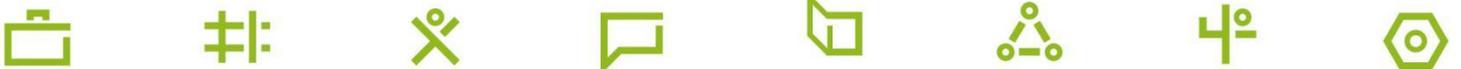
Trabajo de Diploma

AUTOR: José Adrién Hernández Córdova

TUTORES: M. Sc. Pedro Luis Pérez Font

Ing. Alexis Miguel Vega Jiménez

HOLGUÍN, 2021



RESUMEN

El presente estudio se enfoca en la aplicación de la técnica de diagnóstico por análisis de lubricante, en el subsistema multiplicadora de los aerogeneradores del Parque Eólico Gibara 1. El objetivo de este documento será determinar a través del empleo de diferentes pruebas de análisis rápido con el apoyo de ensayos de laboratorio, la condición actual en que se encuentra el lubricante en uso RENOLIN UNISYN CLP 320 y el estado técnico de los elementos internos de la multiplicadora, siendo su desconocimiento el problema de la investigación. Los resultados experimentales arrojaron las siguientes conclusiones: que el lubricante en uso está apto para continuar en servicio, y en cuanto al estado técnico de la máquina se detectaron concentraciones de partículas de desgaste que no superan los límites condenatorios, pero dan indicios y alertan sobre la presencia de un cierto nivel de deterioro en los engranes o rodamientos de la multiplicadora, que pueden estar provocando las constantes alarmas por altas temperaturas en el equipo. El conocimiento de estos factores facilita una correcta planificación relacionada con el mantenimiento y explotación del Parque Eólico de Gibara 1.

Palabras claves: aerogenerador, multiplicadora y análisis de lubricantes.

SUMMARY

This study focuses on the application of the lubricant analysis diagnostic technique in the gearbox subsystem of the Gibara Wind Farm 1 wind turbines. The objective of this document will be to determine through the use of different rapid analysis tests with the support of laboratory tests, the current condition of the RENOLIN UNISYN CLP 320 lubricant in use and the technical state of the internal elements of the gearbox, the research problem being its ignorance. The experimental results yielded the following conclusions: that the lubricant in use is suitable to continue in service, and in terms of the technical state of the machine, concentrations of wear particles were detected that don't exceed the damning limits, but give indications and warn about the presence of a certain level of deterioration in the gears or bearings of the gearbox, which may be causing the constant alarms due to high temperatures in the equipment. Knowledge of these factors facilitates correct planning related to the maintenance and operation of the Gibara Wind Farm 1.

Keywords: wind turbine, gearbox and lubricant analysis.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	5
1.1. Aerogeneradores.	5
1.1.1. Multiplicadoras en aerogeneradores.	8
1.1.2 Fallos en multiplicadoras.	10
1.2 Técnicas de mantenimiento predictivo a emplear en multiplicadoras.	13
1.2.1 Técnicas de análisis de lubricante empleadas en multiplicadoras.....	17
1.3 Investigaciones realizadas a través del análisis de lubricante en multiplicadoras.	25
CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DE LUBRICANTE EN LAS MULTIPLICADORAS DE LOS AEROGENERADORES G52-850 DEL PARQUE EÓLICO GIBARA 1	36
2.1 Caracterización de las multiplicadoras de los aerogeneradores G52-850.	36
2.2 Análisis del lubricante perteneciente a las multiplicadoras Echesa GE850PL.	37
2.2.1 Análisis por crepitación.	38
2.2.2 Análisis de la viscosidad.	38
2.2.3 Análisis de la contaminación a través de la constante dieléctrica.	41
2.2.4 Análisis de la mancha de aceite.....	42
2.3 Análisis del lubricante realizado por la Empresa CUBALUB.	45
2.4 Cálculo de la frecuencia de inspección del análisis de lubricantes.	46
2.5 Valoración económica y ambiental de la propuesta planteada.	50
CONCLUSIONES	52
RECOMENDACIONES	53
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Aerogeneradores según la posición del eje de giro. Fuente: (Moreno, 2007).....	6
Figura 1.2 Aerogeneradores según el número de palas. Fuente: (Mayordomo, 2015).	7
Figura 1.3 Rotor a barlovento (a) y sotavento (b). Fuente: (Leyva, 2017).	7
Figura 1.4 Cajas multiplicadoras de ejes paralelos (a), ejes planetarios (b) y etapas planetarias y ejes paralelos (c). Fuente: (Corral, 2016)	9
Figura 1.5 Horas de paradas en turbinas eólicas del Parque Eólico Palomarejo.	11
Figura 1.6 Degradación y aplastamiento de engranes de una multiplicadora.	11
Figura 1.7 Distribución de cantidad de fallos en multiplicadoras. Fuente: (Pazo, 2017)	12
Figura 1.8 Fallos de la multiplicadora y el generador. Fuente: (Turruellas, 2017)	13
Figura 1.9 Inspección boroscópica en aerogenerador. Fuente: (Garrido, 2018)	14
Figura 1.10 Principio de funcionamiento de la ferrografía. Fuente: (Quintero, 2016)	24
Figura 1.11 Proceso de selección. Fuente: Elaboración propia.....	28
Figura 1.12 Productividad por países. Fuente: Elaboración propia. Tomado de Scopus (TITLE-ABS-KEY ("Wind turbine" OR "wind energy") AND ("ferrography" OR "oil analysis" OR "oil test" OR "lubricant analysis" OR "lubricant test")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar"))).	28
Figura 1.13 Productividad anual. Fuente: Elaboración propia. Tomado de Scopus (TITLE-ABS-KEY ("Wind turbine" OR "wind energy") AND ("ferrography" OR "oil analysis" OR "oil test" OR "lubricant analysis" OR "lubricant test")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar"))).	29
Figura 1.14 Productividad por materia. Fuente: Elaboración propia. Tomado de Scopus (TITLE-ABS-KEY ("Wind turbine" OR "wind energy") AND ("ferrography" OR "oil analysis" OR "oil test" OR "lubricant analysis" OR "lubricant test")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar"))).	30
Figura 2.1 Muestras de aceite nuevo (a) y usado (b). Fuente: Elaboración propia	37
Figura 2.2 Prueba de viscosidad, aceite nuevo. Fuente: Elaboración propia.....	40
Figura 2.3 Prueba de viscosidad, aceite usado. Fuente: Elaboración propia.....	40
Figura 2.4 Prueba de análisis de la contaminación, aceite nuevo y usado (2).	42
Figura 2.5 Estructura típica de una mancha. Fuente: (Heras, 2017)	43
Figura 2.6 Prueba de la mancha a 20 °C, aceite nuevo (a) y usado (b). Fuente: Elaboración propia	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Grupo de palabras claves. Fuente: Elaboración propia.....	26
Tabla 1.2 Estrategias o ecuaciones de búsqueda. Fuente: Elaboración propia	26
Tabla 1.3 Investigaciones relacionadas con el análisis de lubricante en multiplicadoras. Fuente: Elaboración propia.....	31
Tabla 1.3 Investigaciones relacionadas con el análisis de lubricante en multiplicadoras. Fuente: Elaboración propia (Continuación).....	32
Tabla 1.3 Investigaciones relacionadas con el análisis de lubricante en multiplicadoras. Fuente: Elaboración propia (Continuación).....	33
Tabla 1.3 Investigaciones relacionadas con el análisis de lubricante en multiplicadoras. Fuente: Elaboración propia (Continuación).....	34
Tabla 2.1 Propiedades del lubricante. Fuente: FUCHS LUBRICANTES (2011).....	36
Tabla 2.2 Indicadores de costo en CUP (Peso cubano) y USD (Dólar americano).	48

INTRODUCCIÓN

Como consecuencia de la disminución de los recursos naturales, del encarecimiento de las materias primas y de los efectos derivados de la sobreexplotación de los recursos energéticos entre otros, el denominado efecto invernadero cada vez más latente, se sigue produciendo una creciente demanda de energías alternativas entre las cuales se destaca, por su importancia actual la energía eólica. (Ramos, 2016)

La energía eólica ha sido usada a través de los siglos tanto para la navegación como para mover ruedas que accionan mecanismos, que a su vez muelen los granos y permiten la extracción de agua. Actualmente los modernos generadores eólicos se emplean para transformar la energía cinética del viento en energía eléctrica. (Castillo, 2017)

La generación eólica, como fuente de energía confiable y libre de emisión de gases, se ha convertido en la tecnología renovable de más rápido crecimiento, la cual proyectó una generación de electricidad global del 11 % en 2012 al 19 % en 2020 y se pronostica un incremento del 23 % para 2040, que impulse el rumbo hacia un futuro de energía limpia, plenamente competitiva y como solución sostenible, desde el punto de vista ambiental y económico. (Singh, Kurien, & Villayamore, 2020)

La instalación de aerogeneradores en el mundo continúa su proceso de desarrollo ascendente cada día, al ser una respuesta a la gran demanda del consumo energético mundial, la necesidad de garantizar la continuidad del suministro en zonas importadoras netas de recursos energéticos y de la búsqueda de la sostenibilidad en el uso de los recursos. (Leyva, 2017)

En Cuba, con el surgimiento de la llamada Revolución Energética por iniciativa del comandante Fidel Castro Ruz, se comenzaron a ejecutar un gran número de inversiones aprobadas por el Estado, entre ellas, potenciar el crecimiento de las fuentes de energía eólica. En el municipio Gibara, provincia Holguín, se evidenciaron estas inversiones con la construcción de parques eólicos, debido al potencial del viento en esta zona costera, y con el objetivo de incrementar la producción de energía y asumir así la demanda eléctrica del municipio y parte de la del país. (Ramírez, 2015)

Uno de los primeros pasos que se dieron, para aportar esta energía limpia al Sistema Electroenergético Nacional (SEN) fue el montaje y puesta en marcha a partir del 2008 del Parque Eólico Gibara 1, segundo de la Revolución Energética y tercero instalado en el país. Ubicado específicamente en la zona costera del municipio Gibara, el mismo está constituido por 6 aerogeneradores del tipo G52-850 kW, fabricados por la firma española

GAMESA Eólica, cuyas torres poseen una altura de 55 metros, separadas a 150 metros uno del otro, cuentan con una potencia total instalada de 5,1 MW, una potencia nominal de 850 kW cada uno y diseñados para un tiempo de vida útil de 20 años. (Castillo, 2017)

Se estima que el Parque Eólico Gibara 1, según los valores de velocidad de los vientos medidos en la zona, llega a alcanzar el factor de capacidad de 28 % del consumo promedio del municipio de Gibara ó 26 % de la generación promedio de un día del SEN, evitando consumir cada año unas 2,884 toneladas de combustible fósiles (7,9 ton/día) y emitir 11,248 toneladas de CO₂ y de otros gases a la atmósfera. (Sambert, 2011)

La confiabilidad y disponibilidad de los aerogeneradores depende en gran medida del buen funcionamiento de sus subconjuntos del tren de transmisión, como son las multiplicadoras, considerado uno de los equipos más críticos y que experimentan un mayor tiempo de inactividad debido a sus altos costes de reparación y mantenimiento, y al tratarse de un sistema de engranajes y multiplicación de velocidad con contacto metal-metal que necesita estar constantemente lubricado.

En cuanto a dicha lubricación, el análisis de aceite es una de las técnicas de vital importancia para la detección temprana de fallas y para lograr la máxima vida útil de estas maquinarias, pues no solo permite diagnosticar el estado en que se encuentra un lubricante, es decir, para saber si es necesario proceder o no a su sustitución, sino que facilita mucha información respecto a la condición del equipo, además de proporcionar advertencias aproximadamente 10 veces más anticipadas que otras técnicas de diagnóstico como vibraciones, ultrasonido o termografía.

Las cajas de engranajes instaladas en el Parque Eólico Gibara 1, utilizan en su flujo de lubricación interno el aceite sintético RENOLIN UNISYN CLP 320 formulado a base de polialfaolefinas (PAO), para el cual se establece una fecha de reemplazo cada 36 meses, pero únicamente cuando el análisis de la muestra lo aprueba e indica oportuno. Al no contar hasta el momento con este tipo de tecnología en la instalación eólica, se pierde y pasa por alto gran cantidad de datos valiosos que dificultan la labor de un mantenimiento eficiente.

Situación problemática:

Durante los 12 años de generación de este parque, se han venido produciendo diversas fallas en el subsistema multiplicadora, debido a constantes alarmas de temperaturas relacionadas con el aceite y rodamiento de alta velocidad, así como las averías ocurridas

en ellas y la ausencia de revisiones generales, que indican un mal funcionamiento de las mismas y alertan la presencia de fallos ocultos.

Debido a la carencia y aplicación de técnicas de diagnóstico como el análisis de lubricante en las multiplicadoras, no se han encontrado hasta la fecha evidencias de posibles roturas en los engranes y rodamientos internos de esta, lo cual ha provocado que se produzcan paradas no planificadas que afectan la eficiencia del parque, la producción de energía eléctrica y la economía del país.

Problema de investigación:

Se desconoce la condición actual del lubricante en uso y el estado técnico de los elementos mecánicos que componen la multiplicadora perteneciente a los aerogeneradores del Parque Eólico Gibara 1.

Objeto de estudio:

Multiplicadoras pertenecientes a los aerogeneradores del Parque Eólico Gibara 1.

Campo de acción:

Análisis de lubricantes en las multiplicadoras pertenecientes a los aerogeneradores del Parque Eólico Gibara 1.

Objetivo general:

Conocer la condición del lubricante en uso y el estado técnico de los elementos mecánicos que componen la multiplicadora perteneciente a los aerogeneradores del Parque Eólico Gibara 1.

Hipótesis:

El análisis de lubricantes, permitirá conocer la condición del lubricante en uso y el estado técnico de los elementos mecánicos que componen la multiplicadora perteneciente a los aerogeneradores del Parque Eólico Gibara 1.

Tareas de investigación:

- Realizar una búsqueda bibliográfica y fundamentación teórica del problema a estudiar.
- Caracterizar las multiplicadoras pertenecientes a los aerogeneradores del Parque Eólico Gibara 1.
- Analizar las técnicas de lubricantes a emplear en multiplicadoras.
- Realizar los análisis de lubricantes en las multiplicadoras pertenecientes a los aerogeneradores del Parque Eólico Gibara 1.
- Calcular la frecuencia de inspección del lubricante analizado.

- Elaborar el informe final.

Métodos de investigación:

Dentro de los métodos de investigación utilizados se destacan los siguientes:

Empíricos:

- Consultas con expertos: Permite tener en cuenta opiniones, criterios y sugerencias de ingenieros y técnicos del mantenimiento.
- Observación científica: Se verificaron las condiciones físicas reales de trabajo y explotación del Parque Eólico Gibara 1.
- Revisión de documentos: Permite realizar la caracterización del objeto de estudio.
- Experimental: Se logrará la obtención de información válida que permita cuantificar los resultados obtenidos en las pruebas realizadas al lubricante.

Teóricos:

- Histórico–lógico: Facilita conocer la evaluación y desarrollo del objeto de la investigación y llegar a un análisis lógico.
- Análisis y síntesis: Para el procesamiento de la información teórica recopilada, elaborar el fundamento teórico y las condiciones de la investigación.
- Hipotético–deductivo: Para proponer la hipótesis a partir del conjunto de datos y conocimientos generales iniciales que se tienen arribando a conclusiones primarias, a partir de dicha hipótesis que luego pueden ser comprobadas durante el desarrollo del trabajo.

Resultados esperados:

En el desarrollo del trabajo de investigación se espera determinar la condición del lubricante en uso y el estado técnico de los elementos que componen la multiplicadora perteneciente a los aerogeneradores del Parque Eólico Gibara 1.

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1.1. Aerogeneradores.

Según Montoya (2011), un generador eólico es una máquina capaz de transformar la energía cinética del viento en energía mecánica, según el uso que se le dará a esa energía mecánica, se pueden dividir en dos tipos: los aerogeneradores que utilizan esa energía mecánica para el accionamiento de un generador eléctrico y así generar electricidad, o los aeromotores que utilizan directamente esa energía mecánica para el accionamiento de una máquina.

“Una turbina eólica transforma la energía cinética del viento en energía eléctrica sin usar combustible, pasando por el estado intermedio de conversión a energía mecánica de rotación a través de las palas” (Carreras, 2017).

Un aerogenerador es un generador eléctrico movido por una turbina accionada por el viento. Sus precedentes directos son los molinos de viento que se empleaban para la molienda y obtención de harina. En este caso, la energía eólica, en realidad la energía cinética del aire, proporciona energía mecánica a un rotor hélice que, a través de un sistema de transmisión mecánico, hace girar el rotor de un generador que convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica. (Font, 2017)

Los aerogeneradores pueden clasificarse según varios criterios, entre los más habituales se destacan los siguientes:

Según Sainz (2019), los aerogeneradores se clasifican según la posición del eje de giro, de la siguiente manera:

- Turbinas eólicas de eje vertical (figura 1.1 a): tienen la ventaja fundamental de que no precisan ningún sistema de orientación activo para captar la energía contenida en el viento. Presentan la ventaja añadida, con respecto a las turbinas de eje horizontal, de disponer el tren de potencia, el generador eléctrico y los sistemas de control a nivel del suelo.
- Turbinas eólicas de eje horizontal (figura 1.1 b): en este caso los rotores se caracterizan por hacer girar sus palas en dirección perpendicular a la velocidad del viento incidente. La velocidad de giro de las turbinas de eje horizontal sigue una relación inversa al número de sus palas, de forma más precisa al parámetro denominado solidez, que indica el cociente entre la superficie ocupada por las palas y la superficie barrida por ellas.

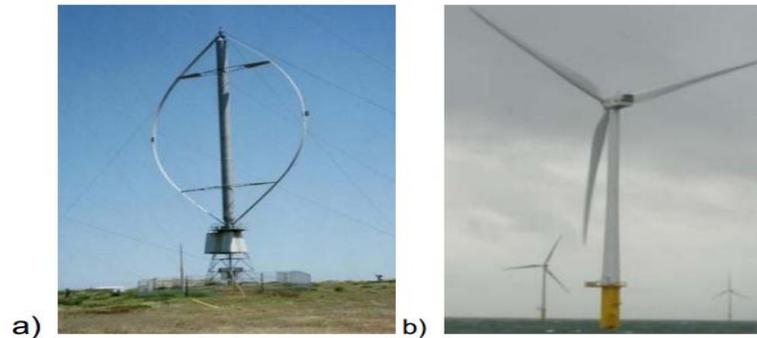


Figura 1.1 Aerogeneradores según la posición del eje de giro. Fuente: (Moreno, 2007)

En su investigación Ruano (2005), plantea que en la actualidad, la tendencia general es el empleo de aerogeneradores de eje horizontal, para el cual, el autor deja plasmado sus clasificaciones atendiendo al número de palas.

