

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIMI
Facultad de
Ingeniería Mecánica
e Industrial

Departamento de Ingeniería Mecánica

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Estudio de lubricidad en mezclas diesel-biocombustibles

Autor: Rafael Daniel Martínez Boza

Tutor: Dr. Luis Iván Negrín Hernández

Consultante: Ing. Jorge Ernesto Hernández Ordoñez

Santa Clara, junio de 2019
Copyright©UCLV

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIMI
Facultad de
Ingeniería Mecánica
e Industrial

Department of Mechanical Engineering

DIPLOMA THESIS

Title: Lubricity Study in Diesel-Biofuel Blends

Author: Rafael Daniel Martínez Boza

Thesis Director: Dr. Luis Iván Negrín Hernández

Consultant: Ing. Jorge Ernesto Hernández Ordoñez

Santa Clara, June, 2019
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

Resumen

En el presente trabajo se realiza el estudio de lubricidad en tres mezclas diésel-biocombustibles, llamadas como Mezcla 1 compuesta por 28,6 % de diésel, 30 % de aceite y 41,4 % de etanol (28,6-30-41,4), la Mezcla 2 (10-35-55) y la Mezcla 3 (20-40-40). Para el trabajo se toma como referencia la norma ASTM G 133 que describe el método conocido como lineal recíprocante de esfera sobre plano. Para el ensayo se utilizaron parámetros de trabajo que no coinciden con los expuestos en la norma de referencia y que son: temperatura de 25 ± 2 °C, humedad relativa del 60 ± 2 %, frecuencia de 10 Hz, longitud total de deslizamiento 58,8 m, longitud de trabajo de la máquina 7 mm y fuerza aplicada de 25 N. Como resultado de los ensayos se mide la pérdida de masa a partir de la diferencia de peso de las probetas antes y después de realizar los ensayos. Posteriormente se calcula a partir de la pérdida de masa la pérdida de volumen como establece la norma. Finalmente, en el trabajo se concluye que la presencia del aceite en la mezcla aumenta significativamente la lubricidad de la misma, significando un aumento del 5 % de aceite un aumento de alrededor del 30 % de la lubricidad.

Abstract

In the present work, the study of lubricity is carried out in three diesel-biofuel blends, called as Blend 1 composed of 28.6% of diesel, 30% of oil and 41.4% of ethanol (28.6-30-41, 4), Blend 2 (10-35-55) and Blend 3 (20-40-40). For the work, reference is made to the ASTM G 133 standard that describes the method known for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear. For the test, working parameters were used that do not coincide with those stated in the reference standard and that are: temperature of $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$, relative humidity of $60 \pm 2\%$, frequency of 10 Hz, total length of slip 58.8 m, working length of the machine 7 mm and applied force of 25 N. As a result of the tests, the loss of mass is measured from the weight difference of the test pieces before and after the tests. Subsequently, the loss of volume is calculated from the mass loss as established in the standard. Finally in the work it is concluded that the presence of oil in the blends significantly increases the lubricity of the same, meaning an increase of 5% of oil an increase of about 30% of lubricity.

Tabla de contenido

Introducción.....	1
Capítulo I. Generalidades acerca de las mezclas combustibles.....	4
1.1. Panorámica energética mundial	4
1.2. Combustibles alternativos	4
1.2.1. Impacto de los combustibles alternativos sobre el motor	6
1.2.2. Impacto de los combustibles alternativos sobre el motor diésel.....	6
1.2.3. Impacto de las mezclas combustibles en motores de combustión interna	7
1.3. Potencialidades del aceite de higuera como sustancia que posibilite la formulación de mezclas etanol hidratado-diésel.....	7
1.4. Desgaste	8
1.4.1. Definición.....	8
1.4.2. Tipos de desgaste	9
1.5. Lubricantes.....	12
1.5.1. Uso del biodiésel como aditivo para la lubricidad	12
1.6. Estudio de lubricidad en mezclas combustibles usando ensayos tribológicos ...	13
Conclusiones Parciales	16
Capítulo II: Procedimiento para el estudio de lubricidad	17
2.1 Fundamentos teóricos de la práctica de laboratorio.....	17
2.2 Terminología utilizada y definiciones.....	17
2.3 Aplicación de la carga	18
2.4 Significado y uso de la Norma G133-05.....	18
2.5 Descripción del equipamiento	19
2.6 Elementos de instrumentación	20
2.7 Calibración de la máquina de ensayo	21
2.8 Procedimiento de operación.....	22
2.9 Medición y el cálculo del desgaste	24