- Aerogeneradores tripalas: poseen tres aspas, la mayoría de los aerogeneradores modernos cuentan con este tipo de diseño se le suele llamar el clásico "concepto danés", mantenido en la posición corriente arriba y usando motores eléctricos en sus mecanismos de orientación. La gran mayoría de las turbinas vendidas en los mercados mundiales poseen este diseño.
- Aerogeneradores bipala: poseen dos palas, tienen la ventaja de ahorrar el coste de una pala y, por supuesto, su peso. Sin embargo, suelen tener dificultades porque necesitan una mayor velocidad de giro para producir la misma energía de salida. Esto supone una desventaja tanto en lo que respecta al ruido como al aspecto visual.
- Aerogeneradores monopala: poseen una pala, por lo que precisan de un contrapeso en el otro extremo para equilibrar. La velocidad de giro es muy elevada. Su gran inconveniente es que introducen en el eje esfuerzos muy variables, lo que acorta la vida útil del equipo.

Ares (2016), asegura que dentro de los rotores tipo hélice los más utilizados son los de tres palas, debido a su mejor estabilidad estructural y aerodinámica, menor emisión de ruido y mayor rendimiento energético frente a los rotores de una o dos palas.

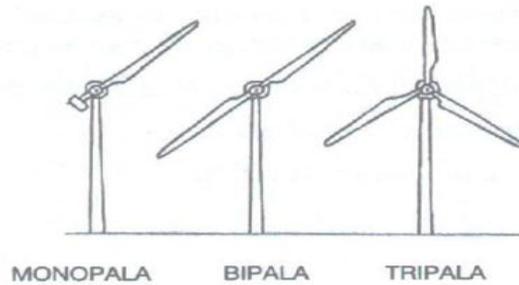


Figura 1.2 Aerogeneradores según el número de palas. Fuente: (Mayordomo, 2015).

Cárcamo (2010), refiere que los aerogeneradores de eje horizontal atendiendo a la situación del rotor se clasifican de la siguiente manera:

- Con rotor a barlovento: Las máquinas con rotor a barlovento (figura 1.3 a) tienen el rotor de cara al viento. La principal ventaja de los diseños corriente arriba es que se evita el abrigo del viento tras la torre y la gran mayoría de los aerogeneradores tienen este diseño. Por otro lado, también hay algo de abrigo enfrente de la torre, es decir, el viento empieza a desviarse de la torre antes de alcanzarla, incluso si la torre es redonda y lisa. Así pues, cada vez que el rotor pasa por la torre, la potencia del aerogenerador cae ligeramente.
- Con rotor a sotavento: Las máquinas con rotor a sotavento (figura 1.3 b) tiene el rotor situado en la parte trasera de la torre. La ventaja teórica que tienen es que pueden ser construidos sin un mecanismo de orientación, si el rotor y la góndola tienen un diseño apropiado que hace que la góndola siga al viento pasivamente. Otra ventaja más importante es que el rotor puede hacerse más flexible. Esto supone una ventaja tanto en cuestión de peso como de dinámica estructural de la máquina, es decir, las palas se curvarán a altas velocidades del viento, con lo que le quitarán parte de la carga a la torre.

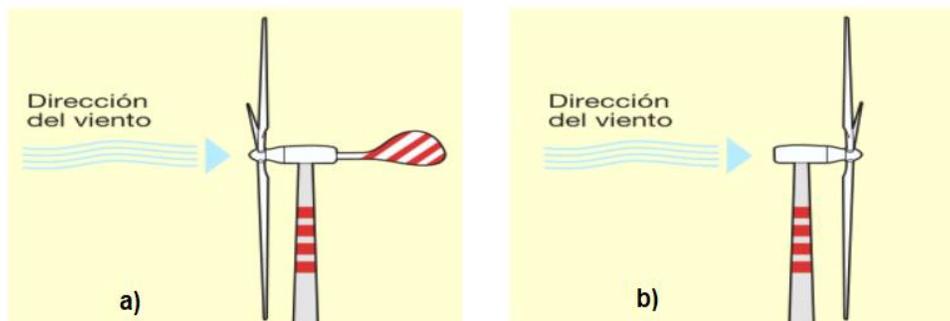


Figura 1.3 Rotor a barlovento (a) y sotavento (b). Fuente: (Leyva, 2017).

En su tesis Turruellas (2017), señala que los aerogeneradores varían en cuanto a sus características y eficiencia, por lo que a continuación se resumen las clasificaciones según la potencia eléctrica que pueden generar:

- Aerogeneradores pequeños: son constituidos por una potencia inferior a los 30 kW. Los principales fabricantes de estos equipos están en EE.UU y ocupan en el mercado mundial aproximadamente el 30 %.
- Aerogeneradores de tamaño medio: es el sector más avanzado y amplio donde se involucran la mayor parte de las instalaciones conectadas a la red. Su potencia está entre (30 y 600) kW. En este tipo de máquinas son los fabricantes europeos los que dominan el mercado.
- Aerogeneradores grandes: su potencia está por encima de 1 MW y representan los de tecnologías más avanzadas en el mundo.

A partir de las clasificaciones anteriores, el diplomante concluye que los aerogeneradores GAMESA G52-850 kW dependiendo del tipo de rotor eólico y la disposición de su eje de giro se clasifica como una turbina con rotor de eje horizontal, según el número de palas es un diseño tripala, con el rotor a barlovento y según la potencia eléctrica que genera es un aerogenerador de tamaño medio.

1.1.1. Multiplicadoras en aerogeneradores.

En su trabajo de maestría Ruiz (2018) expone que las multiplicadoras son un mecanismo de transmisión de potencia desde velocidades lenta de 25 min^{-1} hasta velocidades más rápida de $1\ 500 \text{ min}^{-1}$ conectado al generador. La multiplicadora esta compactada y cerrada con su propio sistema de lubricación interno, por inmersión, barboteo y presión. La potencia se transmite a través de varios trenes de engranajes cilíndricos de construcción robusta, todos ellos cementados y rectificadas, lo suficientemente dimensionados para evitar flexiones o cualquier otro tipo de deformaciones. Los ejes están apoyados sobre rodamientos de primera calidad, altamente dimensionados para soportar, tanto la carga de los engranajes, como las velocidades de marcha. Todos los elementos están insertados en una carcasa de construcción robusta e indeformable.

La multiplicadora tiene la misión de aumentar la velocidad de rotación del rotor, para adaptarla a los valores requeridos por los generadores. Está constituido por una o varias parejas de engranajes de tipo helicoidales. Es una fuente de ruido y uno de los

componentes con mayores pérdidas de eficiencia del aerogenerador que requiere de un plan de mantenimiento bien concebido. (Robles, 2017)

En su documento OPEXenergy (2015) presenta las funciones que cumple una multiplicadora en el aerogenerador:

- Transmitir la potencia de giro del rotor al generador para producir energía.
- Convierte el par de fuerza del rotor en aumento de las revoluciones.
- Multiplica las revoluciones dependiendo del diámetro de rotor. Mayor diámetro de rotor igual a mayor radio de transformación.
- Adaptación evolutiva a la demanda.

Según Corral (2016) dependiendo de los requerimientos de explotación para un aerogenerador, hoy en día se pueden encontrar en el mercado tres tipos de multiplicadoras fundamentales:

1. Multiplicadoras de ejes paralelos (con una o varias etapas): Se utilizan para aerogeneradores de pequeña y mediana potencia, es decir, para potencias menores de 500 kW.
2. Multiplicadoras de ejes planetarios (con una o varias etapas): Se utilizan para aerogeneradores de potencias altas; las cuales son más resistentes y tienen un peso menor, por lo que son las más empleadas.
3. Multiplicadoras mixtas (con etapas planetarias y ejes paralelos): Son las más frecuentes para aerogeneradores de gran potencia y se utilizan cuando no se quieren tener los ejes alineados.

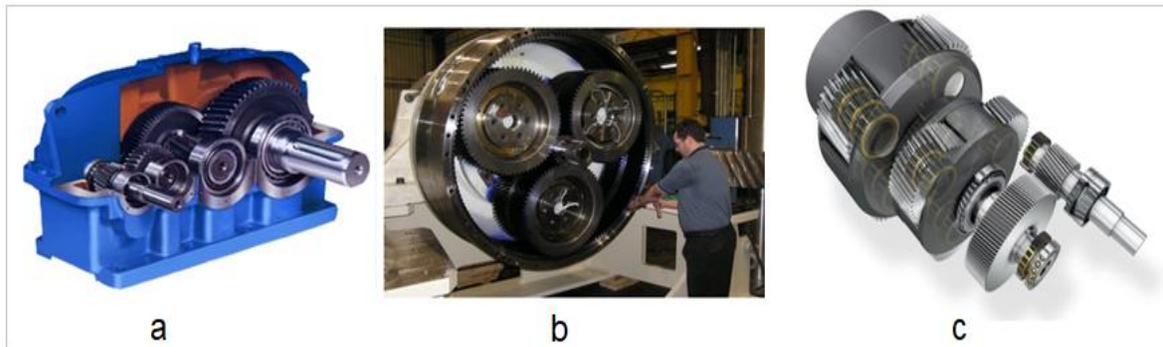


Figura 1.4 Cajas multiplicadoras de ejes paralelos (a), ejes planetarios (b) y etapas planetarias y ejes paralelos (c). Fuente: (Corral, 2016)

El diplomante manifiesta que las multiplicadoras instaladas en los aerogeneradores GAMESA del Parque Eólico Gibara 1, se componen de tres etapas combinadas: una planetaria y dos de ejes paralelos, las cuales entran dentro del grupo de la figura 1.4 c.

1.1.2 Fallos en multiplicadoras.

Primeramente definimos falla como: el deterioro o desperfecto en las instalaciones, máquinas o equipos que no permiten su normal funcionamiento.

Estas se pueden clasificar en función de:

1. La capacidad de trabajo.

- Fallas parciales: son aquellas que ponen fuera de servicio a una parte del equipo.
- Fallas totales o averías: son aquellas que ponen fuera de servicio a todo el equipo.

2. La forma de aparecer el problema.

- Fallas repentinas: aparecen sin mediar un evento que pudiera anunciar la aparición de la falla, están asociadas a roturas de piezas o componentes de la instalación antes de lo previsto, o a una suma de circunstancias que no se pueden predecir.
- Fallas progresivas: tienen generalmente su origen en el desgaste paulatino de algún elemento, en la abrasión, falta de ajuste, entre otros. Originan muchas señales antes de producirse, avisan de la proximidad de una avería y con un seguimiento se pueden determinar con mucha exactitud el momento en que se producirá el desperfecto.

Un gran porcentaje de las fallas que ocurren en una turbina eólica se localiza en el subsistema multiplicadora, que para muchos autores es posiblemente, hoy por hoy, el elemento más crítico de una turbina eólica. Estas fallas pueden tener su origen por diversos factores.

En su proyecto de tesis Pariente (2016), expone una lista de todas las incidencias de fallas registradas en las multiplicadoras de los parques eólicos de Palomarejo, La Tella y Resko de Sevilla (España) en los años 2013, 2014 y 2015:

- 1 - Alta temperatura, aceite multiplicadora.
- 2 - Baja presión, multiplicadora.
- 3 - Bajo nivel aceite multiplicadora.
- 4 - Fuga aceite multiplicadora.

En la figura 1.5, Pariente detalla mediante datos reales la cantidad de horas de paradas que han tenido lugar en el parque de Palomarejo durante sus tres años de funcionamiento, debidos a problemas mecánicos, más concretamente por fallos en la multiplicadora, que en total suman casi 100 horas, entre los cuales, los más acusados son debido a una alta temperatura del aceite y una baja presión de éste.

El parque cuenta con 15 aerogeneradores G90-2.0 MW de la marca GAMESA, lo que da una potencia al parque de 30 MW y poseen además rotor tripala a barlovento.

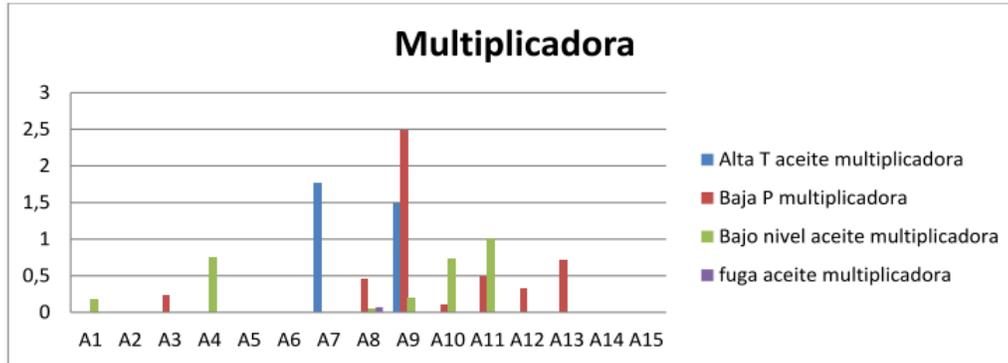


Figura 1.5 Horas de paradas en turbinas eólicas del Parque Eólico Palomarejo.

Fuente: (Pariente, 2016)

En los estudios realizados por Mayordomo (2015) se declara que las principales fallas que se pueden dar en la multiplicadora están relacionadas con la degradación y rotura de las ruedas dentadas y los piñones, con los rodamientos por falta de lubricación, principalmente, o porque se han introducido objetos extraños que han provocados daños y desgaste. También pueden ser provocadas por fatiga por flexión, fatiga por contacto o por deformación plástica, además de fallas muy comunes, debidas a la degradación del aceite: retenes dañados, mal conexionado en refrigeración hidráulica y filtros.

En la figura 1.6, Mayordomo muestra el estado de degradación y aplastamiento de las ruedas dentadas de una caja multiplicadora del Parque Eólico de Oncala, Valladolid.



Figura 1.6 Degradación y aplastamiento de engranes de una multiplicadora.

Fuente: (Mayordomo, 2015)

Pazo (2017), representa mediante bases de datos recopiladas desde el año 2009, los modos de falla más frecuentes de los componentes de una multiplicadora, cuyo historial proviene de aproximadamente 20 compañías, entre las que se incluyen: fabricantes de turbinas y multiplicadoras, propietarios, talleres de reparación de multiplicadoras y

proveedores de operación y mantenimiento de turbinas, las cuales contiene información (a la fecha del informe) de 289 fallas de multiplicadoras, con 257 registros de daños. Estos registros muestran que el 70 % de las fallas están asociadas a rodamientos, 26 % a engranes y 4 % a otros elementos, según se indica (aún en mayor detalle) en la figura 1.7.

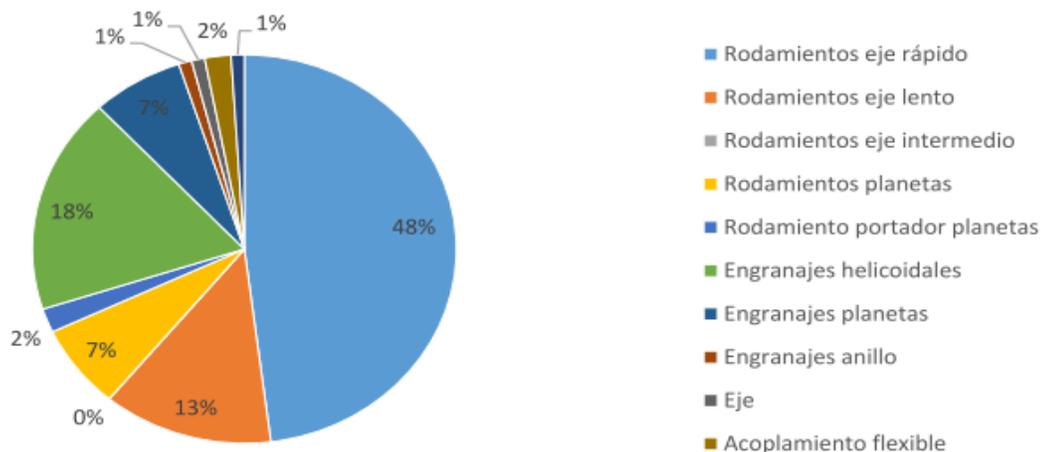


Figura 1.7 Distribución de cantidad de fallos en multiplicadoras. Fuente: (Pazo, 2017)

Nie and Wang (2013), aseguran que según una serie de encuestas de parques eólicos en Europa y América, las cajas de engranajes son, por mucho, el subsistema más responsable del tiempo de inactividad de las turbinas eólicas y de su alto costo de operación y mantenimiento, pues éstas, por su complejidad implican generalmente del uso de grúas y mecanismos de elevación, así como equipos de servicio para realizar revisiones y remplazo de componentes defectuosos.

Las fallas más comunes que se observan en las cajas de engranajes son: daños en los engranajes y cojinetes por presencia de desgaste abrasivo, picaduras, raspaduras, erosión, grietas, roturas y astillas, fugas de aceite, rotura de eje y alta temperatura del aceite.

Turruellas (2017), muestra el porcentaje de fallos relacionados con las multiplicadoras del Parque Eólico Gibara 2, el cual cuenta con seis aerogeneradores modelo S50/750 de la marca china Goldwind.

Los fallos en el subsistema multiplicadora se comportaron de la siguiente forma: el 53 % fueron altas temperaturas del rodamiento de la multiplicadora y un 9 % baja presión de aceite, el otro 38 % se debieron a altas temperaturas del rodamiento del generador, ver figura 1.8.

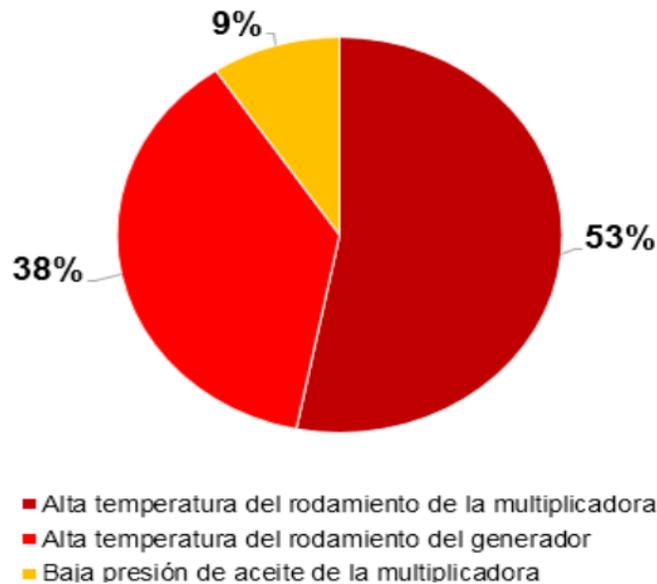


Figura 1.8 Fallos de la multiplicadora y el generador. Fuente: (Turruellas, 2017)

Por lo expuesto anteriormente el diplomante destaca que la presencia de diversas fallas en las multiplicadoras, provocan paradas imprevistas en los aerogeneradores y en muchos casos se hace más largo su tiempo de indisponibilidad con respecto a otros componentes, a causa de su complejidad y de la necesidad de equipamientos, como el caso de grúas, para realizar revisiones o desmontajes a tierra.