2.10 Reportes.....	26
2.11 Precisión.....	29
2.12 Discusión.....	30
Conclusiones Parciales	32
Capítulo III. Realización del ensayo	33
3.1 Selección y preparación de las mezclas.....	33
3.1.1. Selección de las mezclas	33
3.1.2. Preparación de las mezclas	34
3.2. Preparación de las probetas.....	35
3.2.1. Análisis químico del material	36
3.2.2. Pesaje de las probetas	38
3.3. Realización de los ensayos	39
3.3.1. Parámetros de trabajo	39
3.3.2. Realización de los ensayos	41
3.4. Resultados	42
3.4.1. Resultados Mezcla 1	42
3.4.2. Resultados Mezcla 2	43
3.4.3. Resultados Mezcla 3	45
3.5. Análisis de los resultados	46
Conclusiones Parciales	49
Conclusiones Generales	50
Recomendaciones.....	52
Bibliografía	

Introducción

Como la población mundial aumenta constantemente, las demandas de energía para mantener los requerimientos de sus estilos de vida aumentan también. Por consiguiente, la principal preocupación está en el uso de nuevas fuentes de energía. Los combustibles fósiles como carbón, petróleo y gas probablemente se agotarán en el futuro, por lo que se les llaman combustibles no renovables [1]. Esto es un proceso industrial que puede desarrollarse mediante el uso de diferentes fuentes, ya sean renovables o no renovables. Las primeras se reemplazan con el tiempo y por lo tanto no desaparecen fácilmente. Sin embargo, las fuentes de energía no renovables están amenazadas y pueden desaparecer si el uso continúa siendo excesivo.

En la actualidad se emplean varias fuentes renovables de energía, por ejemplo, la energía solar, eólica e hidráulica, pero todavía se utilizan en gran medida, como mayores recursos energéticos, aquellos provenientes de fuentes de energía no renovables o combustibles fósiles. Es por ello que se hace necesario invertir en la investigación y desarrollo de las fuentes renovables de energía hasta incorporarlas en la mayoría de los sistemas de producción y abaratar sus costos reduciendo la contaminación ambiental. Esa es la manera de hacer compatibles el desarrollo económico y la protección del medio ambiente.

Los combustibles que se queman son responsables de grandes catástrofes medioambientales que son de gran relevancia en la agenda política actual. Ejemplos de estos es la acumulación de gases de efecto invernadero, acidificación, contaminación del aire, contaminación del agua, daño de las capas superficiales y el ozono troposférico. Estos problemas son causados por la liberación de contaminantes que normalmente están presente de forma natural en la estructura de los combustibles, como lo son el sulfuro y el nitrógeno. Para disminuir algunos de estos problemas medioambientales se pudiera tener en consideración, entre otras opciones, el desarrollo de los biocombustibles [2].

Numerosas investigaciones en esta rama tienen como objetivo identificar y desarrollar cultivos específicamente mejorados para el desarrollo de biocombustibles, incluyendo plantas de crecimiento rápido y cultivos no comestibles. Estos, además de que pueden ser mezclados con carburantes convencionales, pueden ser usados

en vehículos sin modificar. Además, facilita la introducción dentro del proceso de suministro de carburantes; reduce el volumen total de emisiones de CO₂ a la atmósfera, entre otros [3].

Dentro de dichos biocombustibles se encuentra el biodiesel y se le denomina así al éter que se produce a partir de diversos tipos de grasa o aceite, que pueden ser tanto de origen vegetal (aceites de soya, colza o girasol) como de origen animal. Típicamente se produce a través de una reacción de transesterificación cuando un aceite vegetal o grasa animal reacciona con un alcohol (metanol o etanol) en presencia de un catalizador (NaOH o KOH) y un éter es convertido en otro éter diferente, obteniendo biodiesel y glicerol [4]. Estos éteres metílicos o etílicos (biodiesel) se mezclan con el combustible diésel convencional o se utilizan como combustible puro (biodiesel 100%) en cualquier motor diésel.

El Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías Ambientales (CEETA), perteneciente a la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas (UCLV), en relación con esta temática ha trabajado en la obtención de biodiesel a partir de aceite de girasol y propuso un procedimiento de inserción del uso de este recurso con fines energéticos en el sector agrícola. Basándose en el balance energético de este cultivo se logró demostrar que, por cada litro de combustible consumido en los requerimientos agro técnicos y extracción del aceite, se generan 3,84 litros de biodiesel, lo cual da la posibilidad de utilizarlo para lograr una producción de alimentos a partir de un biocombustible producido en el propio sector.

Actualmente, este centro ha orientado sus esfuerzos a la obtención de mezclas combustibles a partir de aceites vegetales no comestibles. En este sentido se comienzan a realizar estudios acerca de las bondades del cultivo *Ricinus communis*, como potencial proveedor de aceite vegetal con varias finalidades, ya sea como materia prima para la obtención de biodiesel, o como parte componente de mezclas con etanol, diésel, o ambos.