1.2 Técnicas de mantenimiento predictivo a emplear en multiplicadoras.

En el mundo del mantenimiento predictivo, mayormente conocido como mantenimiento basado en condición, al día de hoy se vienen utilizando una gran cantidad de técnicas de diagnóstico que son de gran utilidad para la detección y predicción de fallas en los equipos. A continuación, se citan las técnicas más empleadas en multiplicadoras.

Boroscopía

Una boroscopía (ver figura 1.9) es una inspección visual que se realiza con la ayuda de un boroscopio. Se utiliza para la observación de superficies en elementos internos, cuya observación con los ojos supondría tener que llevar a cabo complejos desmontajes, a veces imposibles. Muy utilizada en el campo de la medicina para la observación directa de órganos internos, donde la técnica recibe el nombre de endoscopia.

Además, tiene diversas aplicaciones en el mundo industrial como: la observación interna de turbinas de gas y de vapor, bombas centrífugas, válvulas, intercambiadores de carcasa y tubos, tuberías y por supuesto en las multiplicadoras empleadas en aerogeneradores. (Garrido, 2018)



Figura 1.9 Inspección boroscópica en aerogenerador. Fuente: (Garrido, 2018)

En la revista del Instituto RENOVETEC de Ingeniería del Mantenimiento (IRIM, 2015b) se plantea que las inspecciones boroscópicas son observaciones visuales que se realizan en cavidades inaccesibles para el ojo humano con la ayuda de un equipo óptico, el boroscopio.

Es una técnica de mantenimiento imprescindible para acometer trabajos de inspección en las partes internas de la multiplicadora sin necesidad de realizar grandes desmontes y que en el caso de una multiplicadora, se trata de diagnosticar en qué estado se encuentran las superficies de los rodamientos y de los engranajes, así como cualquier otro defecto como el estado del aceite, la aparición de partículas extrañas u otros daños que pueden ser detectables de forma óptica.

Puerta (2019), alega que, a través de este instrumento, el técnico de mantenimiento o el boroscopista es capaz de visualizar internamente la multiplicadora e inspeccionar las caras de contacto de los dientes de los engranajes, así como también las pistas, las jaulas y los elementos rodantes de los rodamientos, verificar si no presentan algunas de las fallas que comúnmente se observan en los engranajes y rodamientos como el *pitting*, *micropitting*, *spalling*, *fluting*, *white etching area cracking*, entre otros.

El investigador concluye que en el Parque Eólico Gibara 1, no se cuenta con el equipamiento y capacitación necesaria para realizar inspecciones boroscópicas.

Análisis de vibraciones

“Esta técnica de mantenimiento predictivo se basa en el estudio del funcionamiento y análisis de las máquinas rotativas a través del comportamiento de sus espectros de vibraciones” (Olarde, Botero, & Cañon, 2010).

Técnica que permite identificar problemas en el generador y en la multiplicadora. Por razones de seguridad no deben realizarse análisis de vibraciones con el aerogenerador en marcha, por lo que resulta muy conveniente la instalación de instrumentación on-line conectada a un sistema específico, como el caso de sensores con obtención de datos en tiempo real. (Fraguela, 2018)

En su documento Trujillo (2016), afirma que los problemas que típicamente pueden ser detectados y corregidos con un eficiente programa de análisis de vibración incluyen:

- Desalineamiento.
- Desbalance.
- Resonancia.
- Solturas mecánicas.
- Rodamientos dañados.
- Problemas en bombas.
- Anormalidades en engranes.
- Problemas eléctricos asociados con motores.
- Problemas de bandas.

El Parque Eólico Gibara 1, cuenta con sensores de vibraciones (acelerómetros) instalados para darles seguimiento vía on-line, sin embargo, desde su montaje y puesta en marcha en el año 2008, estos dispositivos han estado desconectado del sistema de control por cuestiones de seguridad nacional, lo cual restringe el registro y prevención de fallas.

Análisis de lubricantes

El análisis de lubricantes consiste en una serie de pruebas de laboratorio que se usan para evaluar la condición de los lubricantes usados, los residuos y contaminantes que están presentes, para luego elaborar un diagnóstico sobre la condición de desgaste del equipo. (Estupiñan & Saavedra, 2012)

Altmann (2005), apunta en su informe investigativo que:

El análisis de aceite es una técnica simple, que realizando medidas de algunas propiedades físicas y químicas proporciona información con respecto a sus tres categorías:

- La salud del lubricante.
- Contaminación del lubricante.
- Desgaste de la maquinaria.

Los aceites sufren un mecanismo de envejecimiento natural que va alterando sus propiedades físicas: la densidad, la viscosidad, y las propiedades químicas, que disminuye su vida útil, a través los siguientes mecanismos:

- Oxidación.
- Polimerización.
- Ruptura.
- Evaporación.

Los fabricantes de equipos recomiendan planes de mantenimiento que incluyen cambios de lubricantes a intervalos fijos, llevando a un costoso mantenimiento, pues sustituyen lubricantes todavía aptos para el uso, por tanto, el análisis de aceite no sólo va a permitir monitorear el estado de desgaste de los equipos, detectar fallas incipientes, sino también establecer un programa de lubricación basado en condición.

Chaudri and Martínez (2015), afirma que los análisis de lubricantes proveen a los grupos de mantenimiento de valiosa información respecto del proceso de lubricación, indican principalmente el estado del aceite y soportan en repetidas ocasiones la decisión de continuar buscando o no un lubricante nuevo. Además, con un cuidadoso manejo y un completo historial, pueden entregar información del estado de los componentes mecánicos y apoyar estrategias de mantenimiento predictivo.

Para tal efecto, Camacho and Álvarez (2016) declaran que es importante que la muestra de lubricante a analizar sea representativa y extraída del equipo en las condiciones normales de operación (con el aceite en circulación y caliente) o inmediatamente después de haber parado la máquina. No deben extraerse muestras en frío y deberán tomarse las cantidades necesarias y etiquetarlas con el mayor número posible de datos de su origen.

En paralelo con lo expuesto anteriormente por Camacho y Álvarez, el tutor y especialista de la Empresa de Lubricantes (CUBALUB) de La Habana, ingeniero Alexis Vega Jiménez, comenta que las cantidades necesarias de una toma de muestra de aceite lubricante a analizar generalmente rondan entre los 100 mL y 1 L, y las mismas deben ser enviadas a ensayar antes de las 72 horas y en envases bien sellados con toda su información pertinente.

En el artículo IRIM (2015a), se afirma que el análisis de aceite es una de las técnicas de diagnóstico más útiles, precisas y prácticas empleadas para conocer el estado en que se encuentran determinados componentes de un aerogenerador y de la subestación en la que vuelca la energía el parque eólico.

La lubricación está detrás del 70 % de las averías que sufren determinados componentes del aerogenerador, como la multiplicadora. Un correcto análisis de lubricantes y una apropiada interpretación de los resultados pueden ahorrar mucho dinero en averías y en pérdidas de producción, gracias a la detección temprana de problemas en dichos componentes.

El Parque Eólico Gibara 1 no cuenta con los equipos y especialistas para realizar análisis de aceite y además, no se han encontrado evidencias de investigaciones o inspecciones relacionadas con la aplicación de esta técnica en aerogeneradores de Cuba.

1.2.1 Técnicas de análisis de lubricante empleadas en multiplicadoras.

El uso del análisis de aceite se ha hecho casi imprescindible al día de hoy, por su gran importancia como herramienta de diagnóstico en el mantenimiento de máquinas y equipos. Según Benlloch (1991), los métodos de diagnóstico tradicionales que se emplean para realizar un análisis de lubricante se dividen en tres grandes grupos:

- 1- Método rápido (análisis en el sitio).
- 2- Método clásico (análisis fuera del sitio).
- 3- Método complejo (análisis fuera del sitio).

Técnicas del método rápido.

Tiene como objetivo conocer de forma cualitativa el estado del aceite, teniendo en cuenta la degradación y contaminación del mismo para determinar la posibilidad de continuar o no con su uso, hasta el próximo servicio de mantenimiento, además sirve para realizar un diagnóstico subjetivo del agregado (anomalías funcionales a través del contenido de agua, carbón, combustible, entre otras).

Este método es recomendado para ser usado en campo (taller, planta de diagnóstico, o a pie de obra) debido a los importantes síntomas que mide (viscosidad, acidez, detergencia, agua, carbón, entre otros), a su facilidad de aplicación, versatilidad y economía.

Por lo tanto, no requiere de laboratorio o de personal calificado, equipos costosos, ni de mucho tiempo para realizar el diagnóstico. Sus resultados son cualitativos tanto para el aceite como para el agregado. (Borjas & Pérez, 2016)

El investigador afirma en correspondencia con lo planteado anteriormente, que actualmente existen equipos para análisis rápido que no precisan de un gran volumen de muestras y permiten disponer de minilaboratorios y maletas portátiles en la propia planta, para conocer en minutos o pocas horas, características del aceite a través de las siguientes técnicas:

I. La subjetiva: Emplea solamente como recurso la experiencia del hombre y sus sentidos, donde éste, determina el estado técnico del aceite por el color, olor, entre otras.

Inspección de olor y color: Esta puede decir mucho acerca de las condiciones del lubricante y de la máquina, pues analizando la apariencia de la muestra, es decir, si la misma está clara o turbia, esta puede dar indicio de contaminación y presencia de partículas sólidas suspendidas, confirmando la contaminación del producto.

El principal significado del color es indicar cambios con el tiempo, un oscurecimiento notable de la muestra en períodos de tiempo cortos indica contaminación o comienzo de la oxidación del aceite. Un oscurecimiento sin ningún cambio en la acidez o la viscosidad usualmente indica contaminación por material externo al sistema.

Otro ensayo comparativo es el olor que ofrece la muestra. Los aceites usados tienen normalmente un olor a grasa y los oxidados exhiben un olor a quemado, que es más fuerte según el grado de oxidación o contaminación presente. (Fernández, 2010)

II. Para medir la constante dieléctrica (lubrisensor): Es la técnica rápida más moderna que sirve para la evaluación general del aceite de forma cualitativa, no pudiéndose determinar la causa de la degradación o contaminación de este, aunque en función de la fluctuación de la aguja del equipo utilizado se puede llegar a criterios sobre las causas del mal o buen estado del aceite. (Borjas & Pérez, 2016)

III. Para medir la viscosidad cinemática (viscosímetro de caída de bolas o viscostck).

La viscosidad es la principal característica de la mayoría de los productos lubricantes. Es la medida de la fluidez a determinadas temperaturas. Si la viscosidad es demasiado baja la película del lubricante no soporta las cargas entre las piezas y desaparece del medio sin cumplir su objetivo de evitar el contacto metal-metal y si es demasiado alta el lubricante no es capaz de llegar a todos los espacios en donde es requerido.

El ingeniero Alexis Vega Jiménez aclara con respecto a la variación de la viscosidad, que su incremento en el aceite es malo, pero el decremento es peor.

Para el caso de las cajas multiplicadoras, se consideran dentro de los valores límites de precaución un incremento de la viscosidad de +/-10 % y un +/-15 % como límites críticos. (Terradillos, Bilbao, Ciria, & Málaga, 2005)

Si parece muy estricto, importantísima empresa mexicana de expertos en este tema como Noria Latín América, lo establece aún más bajo (+/- 5 y +/-10) %.

IV. Ensayo de la mancha: “Técnica que establece la medida cualitativa de las propiedades de detergencia y dispersancia del aceite lubricante, así como de la cantidad de residuos carbonosos” (Borjas & Pérez, 2016).

V. Para medir acidez (indicador de PH utilizando el bromocresol verde).

El número de acidez (AN): es un indicador de la salud de aceite y su medición y tendencia es una herramienta valiosa en el análisis de aceite para monitorear el agotamiento de antioxidantes. Los altos niveles de ácido pueden indicar un exceso de oxidación del aceite o el agotamiento de los aditivos de aceite y pueden conducir a la corrosión de los componentes internos.

Al monitorear el nivel de ácido, el aceite puede ser cambiado antes de que ocurra cualquier daño. En el análisis de un lubricante en uso, el objetivo es comparar el TAN del aceite trabajado en la máquina con el TAN del aceite nuevo para identificar disminución (consumo de aditivos) o incremento (degradación del lubricante), que pudieran notificar una situación anormal. (Quintero, 2016)

El ingeniero Alexis Vega Jiménez opina que la acidez debe evaluarse como un incremento respecto al AN de la línea base (LB), y no como un valor fijo. Las grandes empresas del negocio lo manejan como LB+ (valor).

Errichelo y Muller en “Application requirements for Wind turbine gearboxes”, tabla 6.2.6, establecen como límite de precaución la LB+40 % y como límite crítico la LB+75 %.

Terradillos et al. (2005), destacan que en cajas multiplicadoras, un índice de acidez de 0,2 respecto al aceite nuevo indica un valor límite a vigilar y 1 respecto al aceite nuevo indica un valor límite de peligro.

VI. Para medir el contenido de agua (crepitación o medidor de porcentaje de agua utilizando la celda química en una cápsula hermética).

Contenido en agua: la presencia de agua en el aceite nos indica una deficiencia en la estanqueidad de la multiplicadora que permite la entrada de la humedad del aire o un mal funcionamiento del aireador que no retiene dicha humedad.

La presencia del agua en el aceite es totalmente indeseable ya que no sólo reduce la eficacia del aceite lubricante, sino que favorece la oxidación de los elementos lubricados.

Técnicas del método clásico.

Son técnicas de laboratorio que buscan obtener una información precisa sobre las propiedades del lubricante que están relacionadas con la degradación del aceite, con el fin de programar el cambio periódico más idóneo y para detectar las causas de anomalías funcionales en los agregados.

Se requiere de un laboratorio clásico, equipos más o menos caros y personal calificado. Sus resultados son cuantitativos para el aceite y cualitativos (diagnóstico subjetivo) para el agregado. (Borjas & Pérez, 2016)

Los parámetros clásicos que mide este método son los siguientes:

I. Insolubles: Es la cantidad de elementos producidos por la combustión como: hollín y lodos, los cuales no se disuelven en el solvente. El indicador de insolubles, permite conocer la cantidad de sólidos que se pueden convertir en abrasivos si su cantidad aumenta en el aceite. (Carpio & Granizo, 2015)

II. Contenido de agua y sedimentos (por destilación o método Karl Fisher).

III. Punto de inflamación: es la temperatura más baja del aceite en la cual la aplicación de la llama de prueba causa que los vapores sobre la superficie ensayada se inflamen.

Para aplicar este ensayo se consideran dos métodos existentes según las normas ASTM (Asociación americana de pruebas de materiales), que son:

a. Método de ensayo estándar para determinar punto de inflamación y punto de fuego por equipo cleveland copa abierta (ASTMD-92): ensayo que consiste en colocar la copa del probador con la muestra de aceite, donde esta se comienza a calentar rápidamente al principio y luego suavemente a un régimen constante a medida que el punto de inflamación se aproxima. A intervalos especificados una llama de prueba se pasa a través de la copa. Al valor que se obtiene se le suele añadir "v.a" vaso abierto para indicar el método de determinación del parámetro.

b. Método de ensayo estándar para determinar punto de inflamación por equipo Pensky Marten copa cerrada (ASTMD-93): ensayo que utiliza una copa de prueba de dimensiones específicas, la cual se llena hasta la marca interior con el aceite a analizar y se tapa con una cubierta de dimensiones específicas. Se calienta y se agita al espécimen a razones especificadas. Una fuente de ignición se dirige dentro de la copa de prueba a intervalos regulares con interrupción simultánea de la agitación, hasta detectar el punto de inflamación. Al valor que se obtiene se le suele añadir "v.c" vaso cerrado para indicar el método de determinación del parámetro. (Hernández & Canales, 2015)

IV. Nivel de acidez: (equipo automático de titulación potenciométrica).

V. Densidad (densímetro o picnómetro): Propiedad básica de cualquier líquido que se desarrolla bajo la norma ASTM D 1298 y que se define como la masa de un volumen dado de aceite. Está relacionada con la naturaleza y el punto de destilación de la corriente base con la cual ha sido fabricado el lubricante. Se suele reflejar, para los lubricantes, como gravedad específica, definida como la relación entre la densidad del aceite lubricante con la densidad del agua, la cual es usualmente reportada a la temperatura de 60 °F (15,6 °C). (Estrada, 2013)

Técnicas del método complejo.

Son técnicas para cuantificar e identificar el contenido de partículas de desgaste y se emplea como herramienta del diagnóstico con el fin de seguir la evolución de las condiciones mecánicas del artículo, descubrir desgaste anormal y como complemento de los resultados del análisis clásico y rápido.

Se realiza en laboratorios especializados, con equipos sofisticados (muy caros), con personal altamente especializado y sus resultados son cuantitativos para el aceite y agregados (grado de contaminación y desgaste). (Borjas & Pérez, 2016)

I. Espectrometría: Técnica que proporciona información cualitativa y cuantitativa en cuanto a los metales presentes en el aceite y su cantidad. Está basada en la interacción que existe entre la radiación electromagnética y la materia cuando se produce un intercambio de energía, conociendo que los átomos de cualquier elemento producen espectros electromagnéticos característicos al ser excitados. (Mora, 2008)

Para esta finalidad, según Salgado et al. (2009) se utilizan fundamentalmente dos tipos de espectrómetros:

a. Los espectrómetros de emisión atómica:

Utilizan la propiedad de los átomos que al ser excitados emiten una radiación que es función de su configuración electrónica y que está compuesta por longitudes de onda características; razón por la cual, elementos diferentes emiten radiaciones diferentes. Con esta técnica se analizan las muestras tal y como se reciben, por lo que se utiliza en laboratorios especializados con grandes volúmenes de trabajo, proporcionando resultados simultáneamente de muchos elementos en menos de un minuto.

La espectrometría de emisión, consiste en calentar una muestra de aceite y llevarla a un estado de plasma, para que en este estado, los elementos contenidos en el lubricante emitan ciertas radiaciones en el aspecto visible y ultravioleta. La intensidad de radiación

recibida, es separada por difracción en diferentes parámetros de longitud de onda, esto permite calcular las concentraciones de diferentes elementos contenidos en la muestra. Esta técnica permite realizar mediciones de concentraciones de 1 a 1.000 ppm y se emplea para detectar contenido de aditivos, metales de desgaste y contaminantes. (Soutullo, 2018)

b. Los espectrómetros de absorción atómica:

Aprovechan la propiedad donde la cantidad de luz monocromática absorbida por los átomos de un elemento excitado es proporcional a su concentración. Esta técnica relativamente simple y de bajo costo solo se usa con pequeños volúmenes de trabajo debido a su capacidad de análisis mono elemental y a que se debe diluir la muestra.

Los valores que se obtienen de los análisis espectrométricos son las concentraciones en ppm de los diferentes metales presentes en una muestra de aceite usado.

II. Ferrografía: Técnica de análisis que aísla e identifica las partículas presentes en el lubricante, para poder realizar un diagnóstico sobre el estado del equipo en base a las mismas. (Estrada, 2013)

Se divide en dos grupos principales según la forma de análisis:

a. Ferrografía directa (conteo de partículas): Consiste en una medición cuantitativa de la concentración de las partículas ferrosas en una muestra de fluido a través de la precipitación de esas partículas en un tubo de vidrio sometido a un fuerte campo magnético.

Dos rayos de luz transportados por fibra óptica impactan sobre el tubo en dos posiciones correspondientes a la localización en la cual las partículas grandes y las pequeñas serán depositadas por el campo magnético. La luz es reducida en relación a las partículas depositadas en el tubo de vidrio y esta reducción es monitoreada y medida electrónicamente.

Dos conjuntos de lecturas son obtenidos de las grandes y pequeñas partículas (partículas por encima de 5 micras y partículas por debajo de 5 micras). Por lo general más de 20.000 partículas mayores de 5 micras indican una alerta de seguimiento y más de 40.000 son excesivas e indican problemas de desgaste en componentes ferrosos de la máquina. (Rueda, 2005)

Ventajas: Analizador compacto, portátil, en línea, fácil de operar, poco sensible a la opacidad y contaminación con agua.

Desventajas: Sólo mide partículas ferromagnéticas y para ser decisiva requiere de un análisis posterior de ferrografía analítica. Para que la muestra sea válida el análisis debe ser realizado sobre aceites cambiados o microfiltrados después de cada incidente y que hayan realizado el ciclo de lubricación un número representativo de veces.

b. Ferrografía analítica.

Chaudri and Martínez (2015), afirma que la ferrografía analítica es una de las técnicas más importantes para el análisis de aceite, que, a pesar de sus capacidades es frecuentemente excluida de los programas de análisis de aceites, debido a que es bastante costosa. Es una prueba que requiere tiempo, paciencia y alta habilidad (muy buen ojo) por parte del analista. Esta logra una clara identificación de modos de falla que ningún otro análisis provee.

La ferrografía analítica permite al analista determinar la morfología de las partículas de desgaste presentes en la muestra de aceite, revela el tipo de desgaste producido y la composición de las aleaciones de las partículas de desgaste. La interpretación del ferrograma brinda al analista una imagen clara de los componentes que se están desgastando en el sistema. (Tekniker, 2002)

Sentinel Lubricants Corp. (2018), expone en su escrito las ventajas y desventajas que brinda la ferrografía analítica:

Ventajas: el mejor método para determinar la severidad y tipo de desgaste presente. No hay limitaciones por tamaño de partícula o metalurgia. El desgaste puede documentarse por medio de fotografía digital.

Desventajas: resultados subjetivos dependientes del analista. La prueba es lenta, de mucha mano de obra y, por lo tanto, cara.

El principio de la ferrografía analítica (ver figura 1.10) consiste en separar sistemáticamente el material suspendido en el lubricante, sobre una plaqueta de vidrio, la cual es examinada bajo el microscopio para distinguir tamaño, concentración, composición, morfología y condición superficial de las partículas ferrosas y no ferrosas que caracterizan el desgaste. (Quintero, 2016)

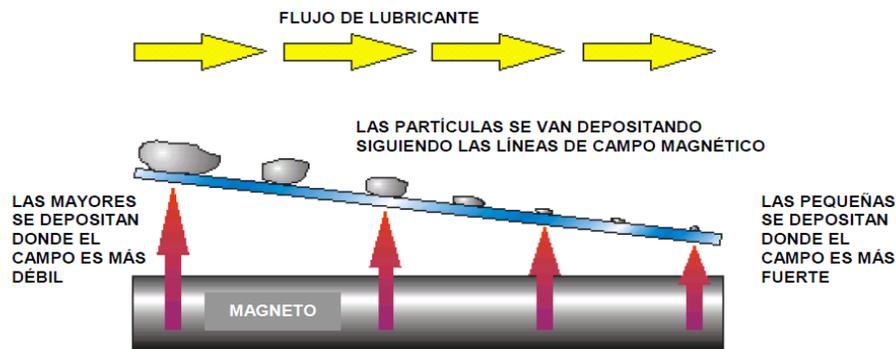


Figura 1.10 Principio de funcionamiento de la ferrografía. Fuente: (Quintero, 2016)

Debido al campo magnético las partículas ferrosas se alinean en cadenas horizontales a lo largo de la plaqueta; las partículas más grandes se depositan hacia el punto de entrada y las pequeñas hacia el punto de salida. Las no ferrosas se depositan aleatoriamente en toda la plaqueta acumulándose sobre las cadenas de partículas ferrosas las cuales actúan como diques. La ausencia de partículas ferrosas reduce sustancialmente la efectividad del análisis de las no ferrosas. (Hidalgo & Pelegrino, 2014)

La plaqueta preparada de esta manera con estas cadenas de partículas, se denomina ferrograma. Después de que las partículas son depositadas en el ferrograma la plaqueta se lava y las partículas quedan permanentemente adheridas. El ferrograma está ahora listo para inspección óptica utilizando un microscopio bicromático. (Rueda, 2005)

III. Técnicas complementarias: estas técnicas se usan para detectar partículas de desgaste grandes que normalmente se encuentran en filtros y depósitos de aceite y que por su tamaño tienden a asentarse y no aparecen en la muestra.

a. Recuento de partículas: se emplea fundamentalmente en fluidos utilizados en transmisiones hidráulicas. El tamaño de las partículas contaminantes se determina a través de un sistema de mayas de diferentes calibres o se hace pasar un haz de luz por el fluido y la opacidad determina el conteo.

b. Colector magnético: permite la separación de las partículas por atracción magnética que sobrepasan un tamaño determinado. Las partículas magnéticas pueden utilizarse como fuente de información de la intensidad del desgaste y como identificación del tipo de desgaste.

c. Microscopía: permite analizar la morfología y el tamaño de las partículas. Si las partículas son > 1 micra se utiliza un microscopio óptico convencional. Si las partículas son < 1 micra o se desea conocer en detalle la forma y el tamaño de ellas, entonces se utiliza un microscopio electrónico de barrido.

La distribución de partículas metálicas por su tamaño es importante ya que da una idea de la eficiencia de los filtros, permite saber si retiene las partículas. El color de las partículas da idea del metal. (Borjas & Pérez, 2016)

Teniendo en cuenta la relación de bibliografías consultadas sobre las técnicas utilizadas en el análisis de lubricante en multiplicadoras, se puede concluir que existe una gran diversidad de métodos que permiten conocer la condición operativa de un lubricante en uso y el estado técnico de una maquinaria o equipo de forma cualitativa y cuantitativa.

1.3 Investigaciones realizadas a través del análisis de lubricante en multiplicadoras.

Dentro del marco actual de las energías renovables, la energía eólica ha cobrado un lugar predominante como motor de cambio en la generación de energías alternativas no contaminantes. Sin embargo, este rápido incremento ha motivado la aparición de muchísimos problemas de operación y rendimiento, asociados fundamentalmente a malas prácticas de diseño y mantenimiento.

El funcionamiento adecuado de un aerogenerador depende en gran manera del comportamiento de la multiplicadora. Estas cuentan con engranajes planetarios y rodamientos que requieren unas atenciones especiales debido a sus condiciones extremas de operación (temperaturas, régimen de funcionamiento, entre otras). En estas condiciones, el análisis del aceite y la identificación de partículas de desgaste existentes, se considera la herramienta predictiva/proactiva más eficaz para conseguir un rendimiento óptimo de la máquina. (Terradillos & Ciria, 2013)

Sin embargo, el diplomante declara que pocos estudios que abordan el uso de esta herramienta están disponibles en la literatura actual en Cuba y todos centrados a motores de combustión interna en vehículos de transporte y grupos electrógenos. Por lo que se ha realizado una revisión de la literatura sobre el alcance, para investigar el papel del mantenimiento, mediante el análisis de lubricantes en el sector eólico mundial, con especial atención.

Para efectuar una búsqueda bibliográfica sobre investigaciones realizadas a través del análisis de lubricantes en multiplicadoras, el investigador recurrió a cinco bases de datos científicas: Scopus, ScienceDirect, IEEE Xplore, Dimensions y SciELO. Se preparó un conjunto de palabras clave, estructuradas en tres grupos diferentes, para estas bases de datos. El grupo A incluye palabras clave relacionadas con aerogeneradores y energía eólica; el grupo B está compuesto por palabras clave relacionadas con el análisis de aceite

y el grupo C introduce las palabras clave relacionadas con el subsistema multiplicadora, para contextualizar la búsqueda.

Para obtener la lista final de palabras clave utilizadas para la búsqueda (ver tabla 1.1), estas se tradujeron al inglés, pues el mayor por ciento de los artículos que se publican, están en este idioma. Las palabras clave de cada grupo se vinculan con el operador booleano “OR”, mientras que los grupos se vinculan entre sí con el operador booleano “AND”, para hacer la relación entre grupos.

Tabla 1.1 Grupo de palabras claves. Fuente: Elaboración propia

Grupo A	Grupo B	Grupo C
“Wind turbine”	“ferrography”	“gearbox”
“Wind energy”	“oil analysis”	
	“oil test”	
	“lubricant analysis”	
	“lubricant test”	

Partiendo de dos ecuaciones de búsqueda, formadas por las palabras claves señaladas anteriormente, el investigador desarrolló una revisión de la bibliografía con el cual se logró recopilar una serie de artículos científicos de alto impacto en las bases de datos, que le permiten disponer de una amplia fuente de estudio y apoyo para la investigación a realizar. No se encontraron resultados en la base de datos de SciELO, por lo que no se refleja en la tabla 1.2.

Tabla 1.2 Estrategias o ecuaciones de búsqueda. Fuente: Elaboración propia

Estrategia					Total
((“Wind turbine” OR “wind energy”) AND (“ferrography” OR “oil analysis” OR “oil test” OR “lubricant analysis” OR “lubricant test”))	21	58	8	6	93
((“Wind turbine” OR “wind energy”) AND (“ferrography” OR “oil analysis” OR “oil test” OR “lubricant analysis” OR “lubricant test”) AND (“gearbox”))	15	4	7	6	32

Se buscaron documentos que contenían las combinaciones de palabras clave en su título, resumen o palabras clave. La búsqueda se limitó a un rango de años específico (2010-

2021), y fue efectuada el 20 de enero del 2021, considerando las publicaciones en todos los idiomas y solo los documentos tipo “artículo”. Después de ejecutar la búsqueda en las bases de datos, se encontraron un total de 125 publicaciones, las cuales se cargaron en el gestor de referencias bibliográficas (Software EndNote X7), bajo las normas APA, sexta edición.

El proceso de selección se dividió en tres fases:

En la primera fase se eliminaron todos los duplicados, encontrándose 42 réplicas, para un total de 83 artículos para examinar.

Una segunda fase de selección fue la lectura del título, resumen y palabras clave, donde se excluyeron 62 artículos que no cumplían con los requerimientos, para un total de 21 artículos para analizar. En esta etapa de selección, los artículos se clasificaron como incluidos, excluidos e indefinidos de acuerdo con los criterios de selección específicos (CS) que se describen a continuación:

1^{er} CS - Artículos que vinculen el análisis de lubricante con las turbinas eólicas.

2^{do} CS - Los artículos que establecen una relación entre el análisis de lubricante y cajas de engranajes.

La tercera fase incluyó la lectura del texto completo de los trabajos seleccionados en la etapa anterior y, por tanto, una valoración definitiva en base a los criterios de selección 1 y 2, si no se encontró el texto completo, se excluyó el artículo relacionado. En este caso se identificaron 14 artículos que no cumplían con los criterios (entre ellos 3 que no contaban con su texto completo), y por tanto se descartaron.

Finalmente, se realizó el análisis de “*snowball*” (bola de nieve), mediante la revisión de las referencias bibliográficas de cada uno los artículos seleccionados en la segunda etapa, para luego identificar 1 artículo adicional que cumplía con los CS.

El total de artículos escogidos luego de aplicar las distintas etapas de filtrado, fue de 8, como lo refleja la figura 1.11.

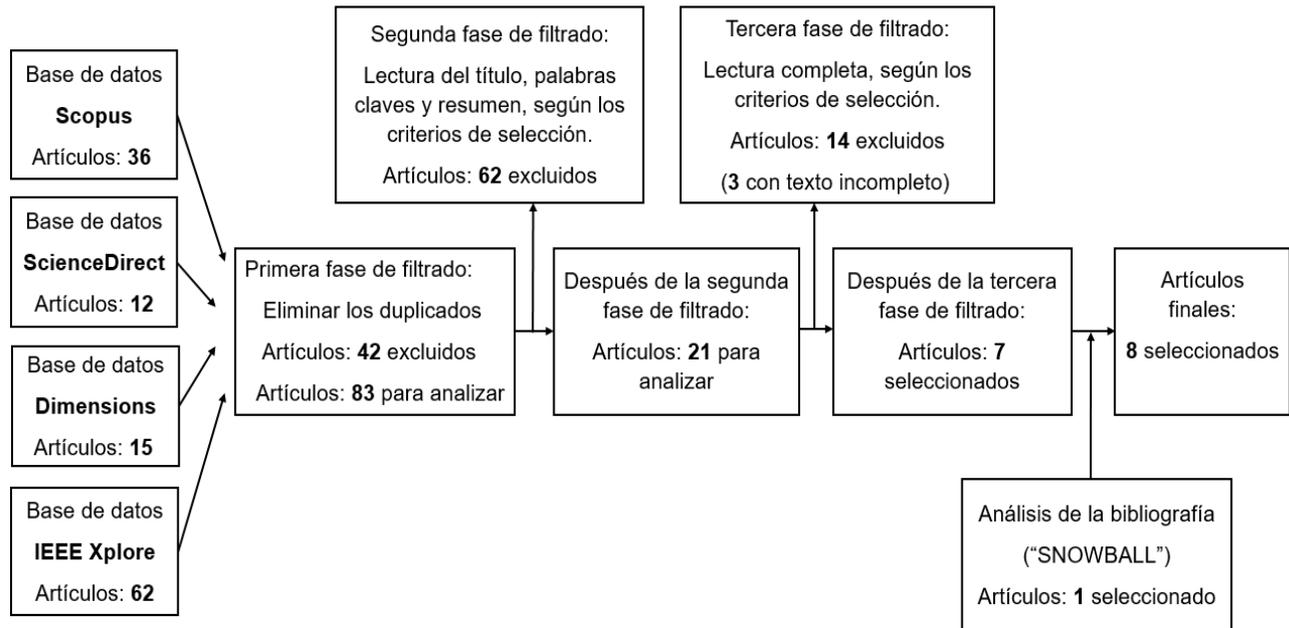


Figura 1.11 Proceso de selección. Fuente: Elaboración propia

Según las estadísticas de la base de datos de Scopus: Los países que más publican en el mundo sobre el análisis de lubricante en cajas de engranajes en los últimos 10 años son el Reino Unido, EE. UU y España con 8, 6 y 4 artículos respectivamente, como lo evidencia la figura 1.12.



Figura 1.12 Productividad por países. Fuente: Elaboración propia. Tomado de Scopus (TITLE-ABS-KEY (("Wind turbine" OR "wind energy") AND ("ferrography" OR "oil analysis" OR "oil test" OR "lubricant analysis" OR "lubricant test"))) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar"))).

La siguiente gráfica destaca la cantidad de publicaciones realizadas por año, en el período de (2010-2020), relacionado con el análisis de lubricante, donde se indica que no ha existido una estabilidad en la productividad de investigaciones, aunque los años 2011 y 2016 han sido provechosos con 4 artículos publicados.



Figura 1.13 Productividad anual. Fuente: Elaboración propia. Tomado de Scopus (TITLE-ABS-KEY (("Wind turbine" OR "wind energy") AND ("ferrography" OR "oil analysis" OR "oil test" OR "lubricant analysis" OR "lubricant test")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar"))).

La gráfica 1.14 ilustra la cantidad de publicaciones que se han venido desarrollando desde el 2010 hasta el 2020 en distintas materias, sobre la técnica de análisis de aceite, donde se evidencia que la Ingeniería, la Ciencia de los materiales y la Energía con 22, 10 y 7 artículos respectivamente son los que más publican sobre el tema.

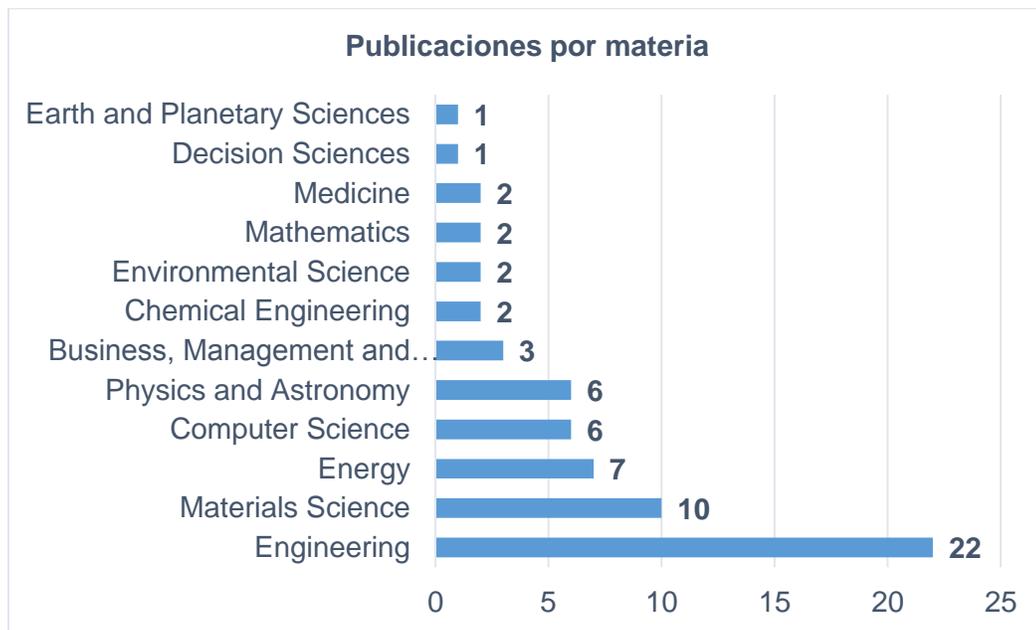


Figura 1.14 Productividad por materia. Fuente: Elaboración propia. Tomado de Scopus (TITLE-ABS-KEY (("Wind turbine" OR "wind energy") AND ("ferrography" OR "oil analysis" OR "oil test" OR "lubricant analysis" OR "lubricant test"))) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar"))).