Estas mezclas además de poseer características necesarias para un buen desempeño como combustible en motores de combustión interna, deben actuar también como lubricante en determinadas partes del sistema de inyección, como es el caso de las bombas rotativas e inyectores [5]. Como parte de ese trabajo se

analizó una mezcla ternaria de aceite de higuera, etanol y diesel con el objetivo de obtener las mejores mezclas que garanticen valores aceptables de viscosidad cinemática, punto de obstrucción del filtro en frío (CFPP) y alto valor calorífico (VHC) [6, 7]. Sin embargo, no se tuvo en cuenta en esta selección de mezclas la lubricidad, que es una propiedad importante para el correcto funcionamiento de las bombas y los inyectores.

Por tal motivo el presente trabajo tiene como **Objetivo General**:

- ❖ Realizar un estudio de lubricidad de tres mezclas ternarias de aceite de higuera, etanol y diesel.

Para facilitar el trabajo se han trazado como **Objetivos Específicos**:

- ❖ Realizar un estudio bibliográfico sobre el estado actual de las mezclas combustibles, su empleo en los motores de combustión interna y el desgaste de elementos de máquinas.
- ❖ Seleccionar el método de ensayo para la realización del estudio de lubricidad y preparación de los ensayos según la norma seleccionada.
- ❖ Seleccionar las mezclas diésel-etanol-aceite de higuera con mejor resultado como combustible para realizar el análisis de lubricidad y preparación de las mismas.
- ❖ Realizar los ensayos de desgaste para el estudio de lubricidad y analizar los resultados obtenidos.

Capítulo I. Generalidades acerca de las mezclas combustibles

En este capítulo se abordarán temas acerca de los impactos de las mezclas combustibles en motores de combustión interna, así como la influencia en bombas de inyección. También se abordarán contenidos importantes relacionados con el desgaste y la importancia de la lubricidad de dichos combustibles para evitar el deterioro del motor, todo esto tomando como referencia trabajos anteriores [8]. Finalmente se analizan trabajos en los que se estudia la lubricidad de mezclas combustibles utilizando diferentes tipos de ensayo.

1.1. Panorámica energética mundial

Las nuevas limitaciones ambientales establecidas en ciudades densamente pobladas debido a los elevados niveles de contaminación a la atmósfera que se generan en la actualidad, unido al agotamiento de las reservas internacionales de petróleo y a la alta demanda de combustible fósil, han propiciado una creciente aceptación internacional de usar combustibles renovables producidos a partir de biomasa, con beneficios ambientales considerables [3]. Además, es importante la evaluación de las mezclas a partir de materias primas nacionales, debido a la necesidad de buscar alternativas que posibiliten el ahorro de combustible diésel, de encontrar una vía para materializar la contribución de nuestro país a la solución de los problemas ambientales provocados por los combustibles automotores convencionales que constituyen casi el 80 % de las fuentes contaminantes que envenenan el aire, y para conocer el comportamiento de uno de los recursos renovables nacionales más importantes de nuestra economía.

1.2. Combustibles alternativos

Los bicombustibles se utilizaron para mover los automóviles antes que los combustibles fósiles. Henry Ford diseñó el Ford T original en 1908 para que trabajara con etanol, y Rudolph Diesel pensó en impulsar su motor con aceite vegetal. Henry Ford predijo en 1925, “El combustible del futuro va a salir de las frutas como la manzana u otras, de las hierbas, del aserrín, o cualquier otra cosa. Se puede obtener combustible de toda materia vegetal que pueda fermentarse”. Debido a los problemas de suministro, precio y eficiencia (y también debido a prohibiciones), los

combustibles fósiles se impusieron por ser muchos más prácticos desde aquellos tiempos de inicio del siglo XX [9].

Los combustibles alternativos son combustibles renovables que contaminan menos y son más baratos en estos momentos. Los vehículos con combustibles alternativos son equipos que utilizan combustibles distintos a los que provienen del petróleo. Han existido por más de cien años, pero últimamente cautivan la atención de gobiernos, productores de automóviles y consumidores. Entre los combustibles alternativos se destacan el gas natural, la electricidad y el hidrógeno, entre otros.

El biodiesel es también un combustible ecológico alternativo al diésel fósil ampliamente utilizado en motores de ciclo diésel y calderas. Cualquiera que sea su origen, es perfectamente compatible con el diésel fósil, por lo que pueden ser mezclados en cualquier proporción. Cuando el Biodiesel sustituye completamente al diésel fósil, se conoce como B100; mientras que, si está presente como aditivo, se conocen como BX, donde la "X" se refiere a la proporción de este en la mezcla. Así, por ejemplo, B30 estaría formada por un 30% de Biodiesel y un 70% de diésel fósil [8].