En la tabla 1.3 se presenta un resumen de los 8 artículos elegidos luego de la revisión bibliográfica realizada, para los cuales se tuvo en consideración toda la información referente a sus autores, el año de la publicación, la descripción de los resultados obtenidos, los métodos representativos utilizados (gráficos, tablas, esquemas), las variables analizadas y los métodos de solución empleados.

Tabla 1.3 Investigaciones relacionadas con el análisis de lubricante en multiplicadoras. Fuente: Elaboración propia

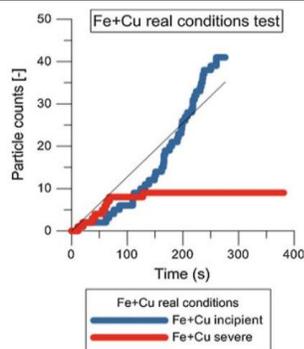
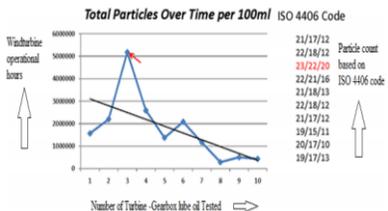
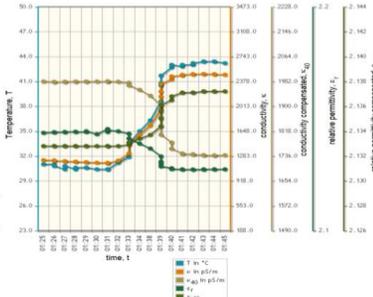
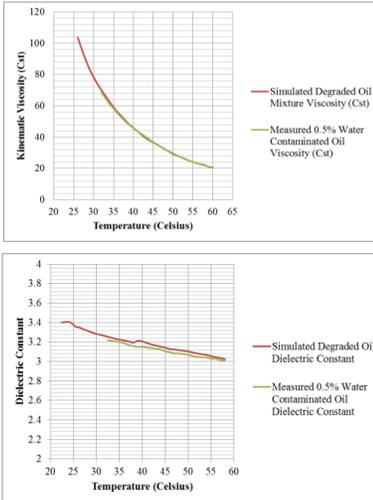
Año	Autor	Descripción	Métodos representativos	Variables analizadas	Método empleado
2016	V. Macián, B. Tormos, S. Ruiz, G. Miró, I. Rodas	Experimentación realizada a un aceite ISO VG 320, a través de un banco de pruebas de cajas de engranajes, para simular el entorno de desgaste del lubricante al introducir partículas metálicas (Fe y Cu), utilizando un sensor de conteo de partículas. Obteniendo como resultados un buen rendimiento y sensibilidad del sensor al detectar ambos tipos de partículas, además en condiciones reales simuladas, la introducción de una cantidad de partículas correspondiente a un desgaste severo, da como resultado una cantidad de partículas mayor que la cantidad correspondiente a un desgaste incipiente.	 <p>Resultados de las pruebas en condiciones reales para simular un desgaste incipiente y severo al introducir partículas de (Fe + Cu) en el aceite.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Contenido de partículas metálicas. • Tiempo de funcionamiento. • Densidad. • Diámetro de las partículas metálicas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor de conteo de partículas.
2020	Dilip Singh, Jossy Kurien, Albert Villayamore	Se analiza un lubricante de grado ISO VG 320 de una caja de engranajes, en el cual se encontró a través de pruebas de diagnóstico rápido luego de un año de operación, un recuento máximo de partículas ISO 22/20/17 y un contenido de humedad de 613 ppm después de 5.000.000 horas de funcionamiento. Por tanto, se realiza un análisis experimental mediante la purificación del aceite, y se considera aceptable reutilizar el aceite purificado por otros 2 años, al obtener un recuento de partículas ISO 16/14/11, un contenido de humedad inferior a 100 ppm y un índice de acidez de 0,1 mg de KOH/g.	 <p>Resultados del recuento de partículas, luego del análisis de las muestras de aceite de 10 máquinas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Contenido de humedad. • Índice de acidez. • Recuento de partículas. • Viscosidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pruebas de diagnóstico rápido. • Purificación del aceite lubricante.

Tabla 1.4 Investigaciones relacionadas con el análisis de lubricante en multiplicadoras. Fuente: Elaboración propia (Continuación)

Año	Autor	Descripción	Métodos representativos	Variables analizadas	Método empleado
2013	Sr. Mauntz, J. Gegner, U. Kuipers, S. Klingauf	Se presenta un sistema de diagnóstico de sensores de aceite en línea conectado a la web, para el monitoreo continuo de la calidad del lubricante en cajas de engranajes a través de mediciones de propiedades eléctricas (conductividad eléctrica y permitividad relativa) en el tiempo, contra fallas prematuras de los cojinetes. El procesamiento e interpretación de los valores de estas variables, permite sacar conclusiones como: a medida que aumentan las propiedades eléctricas, se traduce a un creciente desgaste o contaminación del lubricante.		<ul style="list-style-type: none"> • Conductividad eléctrica. • Permitividad relativa. • Temperatura. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensores en línea.
2013	Junda Zhu, Jae M. Yoon, David He, Yongzhi Qu, Eric Bechhoefer	Desarrollo de pruebas experimentales sobre el sistema de monitoreo y predicción de la vida útil restante (RUL) de un aceite SAE 15W-20 de cajas de engranajes utilizando el filtrado de partículas y sensores en línea que permiten recoger valores de viscosidad y constante dieléctrica en tiempo real, para modelar la degradación del lubricante bajo distintos niveles de contaminación del agua (0,5; 1; 2 y 3) %, a diferentes temperaturas, y luego validar el ensayo con datos de pruebas de aceite simulados en el laboratorio. Los resultados del experimento demostraron la eficacia de la simulación. Para un nivel fijo de contaminación del agua: la viscosidad desciende a medida que aumenta la temperatura, y la constante dieléctrica aumenta a medida que aumenta la temperatura.		<ul style="list-style-type: none"> • Viscosidad. • Constante dieléctrica. • Temperatura. • Contaminación con agua. 	<ul style="list-style-type: none"> • Filtrado de partículas. • Sensores en línea.

Ejemplo del registro de valores de cada sensor, que se transfieren a través de Internet a un servidor de base de datos.

Comparación: constante dieléctrica y la viscosidad del aceite contaminado con agua simulado al 0,5 % y el 0,5 % medido.

Tabla 1.5 Investigaciones relacionadas con el análisis de lubricante en multiplicadoras. Fuente: Elaboración propia (Continuación)

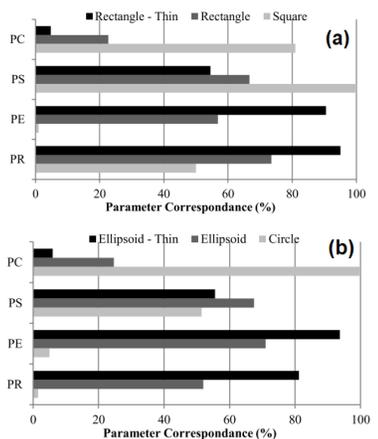
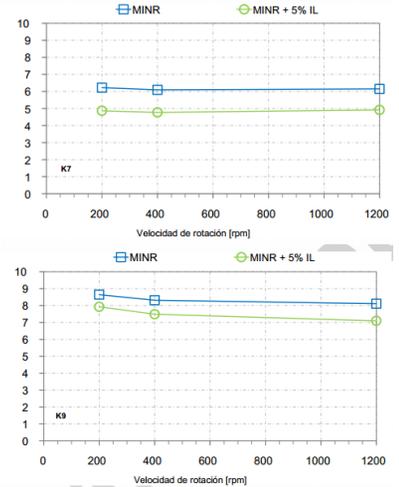
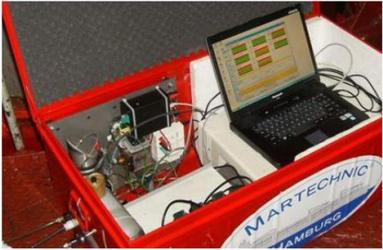
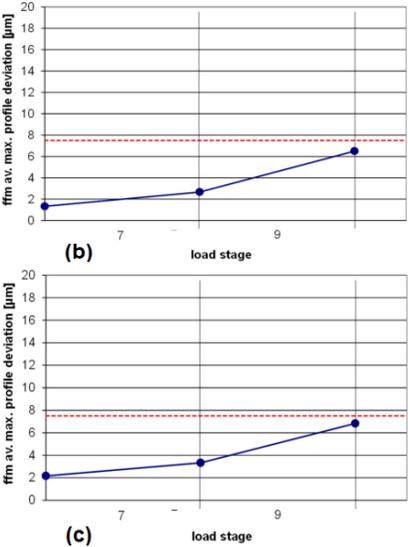
Año	Autor	Descripción	Métodos representativos	Variables analizadas	Método empleado
2014	Andrew Hamilton, Alison Cleary, Francis Quail	Simulación de un sistema de lubricación de caja de cambios para comprobar la presencia de partículas de desgaste, mediante un sensor de píxeles activo que permite capturar imágenes en línea de partículas suspendidas en el lubricante en tiempo real con una alta resolución, para luego analizar su morfología a través del software MATLAB. Los resultados experimentales demostraron que el sensor utilizado puede detectar partículas por encima de 125 µm y además se puede estimar la forma básica de las partículas presentes, al determinar el objeto de prueba con el mayor porcentaje de parámetros de forma (rectangular, cuadrado, circular y elipsoidal).	 <p>Porcentaje de partículas de prueba presentes en el lubricante. (a): Rectangulares y Cuadradas. (b): Circulares y Elipsoidales.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Concentración de partículas de desgaste. • Forma y rango de tamaño de las partículas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor de píxeles activos (APS) de alta resolución. • Software MATLAB (laboratorio de matrices).
2015	Carlos Fernandes, Antolin Hernandez Battez, Rubén González, Raquel Monge, José Viesca, Alberto García, Ramiro Martins, Jorge Seabra	Se presenta un estudio del comportamiento tribológico de un aceite mineral para cajas de engranajes al adicionarle un 5 % de líquidos iónicos, a través de un banco de prueba simulado de rodamientos y engranajes para medir la pérdida del torque en condiciones de operación similares a las observadas en una caja de engranajes de turbina eólica. Los resultados muestran que el aceite formulado con aditivo líquido iónico puede reducir la pérdida de par, potencia y mejorar la eficiencia de la caja de engranajes al tiempo que produce menos partículas de desgaste.	 <p>Mediciones de pérdida del par para distintas etapas de carga.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Torque. • Potencia. • Temperatura. • Carga. • Velocidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensores piezoeléctricos. • Ferrografía de lectura directa.

Tabla 1.6 Investigaciones relacionadas con el análisis de lubricante en multiplicadoras. Fuente: Elaboración propia (Continuación)

Año	Autor	Descripción	Métodos representativos	Variables analizadas	Método empleado
2016	David Baglee, Michael Knowles, Sini-Kaisu Kinnunen, Diego Galar	Propuesta de un sistema de análisis de aceite para cajas de engranaje, utilizando el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) y los sensores en línea para analizar el estado del lubricante, mientras aún está en servicio. Su aplicación permitirá mediante el RCM conocer los equipos más críticos, que luego serán monitoreados con los datos obtenidos de cuatro sensores, que recopilan valores de parámetros del aceite en tiempo real, para detectar cambios en su condición y se puedan introducir tareas correctivas en la estrategia de mantenimiento.	 <p>Sistema de 4 sensores Poseidon en línea (sensor de infrarrojos, de viscosidad, espectroscopia infrarroja y detector de partículas), para analizar variables.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Contenido de agua. • Concentración de hollín. • TBN (índice de alcalinidad). • Viscosidad. • Contenido de insolubles. • Presencia de partículas de desgaste. 	<ul style="list-style-type: none"> • RCM. • Sensores en línea.
2018	Diego Coronado, Jan Wenske	Análisis y monitoreo del proceso de degradación de tres aceites de cajas de engranajes bajo dos etapas de envejecimiento: en el laboratorio y en el campo. Para desarrollar las pruebas se consideraron tres métodos de análisis: muestreo de aceite en el laboratorio, además de pruebas de micropicadura y medición de sensores en línea utilizando bancos de pruebas. Los resultados obtenidos demostraron que el 95 % de las muestras tenían una viscosidad aceptable, todos los aceites exhibieron una alta resistencia al micropitting, al igual que un comportamiento similar en cada una de las etapas de envejecimiento y los sensores utilizados en el estudio aportaron información limitada sobre el proceso de degradación del lubricante, afectado por el tipo de aceite y su rango de medición.	 <p>Prueba de micropicado para las etapa de envejecimiento del aceite: (b) Etapa I; (c) Etapa II.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Viscosidad. • Contenido de elementos presentes. • Resistencia a la micropicadura. • Temperatura. • Conductividad. • Constante dieléctrica. • Contenido de aditivos. • Índice de acidez. 	<ul style="list-style-type: none"> • Muestreo de aceite en el laboratorio. • Sensores en línea. • Pruebas de micropicado.

A partir de la literatura analizada, el investigador llega a las siguientes conclusiones:

1. El análisis de lubricantes, aunque ha cedido terreno frente a otras técnicas en los últimos 10 años, sigue siendo una prueba de gran aplicación, y al día de hoy ha tomado una notable fuerza, con el uso de tecnologías relativamente nuevas para la industria eólica, como los sensores en línea (on-line).
2. Para aplicar el análisis de lubricante en cajas de engranajes se pueden emplear una gran variedad de métodos como el muestreo de aceite en el laboratorio, pruebas de diagnóstico rápido, análisis espectral, filtrado de partículas, pruebas de micropicado, ferrografía, purificación del aceite, entre otras.
3. En un estudio de lubricante se deben analizar y tener en cuenta múltiples variables físicas y químicas como la viscosidad, temperatura del lubricante, constante dieléctrica, concentración de partículas, insolubles, oxidación, nitración, humedad relativa, acidez, color, apariencia, entre otras.

Considerando las conclusiones anteriores y los instrumentos de diagnóstico con que cuenta el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Holguín y la Empresa Cubana de Lubricantes (CUBALUB), se emplearán distintas técnicas tradicionales del método rápido para conocer la condición y salud del lubricante, como el análisis de la viscosidad, crepitación, mancha de aceite y contaminación del lubricante (a partir de la constante dieléctrica), y para validar los resultados de la experimentación técnicas del método clásico, además de la espectrometría como técnica del método complejo.

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DE LUBRICANTE EN LAS MULTIPLICADORAS DE LOS AEROGENERADORES G52-850 DEL PARQUE EÓLICO GIBARA 1

2.1 Caracterización de las multiplicadoras de los aerogeneradores G52-850.

Las especificaciones técnicas de Gamesa Eólica S.A. (2005) aclaran que las multiplicadoras pertenecientes a los aerogeneradores GAMESA G52-850 del Parque Eólico Gibara 1, proceden de la marca española Echasa y del modelo GE850PL, cuentan con una frecuencia de 50 Hz, poseen una longitud total de 1 664 mm, una razón de multiplicación de 1:61,74; una potencia de 850 kW, un peso total de 5 600 kg y un par de entrada nominal de 363 kN.

Se componen de una etapa planetaria y dos paralelas con engranajes helicoidales, su eje de entrada o de baja velocidad gira a unas $26,17 \text{ min}^{-1}$ y el eje de salida o de alta velocidad a unas $1 620 \text{ min}^{-1}$. Contienen instalados sensores PT-100 para controlar la temperatura del aceite, del cojinete de alta velocidad y el nivel de aceite.

Disponen de un sistema de lubricación a presión por salpicadura y utilizan un aceite sintético de la marca RENOLIN UNISYN CLP 320 con una cantidad aproximada de 110 L.

Según el catálogo FUCHS LUBRICANTES (2011), este lubricante está recomendado y cumple los requerimientos para la lubricación de rodamientos y engranajes de turbinas eólicas instaladas en todo el mundo, con una excelente estabilidad térmica y frente al envejecimiento, buenas propiedades de fluidez en frío, muy buena liberación de aire, poca formación de espuma, buena protección contra el micro-pitting, excelentes características de baja temperatura, alto índice de viscosidad y estable frente al cizallamiento.

En cuanto a sus propiedades físicas-químicas, a continuación, se señalan algunas de ellas:

Tabla 2.1 Propiedades del lubricante. Fuente: FUCHS LUBRICANTES (2011)

Producto	RENOLIN UNISYN CLP 320	
Propiedades	Método de ensayo	
Densidad a 15 °C	ASTM D-1298	860 Kg/m ³
Punto de inflamación	ASTM D-92	260 °C
Viscosidad cinemática a 40 °C	ASTM D-445	320 mm ² /s
Viscosidad cinemática a 100 °C	ASTM D-445	35 mm ² /s
Índice de viscosidad	ASTM D-2270	155
Punto de fluidez	ASTM D-97	-42 °C
Número de neutralización	ASTM D-974	0,6 mg KOH/g
Índice de color	ASTM D-1500	1

2.2 Análisis del lubricante perteneciente a las multiplicadoras Echesa GE850PL.

Sanabria, Salgado, and López (2016), declaran que un análisis de aceite en campo o a pie de máquina correctamente realizado, proporciona información valiosa que se puede emplear para determinar rápidamente su estado y tomar decisiones inmediatas dentro del plan de lubricación y mantenimiento del equipo.

Con el objetivo de conocer la condición del lubricante RENOLIN UNISYN CLP 320 y el estado técnico de las multiplicadoras del Parque Eólico Gibara 1, se procedió a tomar inicialmente del depósito original ofrecido por el fabricante, una muestra de 1 000 mL del aceite fresco, para calibrar los equipos de diagnóstico y como línea base (LB) para su posterior comparación con el aceite en servicio, del cual se extrajo igualmente, empleando una bomba manual, una muestra de 1 000 mL de la máquina número 3 con 25 382 horas de funcionamiento, para realizarles distintas pruebas de campo y de laboratorio, con el fin de obtener una información válida que permita definir si se puede seguir explotando o no el lubricante y determinar el estado actual de sus elementos mecánicos internos.



Figura 2.1 Muestras de aceite nuevo (a) y usado (b). Fuente: Elaboración propia

El investigador comenta a modo de inspección visual, que al agitar las muestras en estudio la formación de espuma desaparece en pocos minutos, siendo una señal favorable, pues su retención es totalmente indeseable en las multiplicadoras. En cuanto al cambio de coloración que ha sufrido el aceite, ver figura 2.1, este puede ser indicativo de contaminación o deterioro en él, y su oscurecimiento a causa de envejecimiento u oxidación, lo cual afecta en sus prestaciones. Sin embargo, son suposiciones, pues el aceite usado puede presentar un ligero o gradual cambio de color y aun así ser de cualidades similares al nuevo, sin perjudicar en su desempeño. Por tanto, se debe

proceder a realizar un estudio al lubricante que precise si se corresponde su estado de salud con la variación de su coloración.

2.2.1 Análisis por crepitación.

El análisis de contaminación con agua por crepitación, consiste en colocar unas gotas del aceite muestra en un recipiente, y someterlo a una temperatura que sobrepase el punto de ebullición, con el objetivo de que el agua contenida en la gota se libere produciendo burbujas y sonido. (Albarracín & Pesántez, 2020)

En el boletín número 27, Widman (2005) manifiesta que esta prueba puede ser realizada en el campamento o taller sin la necesidad de equipos de laboratorio. Entre más se controle, más exacto es el resultado y se puede determinar con exactitud hasta 500 ppm (0,05 %) de agua, que aunque muchos lo usan solamente para determinar si tiene o no agua, con un poco de experiencia se puede determinar la cantidad aproximada.

Para desarrollar esta técnica, se examinaron las muestras de aceite nuevo y usado, aplicando el siguiente procedimiento:

1. Calentar la plancha hasta una temperatura óptima de 160 °C.
2. Agitar las muestras de lubricante para que sean totalmente homogénea.
3. Dejar caer, con un gotero una o dos gotas de aceite sobre la plancha metálica.
4. Resultados:

Si comienza a chirriar (crepitar) es que el aceite contiene agua en una cantidad no aceptable, en caso contrario, el aceite no tiene dificultad con esta contaminación.

Para un aceite lubricante de multiplicadora, los valores límites de contaminación con agua se mueven entre (0,02 y 0,04) %; (200-400) ppm. (Terradillos et al., 2005)

Después de observar y analizar unos segundos lo establecido en el Anexo 3, el diplomante determinó que ambas muestras son negativas de presencia de agua, pues no se percibió cambio visible o audible en el momento del ensayo, como lo indica la ilustración a), por ende se encuentra en un estado normal, con menos de un 0,05 % de agua.

2.2.2 Análisis de la viscosidad.

La viscosidad es una de las propiedades más importantes del aceite. Está relacionada con su resistencia a la fluencia y tiene una relación directa con la capacidad de lubricación del aceite, formando una película para separar las superficies que pueden entrar en contacto.

Independientemente de la temperatura ambiente o de la temperatura del equipo, un aceite debe fluir lo suficiente para asegurar la lubricación adecuada de todas las piezas móviles. (Mendoza, 2017)

Para analizar esta propiedad se empleó un viscosímetro de caída de bolas, utilizando un tubo de vidrio de diámetro pequeño, que se rellenó con el líquido a analizar y se le hizo variar su temperatura desde (40-100) °C, cada 5 grados, a través de una resistencia eléctrica, para tomar una muestra de 10 mediciones, que corresponden al tiempo de caída de varias esferas (balín de acero) con iguales diámetros y masa, al recorrer una distancia constante de 20 cm entre dos puntos de referencia marcados en el tubo. Al dividir ambos términos descritos (tiempo y distancia), se determina la velocidad de caída del balín.

Cada uno de los datos recogidos en el ensayo (ver Anexo 4 y 5) se montaron en una hoja de cálculo de (Microsoft Excel, 2013), para obtener mediante distintas fórmulas y constantes con un lenguaje de programación, la viscosidad cinemática del fluido.

La figura 2.2 muestra la gráfica de la viscosidad cinemática en función de la temperatura para el aceite nuevo. A juzgar por el comportamiento de la curva de viscosidad, el resultado de la prueba deja claro, como es de esperar, que a medida que aumenta la temperatura del aceite la viscosidad disminuye.

Para los (40 y 100) °C se aprecia una pequeña variación en comparación con los valores referencia que ofrece el fabricante en su ficha técnica, lo cual se considera aceptable, pues desde la hora en punto que se destapa el envase para su empleo y luego se deposita en el taller para un próximo cambio de aceite, el producto comienza a estar expuesto a agentes externos (polvo y suciedad) u otros factores del medio, que pueden introducirse en el mismo y producir ciertas alteraciones en sus propiedades.

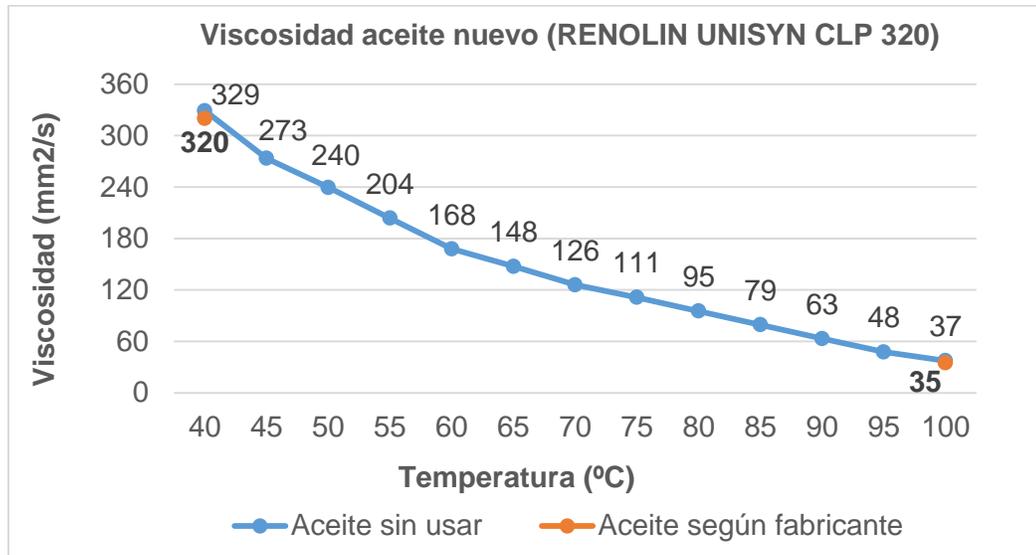


Figura 2.2 Prueba de viscosidad, aceite nuevo. Fuente: Elaboración propia

De igual forma en la figura 2.3 se representan los resultados obtenidos para el aceite usado, donde se demuestra en correspondencia con el caso anterior, que según la trayectoria que sigue la curva de viscosidad, con un aumento de la temperatura del lubricante, la viscosidad disminuye progresivamente.

En comparación con los valores obtenidos para el aceite nuevo:

A los 40 °C se percibe un ligero aumento, que es permisible o tolerable, pues permanece dentro los límites del rango aprobado por ISO 3448 para el grado VG 320, con valores promedios que van desde los (288-352) mm²/s.

A los 100 °C permanece prácticamente constante.

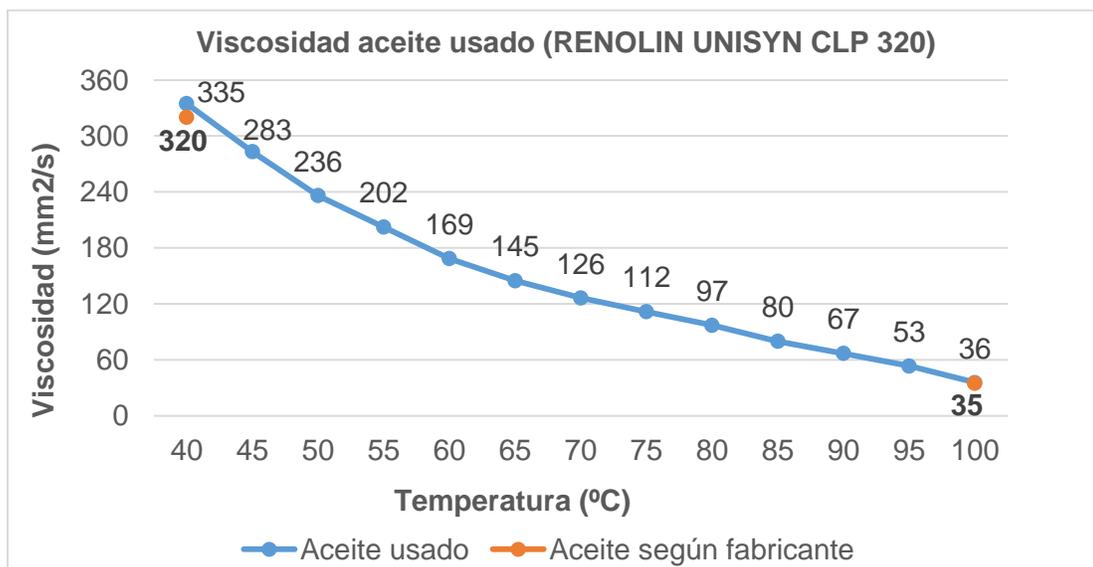


Figura 2.3 Prueba de viscosidad, aceite usado. Fuente: Elaboración propia

Las diferencias que existen en los valores de viscosidad calculados con respecto a los valores tentativos que brinda la ficha técnica del producto, pudieron ser menores, y esto se debe fundamentalmente a pérdidas de transferencia de calor en las muestras del lubricante analizado y luego en menor medida, a errores o incertidumbres en las mediciones, ya que durante el desarrollo del experimento se empleó un cronómetro manual.

No obstante, se mostrarán más adelante resultados de mayor precisión obtenidos en los laboratorios de la empresa CUBALUB.

2.2.3 Análisis de la contaminación a través de la constante dieléctrica.

La constante dieléctrica es una medida del grado de contaminación de un lubricante, cuando este se somete a un campo eléctrico. La contaminación normal por oxidación, materia carbonosa, entre otras, produce un aumento moderado de ésta; la contaminación con agua y partículas metálicas la aumentan excesivamente y la presencia de combustible la disminuye.

Para medir este parámetro se empleará el lubrisensor An-Oil-Izer, que según Borjas and Pérez (2016) es un instrumento electrónico de alta precisión que revela cualitativamente la presencia de contaminación en los aceites motor, aunque puede ser empleado en los aceites de transmisión, para engranajes, entre otros.

Para calibrar el instrumento se utilizan dos aceites patrones, uno de color rojo y otro de color verde que oferta el productor del equipo, elemento este que limita la explotación del instrumento al depender del suministro de los aceites patrones.

Jomarrón (2014), presenta en su investigación el procedimiento a seguir para medir e interpretar los valores en el equipo, los cuales se resumen y describen acá:

1. Con un gotero se vierte en el depósito la muestra de aceite nuevo, se coloca la esfera de metal para cerrar el circuito y usando los controles de operación se calibra el equipo, cuando la aguja marque la línea 0, ver figura 2.4 imagen izquierda.
2. Luego se limpia bien el depósito con un paño o papel, y se vuelve a llenar con el aceite usado, para definir si presenta contaminación cuando se produzca una deflexión de la aguja hacia la derecha, ver figura 2.4 imagen derecha (2).
3. Para facilitar el registro de las tendencias, el analizador cuenta con un indicador numérico de escala de 0 a 40. La aguja está calibrada al centro del punto de color rojo, hacia la derecha hasta el valor de 40, se indica el área de peligro y de mayor

contaminación del aceite, del rojo al verde se designa el área regular, y del verde hasta 0 se indican los valores normales o admisibles para la condición dieléctrica del lubricante.



Figura 2.4 Prueba de análisis de la contaminación, aceite nuevo y usado (2).

Fuente: Elaboración propia

Como resultado del experimento, se demostró que existe una mínima presencia de contaminación en el aceite usado según lo señalado por la aguja del analizador, la cual se desplazó solo una línea en su escala numérica, manteniéndose en los valores permisibles de buen estado y dando indicios de que se puede seguir usando el lubricante diagnosticado.

2.2.4 Análisis de la mancha de aceite.

El ensayo de la mancha es un método analítico que permite determinar el exceso de carbonilla en un lubricante, evaluar la capacidad dispersante residual del aceite detergente y detectar presencia de glicol o agua, combustible y otros contaminantes. (Bilbao, 2005)

Según Heras (2017), en la mancha de un aceite usado se distinguen generalmente tres zonas y un contorno continuo circular, ver figura 2.5, las cuales se definen como:

- La zona A, central o núcleo, formada por partículas insolubles. Su opacidad caracteriza el contenido en carbón.
- La zona B, intermedia o de difusión, más o menos oscura, caracteriza el poder dispersante residual del aceite. Se aprecia, por tanto, la dispersancia por la diferencia de diámetros de las dos zonas. En esta zona intermedia también se aprecia el contenido en agua: el anillo de difusión aparece irisado de rayos y dientes de sierra, como un sol.
- La zona C, exterior o traslúcida, desprovista de materias carbonosas, es donde llegan las fracciones más volátiles del aceite o combustible contaminante. Su coloración más o

menos amarillenta está relacionada con la oxidación del aceite o con la presencia de combustible.

- Contorno circular o aureola, rodea y delimita bastante bien el núcleo, representa en cierta forma el frente de desplazamiento de las partículas insolubles hacia el exterior de la mancha y es donde se depositan las partículas más pesadas. Indica con su mayor o menor grosor el contenido de partículas gruesas carbonosas o de contaminantes.

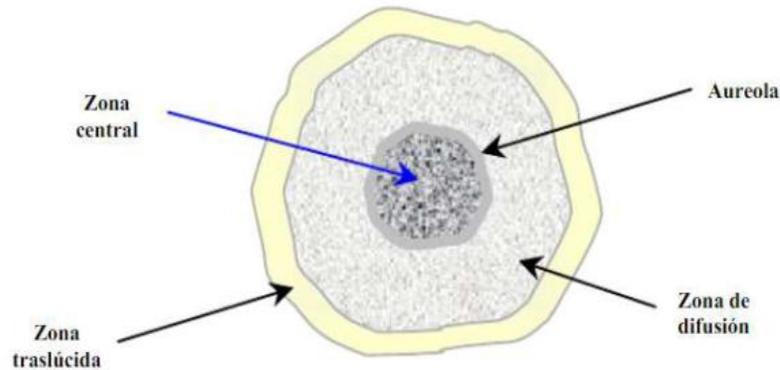


Figura 2.5 Estructura típica de una mancha. Fuente: (Heras, 2017)

El ensayo consiste en depositar una gota de aceite usado sobre un papel de filtro determinado y observarla al cabo de varias horas. La gota se deposita con una varilla cilíndrica de vidrio de (3-6) mm de diámetro o con un gotero, para que el experimento sea repetitivo. Se deja enfriar la muestra durante unas horas mientras se expande, para luego estudiar su estructura y el nivel de detergencia - dispersante.

Se recomienda al analista hacer dos manchas con cada aceite usado: una a 20 °C (más o menos temperatura ambiente) y otra a 200 °C (temperatura de funcionamiento) para comprobar el estado del aceite (dispersancia y detergencia) en ambas condiciones (Salgado et al., 2009), pues un aceite puede ser adecuado para lubricar a bajas temperaturas e inadecuado para las altas. También puede ocurrir que, a bajas temperaturas, el carbón contenido en el aceite se mantenga en dispersión y se aglomere al elevarse.

Para la ejecución del ensayo de la gota de aceite se utilizó una plaqueta de vidrio sobre la cual se colocó un papel de filtro y con un gotero se depositaron en él dos gotas del lubricante en estudio. Se sometió a un proceso de secado durante 48 horas y luego de observar detenidamente su evolución, se interpretó que:

En la estructura de ambas manchas a 20 °C, ver figura 2.6, no se observa la zona central o núcleo (zona A), apareciendo solo la zona de difusión (zona B) y la traslúcida (zona C), lo que hace concluir que el aceite posee buen poder detergente.

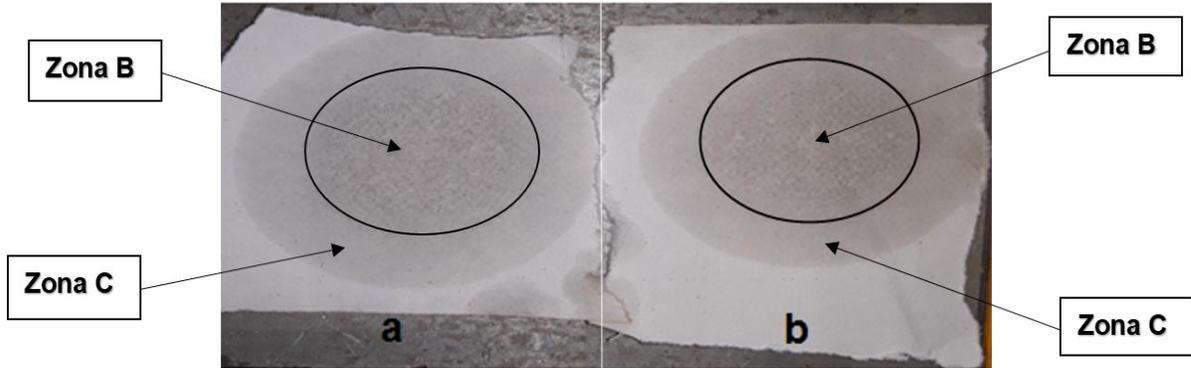


Figura 2.6 Prueba de la mancha a 20 °C, aceite nuevo (a) y usado (b). Fuente: Elaboración propia
 Analizando el factor de capacidad dispersante (FCD) se determina la detergencia del aceite y este se calcula según Borjas and Pérez (2016) por la fórmula siguiente:

$$FCD = 1 - \frac{d_n^2}{D_{zd}^2} \geq 0,3 \quad (2.1)$$

Donde:

d_n : diámetro medio del núcleo de la mancha.

D_{zd} : diámetro medio de la zona de difusión.

Resultados de la mancha a 20 °C.

Aceite nuevo:

d: (40,5) mm

D: (61,5) mm

$$FCD = 1 - \frac{d^2}{D^2} \geq 0,3$$

$$FCD = 1 - \frac{40,5^2}{61,5^2} \geq 0,3$$

$$FCD = 0,566 \geq 0,3$$

Aceite usado:

d: (37,5) mm

D: (60,5) mm

$$FCD = 1 - \frac{d^2}{D^2} \geq 0,3$$

$$FCD = 1 - \frac{37,5^2}{60,5^2} \geq 0,3$$

$$FCD = 0,616 \geq 0,3$$

El FCD para ambos aceites es mayor que 0,3; por tanto se aconseja proseguir con su uso.

2.3 Análisis del lubricante realizado por la Empresa CUBALUB.

Para aprobar y certificar las pruebas realizadas al aceite en el taller de mantenimiento de la Universidad de Holguín, fue efectuado en el Laboratorio de control de CUBALUB en la provincia La Habana un análisis de muestreo al lubricante (ver Anexo 6 y 7), obteniendo los siguientes resultados en los ensayos:

- Ensayo de agua por destilación bajo la norma (ASTM D 95): se obtuvo menos del 0,05 % de contenido de agua, tanto para el aceite nuevo como para el usado.
- Ensayo de viscosidad bajo la norma (ASTMD 445): se obtuvo un resultado de viscosidad cinemática de 35,40 mm²/s a 100 °C y 335,5 mm²/s a 40 °C, para el aceite usado.