Entre las principales ventajas que ofrecen estas mezclas combustibles están:

- Reduce las emisiones nocivas de los combustibles fósiles.
- Es biodegradable.
- Gracias a su elevada lubricidad alarga la vida útil del motor.
- Tiene un punto de inflamación superior al del gasoil, que lo hace más seguro para manipular y transportar.
- No es necesario hacer modificaciones en los motores para su uso.
- Al ser tan sencillo de elaborar ofrece independencia energética.
- Durante su elaboración, se genera glicerol como valor agregado.
- Reduce la presencia de CO₂ en el aire, puesto que para su elaboración se estimulan la producción de plantas.

- No obedece a economías de escala.
- Impulsa el desarrollo sustentable de un país.

En Cuba el Instituto Cubano de Investigaciones de los derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA) ha orientado sus esfuerzos en la utilización de diésel-etanol como combustible, teniendo en consideración que nuestro país está estrechamente relacionado con la producción azucarera que es una de las fuentes fundamentales de obtención de etanol en la actualidad. Se lograron algunos avances en la introducción del etanol como combustible en el transporte automotor. Se investigó en el empleo de etanol hidratado para mezclar con gasolina y diésel. Se mezcló un 25% de etanol en gasolina y con un 25% de etanol en diésel, pero en este caso se presentó el inconveniente de la utilización de un kit para la alimentación independiente de etanol y diésel lo cual significa una complicación en el sistema de alimentación [10].

1.2.1. Impacto de los combustibles alternativos sobre el motor

El uso de los combustibles alternativos supone también la creación de nuevas tecnologías tanto en los motores de la automovilística como de la aeronáutica o cualquier tipo de motor que funcione con los combustibles derivados del petróleo. Las compañías automovilísticas están ofreciendo vehículos con motores para combustibles alternativos cada vez más optimizados y con mejores prestaciones.

1.2.2. Impacto de los combustibles alternativos sobre el motor diésel

Una importante cantidad de información ha sido desarrollada midiendo el impacto del uso del biodiesel en motores diésel. Volkswagen ha conducido pruebas en Brasil, Europa, Estados Unidos y Canadá. Los posibles efectos del combustible en motores diésel pueden ser separados en dos áreas: dilución del aceite del motor diésel y desgaste del mismo.

Pruebas realizadas por investigadores canadienses, como también en la Universidad de Missouri, han comprobado importantísimas reducciones de partículas de metal en el aceite con una variedad de mezclas de biodiesel. En el caso canadiense se visualizó una reducción del 40 % de limaduras, con una mezcla de solo 10 % de biodiesel. Los ingenieros creen que la reducción de partículas de carbón es la

causante del extraordinario estado en que se encontraba el motor Cummins 5,9 litros de inyección directa, que estuvo funcionando durante 160 000 km con biodiesel puro en la prueba realizada por la Universidad de Missouri.

En resumen, las pruebas realizadas utilizando B20 en motores diésel, sean estos nuevos o usados, con inyección directa (ID) o indirecta (II), demuestran que ningún hecho negativo puede ocurrirles y que posiblemente aumente la vida útil de los mismos. El uso de mezclas de biodiesel mayores que B20 en motores con ID, viejos o nuevos, debería producir resultados iguales o mejores, mientras que el uso de mezclas mayores a B20 puede producir en algunos motores antiguos con II un espesamiento en el aceite [11].

1.2.3. Impacto de las mezclas combustibles en motores de combustión interna

Actualmente existen una gran variedad de mezclas de combustibles ya que existe una gran cantidad de elementos que se pueden alternar teniendo en cuenta las materias primas y sus proporciones, así como el uso final del combustible obtenido.

El etanol es un compuesto químico que se obtiene a partir de la fermentación de los azúcares en la producción azucarera y es denominado bioetanol. Por sus propiedades puede ser utilizado como combustible directamente, o bien mezclado en diferentes proporciones con gasolina, conociéndose como gasohol oalconafta. El uso de dos mezclas comunes son E10 y E85, con contenidos de etanol del 10% y 85% respectivamente, las cuales se han extendido principalmente para reemplazar el consumo de derivados del petróleo [3].

Las mezclas diésel etanol en la actualidad representan una posible solución para alargar la vida de los combustibles fósiles y evitar así su desaparición definitiva. En Cuba el AzCuba, antiguo Ministerio del MINAZ, pudiese reducir el consumo de diésel fósil con estas mezclas ya que este es el principal productor de etanol. A nivel mundial se están realizando diversos estudios al respecto en los que nuestro país también se ha involucrado.

1.3. Potencialidades del aceite de higuera como sustancia que posibilite la formulación de mezclas etanol hidratado-diésel

El aceite vegetal de higuera presenta la propiedad de ser miscible en etanol debido a la presencia de grupos hidroxilos en sus cadenas de carbono, propiedad que

dificulta la separación de las fases biodiesel-glicerina luego de la transesterificación, pero que a su vez lo convierte en un compuesto que al ser miscible en etanol y diésel pueda contribuir a conseguir el mezclado de ambos componentes.

Ríos en su trabajo [12], evaluó el empleo del aceite de higuera como sustancia que propicia la miscibilidad del etanol en diésel para su empleo en motores de encendido por compresión. Éste seleccionó las mezclas diésel-etanol-aceite de higuera más convenientes a partir de un diseño de experimento y teniendo en cuenta las propiedades físico-químicas de las mismas.

Durante el funcionamiento del motor con la mezcla compuesta por un 20 por ciento de diésel, 40 por ciento de aceite de higuera y 40 por ciento de etanol, se detectó un ligero incremento del consumo específico (12%) y una disminución de la potencia (13,5%) respecto al diésel. Este comportamiento se debe fundamentalmente al menor poder calórico de la mezcla respecto al combustible de diseño del motor [12]. La lubricidad de estas mezclas es un factor importante para la disminución del desgaste en algunos componentes del motor, en particular la bomba y los inyectores que son lubricados sólo por medio del combustible.

1.4. Desgaste

1.4.1. Definición

El desgaste es la erosión de material sufrida por una superficie sólida por acción de otra superficie, es decir, el proceso por medio del cual las capas de los sólidos se rompen o se desprenden de la superficie como resultado de una acción mecánica.

La remoción del material se genera debido al movimiento relativo entre las superficies y los sólidos, líquidos y gaseosos con los cuales se encuentren en contacto. Este movimiento sobre el cuerpo es creado por la acción de las fuerzas de fricción, fuerzas tangentes a la superficie de los puntos de contacto con el cuerpo, que se opone al movimiento posible o existente del cuerpo respecto a esos puntos [13].

La fricción en sistemas de deslizamientos se genera debido a las imperfecciones, mayormente microscópicas, entre las superficies en contacto y se considera de gran importancia debido a que el daño que ocasiona se ve representado en varias

situaciones como el detrimento progresivo del material de la capa superficial o el desplazamiento de éste sin pérdida de masa.

Entre cuerpos en contacto es inevitable el desgaste y normalmente, aunque no origina fallas violentas trae consigo la reducción de la eficiencia del trabajo, pérdida de potencia por fricción, desajustes y eventualmente conduce al reemplazo de partes desgastadas y en casos extremos la obsolescencia del sistema total. [14]

En condiciones normales de funcionamiento, la velocidad del desgaste durante el uso normalmente ocurre en tres diferentes etapas, que son:

- Primera etapa o marcha inicial, donde la velocidad de cambio puede ser alta.
- Segunda etapa o desgaste suave; donde la velocidad de desgaste se mantiene relativamente constante.
- Tercera fase o desgaste severo, donde un alto grado de envejecimiento deriva en un rápido fallo.

Estas etapas se revelan claramente en la figura 1 donde se muestra la disminución de la rugosidad superficial a medida que transcurren las fases del desgaste.



Figura 1. Fases del desgaste versus velocidad de desgaste. Fuente [8]

El desgaste es un factor importante que se debe tener en cuenta en la práctica de la ingeniería ya que éste determina el desempeño y la vida de cualquier elemento.

1.4.2. Tipos de desgaste

El estudio de los procesos de desgaste es parte de la ciencia de la tribología. Algunos mecanismos (o procesos) específicos de desgaste son:

- Desgaste adhesivo
- Desgaste abrasivo

- Fatiga superficial
- Desgaste por fricción
- Desgaste erosivo

Además de los anteriores, existen otros tipos de desgaste comúnmente encontrados en la literatura especializada como: desgaste por impacto, por cavitación, difusivo y desgaste corrosivo.

Desgaste erosivo y erosivo-corrosivo

El desgaste erosivo es un fenómeno que afecta gran cantidad de elementos de máquinas en las industrias minera y alimenticia, así como turbinas hidráulicas, implementos agrícolas, sistemas de bombeo y limpiado en ríos y minas, al igual que piezas específicas usadas en las industrias petrolífera y petroquímica, entre otras muchas aplicaciones. Con este tipo de desgaste no solo se tiene pérdida de material y la consecuente falla de las piezas, sino que está asociado a perjuicios financieros en virtud del tiempo asociado a la reparación de equipos y sustituciones de los componentes desgastados.