Para este caso, el diplomante procedió a calcular el porcentaje que representan los valores de viscosidad obtenidos en el estudio para el aceite usado, aplicando las siguientes ecuaciones.

$$\text{Aceite usado a } 40 \text{ }^\circ\text{C} = \frac{V_{calculada} - V_{fabricante}}{V_{fabricante}} * 100 \quad (2.2)$$

$$\text{Aceite usado a } 40 \text{ }^\circ\text{C} = \frac{335,5 \text{ mm}^2/\text{s} - 320 \text{ mm}^2/\text{s}}{320 \text{ mm}^2/\text{s}} * 100$$

$$\text{Aceite usado a } 40 \text{ }^\circ\text{C} = 4,84 \%$$

$$\text{Aceite usado a } 100 \text{ }^\circ\text{C} = \frac{V_{calculada} - V_{fabricante}}{V_{fabricante}} * 100 \quad (2.3)$$

$$\text{Aceite usado a } 100 \text{ }^\circ\text{C} = \frac{35,40 \text{ mm}^2/\text{s} - 35 \text{ mm}^2/\text{s}}{35 \text{ mm}^2/\text{s}} * 100$$

$$\text{Aceite usado a } 100 \text{ }^\circ\text{C} = 1,14 \%$$

Según los límites recomendados para los aceites de multiplicadoras (ver Anexo1) y teniendo en cuenta los resultados alcanzados, el diplomante concluye que el cambio en los valores obtenidos se encuentran en un rango aceptable, es decir por debajo del 10 % para temperaturas del aceite lubricante entre (40-100) °C.

- Ensayo para determinar el número ácido bajo la norma (ASTM D974): se obtuvo un índice de 0,813 mg KOH/g para el aceite nuevo y de 1,510 mg KOH/g para el usado,

que indica una diferencia de 0,70 respecto al nuevo, y confirma que este parámetro químico debe comenzar a vigilarse periódicamente, pues se interpreta como un comienzo de oxidación en el lubricante con un valor cercano a los criterios de peligro que inician cuando el índice de acidez del lubricante alcanza un valor de 1 respecto al nuevo.

- Ensayo para determinar la presencia y concentración de elementos aditivos mediante espectrometría de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente, bajo la norma (ASTM D4951): se encuentran en un rango normal.
- Ensayo para determinar la presencia y concentración de metales de desgaste y contaminantes mediante espectrometría de emisión atómica por electrodo de disco giratorio, bajo la norma (ASTM D6595): se encuentran en un rango normal.

El diplomante manifiesta que los resultados derivados de los ensayos realizados por CUBALUB son similares a los obtenidos mediante las pruebas realizadas en la Universidad de Holguín, lo que permite afirmar que el aceite usado está en parámetros aceptables para continuar en operación y en el caso del estado técnico de la máquina, se detectaron contenido de partículas de hierro (23,23 ppm), que no superan los valores condenatorios, pero dan indicios de un cierto nivel de desgaste en engranes o rodamientos, que pueden influir en las constantes alarmas por altas temperaturas en la multiplicadora.

En tareas de mantenimiento realizadas en conjunto con la toma de muestra del lubricante se detectaron gran suciedad en el interior del radiador de aceite, provocando así un ineficiente enfriamiento del lubricante al circular por este, también se encontró una alta desalineación del generador con respecto a la multiplicadora, influyendo también en los altos valores de temperaturas registrados tanto en la caja de engranajes como en el generador. El diplomante plantea que es necesario verificar la correcta alineación del generador con respecto a la multiplicadora siempre que ocurra una parada brusca del equipo, así como la revisión de la fijación y sistemas de amortiguación tanto de la multiplicadora como del generador, además de la limpieza de los radiadores de aceite.

2.4 Cálculo de la frecuencia de inspección del análisis de lubricantes.

Considerando que el manual del fabricante no establece la frecuencia con que se debe realizar una inspección al lubricante, el diplomante deja plasmado mediante cálculos esa frecuencia, para tenerlo en cuenta en su futura implementación.

Partiendo de la metodología presentada por Páramo (2020), donde se desarrolla un modelo matemático para calcular la frecuencia de muestreo de una inspección predictiva, a continuación, se hará empleo de su relación de ecuaciones, apoyado en el software de cálculo que brinda el autor, para determinar cada que tiempo debe realizarse una inspección por análisis de aceite en las multiplicadoras del Parque Eólico Gibara 1.

Para determinar la frecuencia de inspección (f), se debe calcular primeramente el valor del intervalo entre inspecciones predictivas (I), por tanto:

$$I = C * F * A \quad (2.4)$$

Donde:

- C es el factor de costo.
- F es el factor de falla.
- A es el factor de ajuste.

Factor de Costo

Se define como factor de costo, al costo de una inspección predictiva dividido entre el costo en que se incurre por no detectar la falla en el equipo. Esta relación de factor de costo es la siguiente:

$$C = \frac{C_i}{C_f} \quad (2.5)$$

Donde:

- C_i es el costo de una inspección predictiva (en unidades monetarias).
- C_f es el costo en que se incurre por no detectar la falla (en unidades monetarias).

Para obtener el factor de costo de una inspección por análisis de aceite, se tuvo en cuenta las condiciones de infraestructura existentes actualmente en los aerogeneradores estudiados, donde no existen los medios, recursos y conocimientos necesarios para realizar este tipo de diagnóstico, así como el equipamiento primordial para realizar grandes intervenciones (reparaciones o desmontajes).

Por lo que el valor de costo de un examen por análisis de aceite se tomó de los laboratorios de CUBALUB, el de reparación de una multiplicadora al no realizarse hasta hoy este tipo de operación en el país, se adquirió del precio promedio actual en el mercado internacional, específicamente de un estudio realizado en el 2018 por la empresa española Atten2, que brinda tal información en su link de página web <https://blog.atten2.com/c%C3%B3mo-puede-afectar-el-estado-de-la-multiplicadora-en-la->

vida-de-un aerogenerador y el costo de indisponibilidad de operación se obtuvo de datos que brinda San Juan Sambert en su tesis de grado “Evaluación del aporte energético del Parque Eólico de Gibara al Sistema Energético Nacional” del año 2011. Cada indicador se presenta en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Indicadores de costo en CUP (Peso cubano) y USD (Dólar americano).

Fuente: Elaboración propia.

Indicadores de costo	Precio en CUP	Precio en USD
Costo por inspección predictiva	\$ 20 000.00	\$ 800.00
Costo de reparación de una multiplicadora	\$ 840 000.00	\$ 33 600.00
Costo de indisponibilidad de operación	\$ 74 754.00	\$ 2 990.00

$$Cf = Cr + Cid \quad (2.6)$$

Donde:

- Cr es el costo de reparación (incluye la mano de obra).
- Cid es el costo de indisponibilidad.

$$Cf = 840\,000.00 \text{ CUP} + 74\,754.00 \text{ CUP}$$

$$Cf = 914\,754 \text{ CUP}$$

Entonces, desarrollando la ecuación 2.5 de factor de costo, se concluye que:

$$C = \frac{Ci}{Cf}$$

$$C = \frac{20\,000 \text{ CUP}}{914\,754 \text{ CUP}}$$

$$C = 0,022$$

Factor de Falla

Se define como factor de falla a la cantidad de fallas que pueden detectarse con la inspección predictiva dividida entre la tasa de fallas. La relación del factor de falla se expresa en años / inspección y se formula como:

$$F = \frac{\#Fi}{\lambda} \quad (2.7)$$

Donde:

- #Fi es la cantidad de fallas que pueden ser detectadas utilizando la tecnología predictiva (expresada en fallas por inspección).
- λ es la tasa de fallas presentada por el equipo, y que, además podrían ser detectadas por la tecnología predictiva a ser aplicada (expresada en fallas por año).

Para este caso se tomaron una cantidad de 20 fallos por inspección, que pueden ser detectados en un análisis de aceite en multiplicadoras, además basándose en las investigaciones realizadas en los parques eólicos de Gibara y en los registros de incidencias de estos equipos relacionados con fallas en la multiplicadora en el periodo 2014-2017, se tomó una tasa de fallo de 1 falla/año.

$$F = \frac{\#Fi}{\lambda}$$

$$F = \frac{20 \text{ fallas / inspección}}{1 \text{ falla / año}}$$

$$F = 20 \text{ años / inspección}$$

Factor de Ajuste

Para el análisis de lubricante, una vez calculado el producto entre el factor de costo y el factor de falla, se procede a multiplicarlo por un factor de ajuste (A). El cual estará basado en la probabilidad de ocurrencia de más de 0 fallas en un año, utilizando λ (tasa de fallas expresada como fallas por año).

Para calcular este factor se utiliza la función matemática de probabilidad de Poisson: logaritmo natural multiplicada por -1 ($-\ln$). La cual, se comporta de una manera muy parecida al criterio gerencial de incremento o decremento del intervalo de inspección al tomar en cuenta la probabilidad de ocurrencia de más de 0 fallas en un año. A mayor probabilidad de ocurrencia, el intervalo de inspección se reducirá de forma exponencial.

$$A = -\ln[1 - \text{EXP}(-\lambda)] \quad (2.8)$$

$$A = -\ln[1 - \text{EXP}(-1)]$$

$$A = 0,459$$

Por tanto, el valor del intervalo entre inspecciones (I) será:

$$I = C * F * A$$

$$I = 0,022 * 20 \text{ años / inspección} * 0,459$$

$$I = 0,202 \text{ años / inspección}$$

Entonces, para definir la frecuencia de inspección por análisis de aceite (f), solo debemos calcular el inverso del intervalo de inspección.

$$F = \frac{1}{I} \quad (2.9)$$

$$F = \frac{1}{0,202 \text{ años / inspección}}$$

$F = 5$ inspecciones / año

El resultado de la fórmula 2.9 plantea que se pueden realizar 5 inspecciones al año, es decir cada aproximadamente 1 752 horas de servicio realizar un análisis de lubricantes, sin embargo teniendo en cuenta las características complejas de las turbinas eólicas y los inconvenientes para el acceso por parte del personal de mantenimiento a los mismos, así como los resultados obtenidos tras el análisis de lubricante realizado en la presente investigación, el autor de la misma propone establecer y aumentar esta frecuencia a 2 928 horas (o sea, cada 4 meses = 3 muestreos por año). Esto permite que, cuando haya que cambiar el aceite (36 meses), se hayan efectuado 9 tomas de muestra desde que se introdujo en su estado nuevo (sin uso).

Esto puede sufrir cambios en el tiempo, es decir no es una frecuencia de inspección fija que deberá aplicarse siempre, pues depende del incremento o disminución de la tasa de fallos y de un largo historial de muestreo.

2.5 Valoración económica y ambiental de la propuesta planteada.

El Parque Eólico Gibara 1 es una alternativa de fuente de energía renovable y abundante que no producen emisiones contaminantes a la atmósfera, por lo cual no contribuyen al efecto invernadero. Su impacto visual es considerado atractivo para los extranjeros y para el pueblo gibareño. Por otra parte, generan cierto ruido ocasionado por el movimiento de las palas en el aire y en algunos casos proveniente de las partes mecánicas de la turbina.

Su mayor contribución al medio ambiente es la sustitución de combustibles fósiles para generar energía limpia, pues la quema de estos trae consigo emisiones de CO₂. Desde su puesta en marcha en 2008 hasta el 2018, se han sustituido 24 949,70 t de combustible que representa un ahorro de 648 692 200.00 CUP y 25 947 688.00 USD, además se puede afirmar que:

A partir de la cantidad de fallas que se registran en las multiplicadoras desde el año (2014-2021) y teniendo en cuenta el tiempo medio para reparar dichas fallas y que la generación promedio diaria de un aerogenerador es de 23,3 MWh/d, la siguiente tabla refleja mediante valores numéricos, los daños económicos y medioambientales que representaría para el país la parada o fuera de servicio de estos equipos.

Fallos en las multiplicadoras (2014-2021).	Tiempo medio para reparar el fallo (días).	kWh no generados	Combustible consumido por no generación (t).	Costo de generación perdida (USD).
43	3	3 005 700	751,425	781 482.00

CONCLUSIONES

1. Se propuso el empleo del análisis de aceite como técnica de diagnóstico para evaluar la condición del lubricante RENOLIN UNISYN CLP 320.
2. Se comprobó que la utilización de las pruebas rápidas con apoyo del muestreo en el laboratorio, es efectivo como análisis de lubricante para aplicar a las multiplicadoras del Parque Eólico Gibara 1.
3. Se demostró que el lubricante en uso está en condiciones para continuar en servicio, y en cuanto al estado técnico de la máquina se detectaron presencia de partículas de desgaste (hierro) que alertan sobre un posible nivel de deterioro en los engranes o rodamientos de la multiplicadora, que pueden estar provocando las constantes alarmas por altas temperaturas en el equipo.
4. Se determinó que la frecuencia de inspección del análisis de lubricante se debe realizar cada 4 meses, es decir aproximadamente cada 2 928 horas de servicio.

RECOMENDACIONES

1. Implementar el análisis de lubricantes en el plan de mantenimiento del Parque Eólico Gibara, llevando un control estricto de las horas de operación del aceite en cuestión.
2. Desarrollar un plan de superación y capacitación de operadores y técnicos del Parque Eólico Gibara en el uso de técnicas de diagnóstico para su futura implementación.
3. Realizar una inspección visual o por boroscopia a los elementos mecánicos internos de la multiplicadora.
4. Establecer con mayor frecuencia las tareas de mantenimiento relacionadas con limpieza de radiadores de aceite, alineación y sistemas de amortiguación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albarracín, H. R. G., & Pesántez, O. M. Á. (2020). Análisis de la degradación y vida útil del lubricante motor, en un vehículo modelo ACTROS 3353S mediante ensayos de viscosidad y TBN.
- Altmann, C. (2005). El análisis de aceite como herramienta del mantenimiento proactivo en flotas de maquinaria pesada.
- Ares, A. F. (2016). Diseño mecánico de los elementos de transmisión de un aerogenerador de 1,3 MW.
- ASTM D4951. (2014). Standard Test Method for Determination of Additive Elements in Lubricating Oils by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry.
- ASTM D6595. (2016). Standard Test Method for Determination of Wear Metals and Contaminants in Used Lubricating Oils or Used Hydraulic Fluids by Rotating Disc Electrode Atomic Emission Spectrometry.
- ASTM D 95. (2015). Informe de laboratorio No.1 “Determinación del contenido de agua en un crudo por destilación”.
- Benlloch, J. M. (1991). “Lubricantes y Lubricación Aplicada”.
- Bilbao, M. (2005). Ensayo de la mancha.
- Borjas, C. M. B., & Pérez, F. M. M. (2016). Diagnóstico a través del aceite a motores de combustión interna.
- Camacho, P. A. C., & Álvarez, M. D. L. (2016). Plan de monitoreo y control a través de los análisis de aceite para motor y transmisión de vehículos articulados mercedes para la empresa sistemas operativos móviles - SOMOS K. S. A.
- Cárcamo, R. A. V. (2010). Estudio, diseño y construcción de un prototipo de generador eólico para el sector costero de la XIV Región, en Corral.
- Carpio, L. B., & Granizo, V. G. (2015). Detección temprana de fallas en motores de combustión interna a diesel mediante la técnica de análisis de aceite.
- Carreras, P. A. M. (2017). Plan de mantenimiento de un aerogenerador offshore.
- Castillo, Y. G. L. (2017). Estudio de fallos de los aerogeneradores del parque eólico gibara 1 (GAMESA).
- Corral, A. P. (2016). Diseño de la transmisión de un aerogenerador de 1,5 MW. .
- Chaudri, Y., & Martínez, J. G. (2015). Alcances de la implementación de nuevas técnicas de análisis en los programas de mantenimiento predictivo – proactivo en la industria.
- Delgado, J. C., Saldivia, F., & Fygueroa, S. (2014). Sistema para la determinación de la degradación del lubricante basado en el tratamiento digital de manchas de aceite de motores diesel.
- Estrada, Y. A. G. (2013). Contribución al desarrollo y mejora para la cuantificación de la degradación en aceites lubricantes usados de MCIA a través de la técnica de espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR).
- Estupiñan, E. A., & Saavedra, P. N. (2012). Alcances de la implementación de nuevas técnicas de análisis en los programas de mantenimiento predictivo – proactivo en la industria.
- Fernández, J. L. (2010). El análisis de lubricantes como herramienta del diagnóstico técnico.
- Font, P. L. P. (2017). Estudio causal de la rotura del cable de retención de puntas de palas de los aerogeneradores modelo S50 – 750 DEL Parque Eólico Gibara 2.

- Fraguela, F. (2018). Investigación sobre variables predictivas del mantenimiento de parques eólicos.
- FUCHS LUBRICANTES, S. A. U. (2011). Lubricantes Industriales.
- Gamesa Eólica S.A. (2005). Especificaciones técnicas de aerogeneradores G52 - G58.
- Garrido, S. G. (2018). RENOVETEC: Inspecciones boroscópicas en aerogeneradores
- Heras, J. C. Á. (2017). Determinación del desgaste de los elementos mecánicos del motor mediante el análisis del aceite usado.
- Hernández, F. A. A., & Canales, O. Y. M. (2015). Propuesta de diseño para el laboratorio de pruebas para transformadores de distribución y potencia, para la Escuela de Ingeniería Eléctrica.
- Hidalgo, E. R., & Pelegrino, E. G. (2014). Monitorización de partículas metálicas en lubricantes usados a través de la magnetización.
- IRIM. (2015a). El análisis de aceites en multiplicadoras.
- IRIM. (2015b). Inspecciones boroscópicas en multiplicadoras.
- Jomarrón, K. O. R. (2014). Construcción y puesta en marcha de una instalación para la recuperación del combustible diesel empleado en la limpieza de los filtros de los grupos electrógenos MTU de la serie 4000.
- Leyva, H. A. P. (2017). Evaluación de los costos de operación y mantenimiento de los parques eólicos de gibara.
- Mayordomo, C. M. (2015). Análisis de la fiabilidad y disponibilidad de los aerogeneradores.
- Mendoza, J. A. G. (2017). Plan de mantenimiento basado en análisis de aceite para mejorar la disponibilidad de la Excavadora Caterpillar 390FL de STRACON GYM – Cajamarca.
- Microsoft Excel. (2013). Aplicación de hojas de cálculo.
- Montoya, L. F. V. (2011). Mantenimiento predictivo aplicado a máquinas sometidas a velocidad y carga variables mediante análisis de órdenes.
- Mora, Ó. D. (2008). Diagnóstico y control del desgaste en motores diésel.
- Moreno, M. P. C. (2007). Análisis y ensayo de sistemas eólicos ante huecos de tensión.
- Nie, M., & Wang, L. (2013). Review of Condition Monitoring and Fault Diagnosis Technologies for Wind Turbine Gearbox. *Procedia CIRP*, 11, 287-290. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.07.018>
- Olarte, W., Botero, M., & Cañon, B. (2010). Técnicas de mantenimiento predictivo utilizadas en la industria.
- OPEXenergy. (2015). Tren de Potencia y Multiplicador.
- Páramo, J. (2020). Cálculo de frecuencia de muestreo en análisis de aceites y otras tecnologías predictivas.
- Pariante, C. A. J. (2016). Análisis de fallos de Parques Eólicos.
- Pazo, D. M. (2017). Análisis de mantenimiento de un aerogenerador de eje horizontal.
- Puerta, J. A. P. (2019). Boroscopio, herramienta predictiva para el sector eólico.
- Quintero, N. A. (2016). Tecnología y análisis de aceite para asegurar la eficiencia de lubricación.
- Ramírez, L. A. L. (2015). Plan de actividades para minimizar la corrosión en el parque eólico gibara I.
- Ramos, D. V. (2016). Evaluación en laboratorio de un sensor para el monitorizado on-line del desgaste en multiplicadoras de aerogenerador.
- Robles, K. G. (2017). Implementación de un sistema de diagnóstico por monitoreo de vibraciones en la caja multiplicadora y el generador para un procedimiento de toma

- de decisiones por redes neuronales para el aerogenerador g52/850 número 5 del Parque Eólico los Santos.
- Ruano, M. D. S. (2005). Análisis para la instalación y mantenimiento de aerogeneradores.
- Rueda, M. (2005). Tutorial de ferrografía directa, análisis de elementos presentes y ferrografía analítica.
- Ruiz, A. B. (2018). Análisis estadístico de la relación de la vida útil de multiplicadoras con la fórmula de la disponibilidad de turbinas de gran potencia.
- Sainz, R. T. (2019). Evaluación de las causas de fallas y sus soluciones, en la caja multiplicadora del aerogenerador GOLDWIND S50/750 mediante el análisis del árbol de fallas.
- Salgado, S. J. F., Rico, J. C. S., & Contreras, G. G. M. (2009). Mantenimiento predictivo de motores mediante analisis de aceite.
- Sambert, R. M. S. J. (2011). Evaluación del aporte energético del Parque Eólico de Gibara al Sistema Energético Nacional.
- Sanabria, J. C. D., Salgado, S. d. J. F., & López, S. E. S. (2016). Diseño de un equipo de pruebas rápidas para ceites usados.
- Sentinel Lubricants Corp. (2018). ¿Qué es la Ferrografía Analítica?
- Singh, D. K., Kurien, J., & Villayamore, A. (2020). Study and analysis of wind turbine gearbox lubrication failure and its mitigation process. *Materials Today: Proceedings*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.047>
- Software EndNote X7. Gestor de referencias bibliográficas.
- Soutullo, R. G. (2018). Análisis de Lubricantes. Detección de Partículas Metálicas.
- Tekniker. (2002). Mantenimiento predictivo- - proactivo a traves del analisis del aceite.
- Terradillos, J., Bilbao, M., Ciria, J. I., & Málaga, A. (2005). Análisis del aceite como herramienta de mejora del comportamiento de las multiplicadoras de aerogeneradores. Principales problemas detectados a través del lubricante (Parte II).
- Terradillos, J., & Ciria, J. I. (2013). Análisis del aceite como herramienta de mejora del comportamiento de las multiplicadoras de aerogeneradores. Principales problemas detectados a través del lubricante.
- Trujillo, G. (2016). Integrando el Análisis de Aceite con el Análisis de Vibración.
- Turrueñas, B. R. (2017). Índices de funcionalidad del Parque Eólico Gibara II.
- Widman, R. (2005). La contaminación del aceite por agua y su detección en campo.

BIBLIOGRAFÍAS

- Centro de Escritura Javeriano. (2019). Normas APA, sexta edición.
- Gamesa Eólica S.A. (2003). Características y funcionamiento general de aerogeneradores G52-850.
- Gamesa Eólica S.A. (2005). Instrucciones de mantenimiento preventivo para aerogeneradores G52-850.
- HYSOL. (2012). Informe de ferrografía analítica.
- Isaa, M. C., Yusoffa, N. H. N., Naina, H., Yatia, M. S. D., Muhammada, M. M., & Nor, I. M. (2013). Ferrographic analysis of wear particles of various machinery systems of a commercial marine ship. doi: doi: 10.1016/j.proeng.2013.12.190
- Levi, O., & Eliaz, N. (2009). Failure analysis and condition monitoring of an open-loop oil system using ferrography. doi: DOI 10.1007/s11249-009-9454-2
- Milán, E. L. (2018). Recomendaciones metodológicas para la elaboración del informe de los trabajos de diploma.
- Poley, J. (2009). 21st century oil analysis. *Tribology and Lubrication Technology*, 65(3), 94-95.
- Ramos, D. V. (2016). Evaluación en laboratorio de un sensor para el monitorizado on-line del desgaste en multiplicadoras de aerogenerador.

ANEXOS

Anexo 1. Programa de análisis de aceite para multiplicadoras y valores límite recomendados. Fuente: (Terradillos et al., 2005)

Parámetro	Rutina	Valor normal	Valor vigilar	Valor peligro
Viscosidad a 40 °C	Normal	Aceite nuevo	+/-10 %	+/-15 %
Viscosidad a 100 °C	Normal	Aceite nuevo	+/-10 %	+/-15 %
Índice de acidez	Normal	Aceite nuevo	0,2 respecto al aceite nuevo	1 respecto al aceite nuevo
Índice de viscosidad	Normal	Aceite nuevo	+/-10 respecto aceite nuevo	+/- 15 respecto aceite nuevo
Agua (ASTMD6304)	Normal	<50 ppm	200 ppm	400 ppm
Nitración (FTIR)	Normal	<1 abs/cm	<5 abs/cm	<10 abs/cm
Oxidación(FTIR)	Normal	<1 abs/cm	<5 abs/cm	<10 abs/cm
Contaje de partículas	Normal	17/15/12	19/17/14	20/18/15
PQI	Normal	50	80	>80
Silicio (ASTMD5185)	Normal	<10 ppm	<20 ppm	>20 ppm
Hierro (ASTMD5185)	Normal	<40 ppm	<60 ppm	>60 ppm
Cobre (ASTMD5185)	Normal	<10 ppm	<20 ppm	>20 ppm
Cromo (ASTMD5185)	Normal	<10 ppm	<20 ppm	>20 ppm
Plomo(ASTMD5185)	Normal	<10 ppm	<20 ppm	>20 ppm
Estaño(ASTMD5185)	Normal	<10 ppm	<20 ppm	>20 ppm
Aluminio(ASTMD5185)	Normal	<10 ppm	<20 ppm	>20 ppm
Niquel (ASTMD5185)	Normal	<10 ppm	<20 ppm	>20 ppm
Metales aditivación (ASTMD5185)	Normal	>50 % valor inicial	<50 %	<40 %
Espuma	Excepcional	75/10 75/10 75/10	100/10 200/20 100/10	>100/10 >200/20 >100/10
Aire retenido	Excepcional	<15 min.	+20 % aceite nuevo	+25 % aceite nuevo
Vida remanente (RULER)	Excepcional	>50 % aceite nuevo	>25 % aceite nuevo	<25 % aceite nuevo
Ferrografía analítica	Excepcional	No partículas		

Anexo 2. Norma ISO 4406. Método para codificar el nivel de contaminación por partículas sólidas.

Código de Limpieza ISO 4406:1999

Código de Rango	Partículas por 100 ml de fluido	
	Más de	Hasta y incluyendo
24	8,000,000	16,000,000
23	4,000,000	8,000,000
22	2,000,000	4,000,000
21	1,000,000	2,000,000
20	500,000	1,000,000
19	250,000	500,000
18	130,000	250,000
17	64,000	130,000
16	32,000	64,000
15	16,000	32,000
14	8,000	16,000
13	4,000	8,000
12	2,000	4,000
11	1,000	2,000
10	500	1,000
9	250	500
8	130	250
7	64	130
6	32	64

Anexo 3. Proceso de agua por crepitación.

Fuente: (Albarracín & Pesántez, 2020)

	OBSERVACIÓN	ILUSTRACIÓN	CANTIDAD APROXIMADA DE AGUA
a)	No hay cambio visible o audible.		No hay agua ni emulsificada
b)	Se produce burbujas de aproximadamente 0.5mm y desaparecen rápidamente.		0.05-0.1% 500-1000ppm
c)	Se producen burbujas de aproximadamente 2 mm juntas en el centro que crecen a 4 mm desaparecen rápidamente.		0.1-0.2% 1000-2000ppm
d)	Se producen burbujas de 2 a 3 mm creciendo a 4 mm el proceso se repite, posible burbujeo violento y crepitación audible.		0.2 y mas >2000 ppm

Anexo 4. Mediciones para la viscosidad cinemática del aceite nuevo.

Fuente: Elaboración propia

Prueba de viscosidad (aceite nuevo)													
No (esferas)	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1	2	1.75	1.53	1.31	1.08	0.95	0.82	0.71	0.61	0.5	0.41	0.3	0.24
2	2	1.75	1.53	1.31	1.08	0.95	0.8	0.71	0.61	0.5	0.41	0.31	0.24
3	2	1.75	1.54	1.31	1.08	0.95	0.8	0.72	0.62	0.52	0.41	0.31	0.24
4	2.1	1.76	1.54	1.3	1.07	0.94	0.8	0.72	0.62	0.5	0.4	0.31	0.24
5	2.1	1.76	1.54	1.3	1.07	0.94	0.81	0.71	0.61	0.51	0.4	0.3	0.23
6	2.12	1.75	1.54	1.3	1.08	0.95	0.81	0.71	0.61	0.51	0.41	0.3	0.23
7	2.11	1.75	1.53	1.31	1.08	0.95	0.81	0.72	0.61	0.51	0.41	0.31	0.23
8	2.11	1.75	1.54	1.31	1.07	0.94	0.82	0.71	0.6	0.51	0.41	0.31	0.23
9	2.11	1.76	1.54	1.3	1.07	0.95	0.8	0.71	0.6	0.52	0.4	0.3	0.23
10	2.1	1.75	1.53	1.31	1.08	0.94	0.8	0.72	0.62	0.51	0.4	0.31	0.23
Promedio del tiempo	2.08	1.75	1.54	1.31	1.08	0.95	0.81	0.71	0.61	0.51	0.41	0.31	0.23
Promedio de Velocidad	0.10	0.11	0.13	0.15	0.19	0.21	0.25	0.28	0.33	0.39	0.49	0.65	0.85

Anexo 5. Mediciones para la viscosidad cinemática del aceite usado.

Fuente: Elaboración propia

Prueba de viscosidad (aceite usado)													
No (esferas)	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1	2.14	1.8	1.5	1.28	1.09	0.95	0.82	0.71	0.604	0.5	0.43	0.34	0.22
2	2.14	1.8	1.5	1.28	1.09	0.94	0.82	0.71	0.604	0.5	0.43	0.34	0.22
3	2.13	1.81	1.51	1.3	1.08	0.94	0.83	0.71	0.604	0.5	0.42	0.35	0.23
4	2.13	1.81	1.51	1.3	1.08	0.92	0.8	0.7	0.698	0.51	0.42	0.351	0.23
5	2.13	1.81	1.51	1.3	1.07	0.92	0.8	0.7	0.698	0.51	0.42	0.351	0.23
6	2.16	1.82	1.5	1.31	1.07	0.94	0.8	0.73	0.602	0.51	0.44	0.351	0.24
7	2.16	1.81	1.52	1.31	1.09	0.91	0.8	0.73	0.602	0.52	0.44	0.352	0.24
8	2.16	1.83	1.53	1.31	1.07	0.91	0.81	0.72	0.602	0.52	0.44	0.33	0.24
9	2.15	1.83	1.53	1.29	1.09	0.93	0.81	0.72	0.602	0.52	0.423	0.33	0.22
10	2.15	1.83	1.53	1.29	1.08	0.93	0.81	0.72	0.606	0.53	0.423	0.33	0.22
Promedio de tiempo	2.15	1.82	1.51	1.30	1.08	0.93	0.81	0.72	0.62	0.51	0.43	0.34	0.23
Promedio de Velocidad	0.09	0.11	0.13	0.15	0.19	0.22	0.25	0.28	0.32	0.39	0.47	0.58	0.87

Anexo 6. Informe de ensayos realizados por CUBALUB al lubricante nuevo.



EMPRESA CUBANA DE LUBRICANTES

CUBALUB	REGISTRO DE CALIDAD INFORME DE ENSAYOS.	RCIH-07-02-01	
Registro. 27		Fecha 07.06.21	
		Informe No.03	
Empresa Cubana de Lubricantes (CUBALUB) – Laboratorio de Control Vía Blanca y Belot, Municipio Regla, La Habana			
Cliente: (UEBC): Holguín			
Lugar: UEB Fuentes Renovables de Energía			
Muestreo realizado según: ASTMD 4057			
Identificación: Renolin Unisyn CLP-320			
Datos del Ítem: GAMESA G52-850 kW No:3 (No:2) (Nuevo)			
Fecha de recepción: 03.06.21			
Fecha del ensayo: 04.06.21			
ENSAYOS A REALIZAR			
Denominación del ensayo	Código de la norma	Incertidumbre	Resultados (unidad de medida)
Agua por Destilación	ASTMD 95	-	<0.05 % v/v
Índice de Viscosidad	ASTMD 2270		153.2
Viscosidad a 100 °C	ASTMD 445	±0.1011	35.49 cSt
Viscosidad a 40 °C	ASTMD 445	±0.2610	329.7 cSt
Temperatura de Inflamación	ASTMD 92	±9.3041	240 °C
Separabilidad del Agua a 82.2°C	ASTMD1401	-	0.0.80 en 30'
Numero de Neutralización	ASTMD 974	-	0.813 mg KOH/g
Temperatura de Fluidéz	ASTMD 97	-	-30 °C
Contenido de Zinc	ASTMD 4951		0.440 ppm
Contenido de Calcio	ASTMD 4951		7.326 ppm
Contenido de Fosforo	ASTMD 4951		129.08 ppm
Contenido de Sílice	ASTMD6595	±1.49	0.573 ppm
Contenido de Magnesio	ASTMD6595	±1.37	0.550 ppm
Contenido de Boro	ASTMD6595	±2.79	17.762 ppm
Observaciones:			
Estos resultados se corresponden solamente con los ítems ensayados. El laboratorio no se responsabiliza con el muestreo. Los resultados son la media aritmética de dos determinaciones y la incertidumbre es incertidumbre expandida con un 95% de confianza (k=2). Toda la información correspondiente a estos ensayos está a disposición del cliente.			
 Elaborador por: Daylin León Gutiérrez. Especialista C en Gestión de la Calidad		 Aprobado por: Rebeca Berea Oropesa Especialista C en Gestión de la Calidad (EP)	
"No se debe reproducir el informe del ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita del Laboratorio de Control de la UEBP Habana".			

Anexo 7. Informe de ensayos realizados por CUBALUB al lubricante usado.



EMPRESA CUBANA DE LUBRICANTES

CUBALUB	REGISTRO DE CALIDAD INFORME DE ENSAYOS.	RCIH-07-02-01	
Registro. 26		Fecha 07.06.21	Informe No.02
Empresa Cubana de Lubricantes (CUBALUB) – Laboratorio de Control Vía Blanca y Belot, Municipio Regla, La Habana			
Cliente: (UEBC): Holguín			
Lugar: UEB Fuentes Renovables de Energía			
Muestreo realizado según: ASTM D 4057			
Identificación: Renolin Unisyn CLP-320			
Datos del Ítem: GAMESA G52-850 kW No:3 (No:1) (25382 Hrs)			
Fecha de recepción: 03.06.21			
Fecha del ensayo: 04.06.21			
ENSAYOS A REALIZAR			
Denominación del ensayo	Código de la norma	Incertidumbre	Resultados (unidad de medida)
Agua por Destilación	ASTMD 95	-	<0.05 % v/v
Índice de Viscosidad	ASTMD 2270		151.00
Viscosidad a 100 °C	ASTMD 445	±0.1011	35.40 cSt
Viscosidad a 40 °C	ASTMD 445	±0.2610	335.5 cSt
Temperatura de Inflamación	ASTMD 92	±9.3041	254 °C
Separabilidad del Agua a 82.2°C	ASTMD1401	-	0.0.80 en 30'
Numero de Neutralización	ASTMD 974	-	1.510 mg KOH/g
Temperatura de Fluidiez	ASTMD 97	-	-30 °C
Contenido de Zinc	ASTMD 4951		22.14 ppm
Contenido de Calcio	ASTMD 4951		7.047 ppm
Contenido de Fosforo	ASTMD 4951		140.39 ppm
Contenido de Sílice	ASTMD6595	±1.49	0.297 ppm
Contenido de Cobre	ASTMD6595	±2.12	0.165 ppm
Contenido de Hierro	ASTMD6595	±1.93	23.23 ppm
Contenido de Plomo	ASTMD6595	±1.13	0.000 ppm
Contenido de Cromo	ASTMD6595	±1.73	0.252 ppm
Contenido de Estaño	ASTMD6595	±1.29	0.000 ppm
Contenido de Aluminio	ASTMD6595	±1.06	0.128 ppm
Contenido de Sodio	ASTMD6595	±3.06	2.140 ppm
Contenido de Níquel	ASTMD6595	±1.54	0.000 ppm
Contenido de Plata	ASTMD6595	±3.10	0.000 ppm
Contenido de Magnesio	ASTMD6595	±1.37	0.130 ppm
Contenido de Boro	ASTMD6595	±2.79	6.52 ppm
Contenido de Vanadio	ASTMD6595	±2.41	0.976 ppm
Contenido de Molibdeno	ASTMD6595	±3.39	0.129 ppm
Contenido de Titanio	ASTMD6595	±1.29	0.000 ppm
Contenido de Manganeso	ASTMD6595	±1.86	0.000 ppm
Contenido de Cadmio	ASTMD6595	±1.77	0.224 ppm
Observaciones:			
Estos resultados se corresponden solamente con los ítems ensayados. El laboratorio no se responsabiliza con el muestreo. Los resultados son la media aritmética de dos determinaciones y la incertidumbre es incertidumbre expandida con un 95% de confianza (k=2). Toda la información correspondiente a estos ensayos está a disposición del cliente.			
 Elaborador por: Daylin León Gutiérrez. Especialista C en Gestión de la Calidad		 Aprobado por: Rebeca Berea Oropesa Especialista C en Gestión de la Calidad (EP)	
"No se debe reproducir el informe del ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita del Laboratorio de Control de la UEBP Habana".			