Desgaste por cavitación

La cavitación es un problema frecuentemente encontrado en equipos hidráulicos, el cual genera gran dificultad para su mantenimiento. El problema de la cavitación surgió con el desarrollo de los barcos a vapor en el inicio de este siglo. Con la fabricación estos barcos, capaces de alcanzar mayores velocidades, algunos de ellos comenzaron a presentar un desgaste severo y localizado en sus hélices. Inicialmente se pensó que este desgaste se debía a la corrosión de los materiales de las hélices, siendo esta la responsable por el daño en dichos materiales, aprovechando su baja resistencia a la corrosión. Pero, al estudiarse el fenómeno más detalladamente, se descubrió que las hélices no sufrían desgaste cuando no estaban en funcionamiento y que este también ocurría en medios químicamente inertes. sí el desgaste solo podría ser debido a un fenómeno que ocurría durante el flujo de los fluidos frente a los materiales por los que pasaban.

Desgaste por fatiga de contacto

Este tipo de desgaste ocurre cuando piezas son sometidas a elevados esfuerzos, los cuales provocan la aparición y propagación de grietas bajo la acción repetitiva de estos. En el caso de piezas sometidas a deslizamiento, las capas superficiales sufren intensas deformaciones como resultado de la acción simultánea de las tensiones de contacto y de la fuerza de fricción. Los esfuerzos a los que están sometidos los materiales, particularmente en las capas superficiales, promueven en la mayoría de los casos, alteraciones en la estructura cristalina y en el tamaño de grano [14].

Desgaste abrasivo

La Norma ASTM G40-92 [15], define el desgaste abrasivo como la pérdida de masa resultante de la interacción entre partículas o asperezas duras que son forzadas contra una superficie y se mueven a lo largo de ella. La diferencia entre desgaste abrasivo y desgaste por deslizamiento es el grado de desgaste entre los cuerpos involucrados (mayor en el desgaste abrasivo), ya sea por la naturaleza, tipo de material, composición química, o por la configuración geométrica.

Desgaste por deslizamiento

Esencialmente, el desgaste por deslizamiento es aquel en el cual hay un movimiento relativo entre dos superficies en contacto con una carga aplicada, donde el daño de la superficie no ocurre por riscado debido a la penetración de las asperezas o por partículas externas.

El desgaste por deslizamiento es uno de los tipos de desgaste que ocurre con más frecuencia en la industria y por esto es estudiado con gran interés por los investigadores. Una de las razones del gran esfuerzo dedicado es su complejidad, especialmente en lo que se refiere a los múltiples mecanismos involucrados.

Desgaste adhesivo

La adhesión está asociada a toda formación y posterior rompimiento de enlaces adhesivos entre las interfaces, cuando dos superficies son colocadas en contacto íntimo. La adhesión conlleva además al soldado en frío de las superficies. El papel principal en el desgaste adhesivo lo juega la interacción entre las superficies y su grado de limpieza, es decir, cuando no se presenta entre los cuerpos ningún tipo de impurezas, capas de óxido o suciedades, el área de contacto aumenta, pudiéndose formar uniones adhesivas más resistentes.

En los plunger de las bombas el desgaste fundamental es el adhesivo que es ocasionado por la presencia de altas presiones localizadas en las asperezas en contacto. Estas asperezas son deformadas plásticamente, permitiendo la formación de regiones soldadas localizadas. El desgaste adhesivo ocurre como resultado de la destrucción de los enlaces entre las superficies unidas, permitiendo que parte del material arrancado se transfiera a la superficie del otro. Así, la superficie que gana material aumenta su rugosidad con el agravante de que cuando el movimiento continúa, se genera desgaste abrasivo contra la otra superficie.

Una lubricidad pequeña supondrá un desgaste prematuro, al contrario, una lubricidad grande reducirá el desgaste y aumentará el tiempo de vida de los componentes. Es por esto que el estudio del biodiesel y sus mezclas como lubricantes se hace imprescindible para su propio desarrollo.

1.5. Lubricantes

Un lubricante es una sustancia que, colocada entre dos piezas móviles, no se degrada, y forma así mismo una película que impide su contacto, permitiendo su movimiento incluso a elevadas temperaturas y presiones. También se puede definir como una sustancia (gaseosa, líquida o sólida) que reemplaza una fricción entre dos piezas en movimiento relativo por la fricción interna de sus moléculas, que es mucho menor. [14]

1.5.1. Uso del biodiesel como aditivo para la lubricidad

Algunas partes movibles de las bombas e inyectores de motores diésel son protegidas del desgaste por el combustible mismo. Para evitar el desgaste excesivo, el combustible debe tener un nivel mínimo de lubricidad.

La lubricidad es capacidad de reducir la fricción entre las superficies sólidas en movimiento relativo. Los compuestos que mejoran la lubricidad se encuentran de forma natural en el diésel obtenido de la destilación del crudo, pero pueden ser alterados o eliminados en los procesos a los que se somete el producto para reducir la cantidad de aromáticos y azufre. Mientras se regula la disminución del contenido de azufre - acompañado de severos procesos para lograrlo - la tendencia general es tener combustibles con bajos niveles de lubricidad. La mayoría de los combustibles diésel con ultra bajo contenido de azufre necesitan un aditivo de lubricidad [16, 17]

El Instituto Brasileño de Petróleo y Gas realizó diferentes ensayos para determinar el comportamiento de la lubricidad con diferentes proporciones [18], y se determinó que en el caso del diésel regular y en las mezclas con 3% de alcohol anhidro, con y sin Biomix-D, esta película se mantiene cuando se somete a cargas hasta de 32 kg, sin embargo, en el caso de las mezclas con una concentración de etanol superior al 8%, sometidas a la misma carga, se observa un desgaste considerable respecto al blanco (diésel regular), alcanzando valores superiores a 1.3 milímetros. Estos resultados alertan sobre la necesidad de realizar pruebas rigurosas de lubricidad a escala de banco, cuyos resultados permitirían determinar el nivel de afectación y definir, a través de una evaluación económica, si se justifica la utilización de estas mezclas al compararlas con el desgaste de los componentes del sistema de combustible.

La lubricidad ha sido la limitante principal en la aplicación generalizada de esta mezcla. Las bombas de inyección pueden ser clasificadas por los modelos en línea o rotatorias y son el componente más importante del sistema de alimentación de los vehículos diésel. Las bombas en línea son lubricadas internamente por el aceite del cárter del motor, lo que las torna menos susceptibles a los efectos del combustible.

A diferencia de las bombas en línea, las bombas rotatorias realizan la lubricación de sus componentes internos por el propio combustible, lo que las torna más susceptibles a las características del mismo, especialmente a las alteraciones en la lubricidad y a la presencia de agua u otros contaminantes [19].

1.6. Estudio de lubricidad en mezclas combustibles usando ensayos tribológicos

En la literatura se encuentran muchos trabajos (además de los ya mencionados en epígrafes anteriores) que estudian la lubricidad de mezclas y combustibles a partir de la realización de ensayos de desgaste establecidos por diferentes normas.

En su trabajo Negrín y colaboradores [5], realizan un estudio de la lubricidad de una mezcla diésel biocombustible compuesta por un 10 % de diésel, 35 % de aceite de higuera y 55 % de etanol. En el desarrollo se utiliza el método de pin sobre disco y se realizan ensayos lubricando con la mezcla, lubricando con el diésel y el ensayo sin lubricación. Se toma como patrón la norma ASTM G 99 y se trabaja con los

siguientes parámetros: velocidad del disco 26 rpm, fuerza aplicada 10 N, distancia de deslizamiento 500 m y temperatura de 25 °C.

Matzke y colaboradores [20], realizan un estudio de lubricidad de diésel puro y diésel tratado con aditivos lubricantes. Para la realización del estudio utilizaron dos tipos de ensayos.

Se utilizó primeramente un equipo reciprocante de alta frecuencia. No se especifica la norma por la que se trabaja, pero se presentan los principales parámetros de trabajo utilizados, estos son: fuerza normal de 2 N, longitud de desplazamiento de 1 mm, frecuencia 50 ± 1 Hz y temperatura 60 ± 2 °C.

Posteriormente se utilizó una máquina oscilatoria de alta temperatura. Tampoco se indica la norma por la que se realizan los ensayos y se trabaja con los siguientes parámetros: fuerza normal de 1000 N, longitud de desplazamiento de 10 mm, frecuencia de 5 Hz y temperatura de 90 °C.

Por su parte Xing Peng [21], realiza el estudio de lubricidad de cinco casos de combustibles y mezclas, estos son: diésel puro, mezclas con 10 %, 20 % y 50 % de biodiesel y biodiesel puro, sin indicarse que biodiesel se utilizó. En el ensayo se utiliza el método de disco sobre bola, sin embargo, no se referencia la norma que se sigue en el ensayo. Sólo se indica que se utilizan diferentes fuerzas en la realización del ensayo (30 N, 50 N, 70 N y 90 N), pero no se mencionan otros parámetros utilizados.

Da Silva y colaboradores [22], realiza el estudio de lubricidad de varias emulsiones refrigerantes utilizadas en el maquinado de metales. Para el estudio se utilizó una máquina reciprocante de alta frecuencia, pero no se indica la norma de referencia. Se trabajó con los siguientes parámetros: fuerza de 2 N, frecuencia 50 Hz y temperatura de 60 °C.

En [23] Weinebeck y Murrenhoff realizan un estudio de lubricidad a varias mezclas biocombustibles sin especificar que producto se utilizó en cuestión. Se utiliza una máquina reciprocante de alta frecuencia y se utilizó la norma ISO 12156-1 como patrón para los ensayos. Se aplicó una carga de 200 g (≈ 2 N), una frecuencia de 1 Hz y temperatura de 60 °C. No se indica el largo del desplazamiento.

Kalam y colaboradores [24] analizan en su trabajo dos mezclas ternarias diésel-biocombustible. Para el estudio utilizan el método de cuatro bolas, sin especificar la norma utilizada. Sólo indican como parámetros del ensayo la fuerza aplicada de 40 kg (392 N), y una rotación de 1200 rpm.

En su trabajo Gevorgyan y colaboradores [25] realizan el análisis de lubricidad en dos mezclas de gasolina. Una con el 90 % de gasolina y 10 % de etanol y otra con el 85 % de gasolina y 15 % de etanol. Se utilizó lo estipulado en la norma ISO 12156 para el método recíprocante de alta frecuencia. Como parámetros se utilizaron: fuerza de 200 g (≈ 2 N), frecuencia de 50 hz y se usaron tres temperaturas de 25, 50 y 80 °C. No se especifica la longitud del recorrido.

Mendes y colaboradores [26], hacen la evaluación de lubricidad en siete mezclas y combustibles, que fueron: diésel puro, biocombustible de aceite de soya puro, biocombustible de aceite de girasol puro, mezclas con 80 % de diésel y 20 % de cada biocombustible y mezclas con 95 % de diésel y 5 % de cada biocombustible. Se utilizó una máquina recíprocante de alta frecuencia y los ensayos se hicieron según la norma ASTM D-6079. Se utilizaron los siguientes parámetros: Fuerza aplicada 200 g (1,96 N), longitud de desplazamiento 1 mm, frecuencia de 50 Hz, temperatura de 60 °C y un tiempo de duración de 75 min.

Según el estudio de la literatura especializada, existen normas específicas para el análisis de lubricidad para el diésel, estas son la ASTM D-6079 y la ISO 12156, sin embargo, no existen normas específicas para determinar la lubricidad en los biocombustibles ni en las mezclas. Como se aprecia en los trabajos que abordan este tema, se utilizan en la práctica diferentes equipos y métodos para hacer los estudios de lubricidad, siendo también variados los parámetros de trabajo al realizar los ensayos.

Conclusiones Parciales

- ❖ El agotamiento de las reservas de combustibles fósiles, unido a la alta contaminación ambiental que estos provocan ha motivado una creciente aceptación internacional al uso de combustibles alternativos, entre los que se encuentran los biocombustibles, producidos a partir de biomasa. Los biocombustibles se están utilizando mucho en el mundo en la actualidad y la tendencia es que siga aumentando su producción y utilización. Es por ese motivo que su estudio y aplicación tiene una gran actualidad.
- ❖ Una de las funciones importantes de los combustibles es trabajar también como lubricante en las diferentes partes del motor que se ponen en contacto con él, fundamentalmente en las bombas y los inyectores. Es decir que ayudan a disminuir el desgaste de estos elementos y por lo tanto alargar su vida útil. Se ha demostrado en diferentes trabajos, que el uso de los biocombustibles tanto puros como en mezclas aumentan la lubricidad y por lo tanto el poder de protección ante el fenómeno del desgaste. Es por eso que es muy importante hacer el estudio de lubricidad de cualquier biocombustible que se proponga para su uso.
- ❖ No existen normas específicas para realizar el estudio de lubricidad en los biocombustibles y sus mezclas. En muchos casos se utilizan normas que existen para determinar la lubricidad en el diésel, o en otros se utilizan otros métodos. También es variable en los diferentes trabajos los valores de los parámetros utilizados en los ensayos, como son la fuerza aplicada, la temperatura de trabajo, la distancia de deslizamiento y la frecuencia.

Capítulo II: Procedimiento para el estudio de lubricidad

Dentro de las normas que permiten realizar el estudio de lubricidad en determinados fluidos se encuentra el conocido como método lineal recíprocante de esfera sobre plano, establecido en la norma ASTM G 133 [27]. Se decide usar este procedimiento porque en el laboratorio de Resistencia de Materiales de la facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial se cuenta con una máquina fabricada según esta norma, y en las condiciones económicas que se encuentran en el país es imposible adquirir una máquina recíprocante de alta frecuencia como establecen las normas ASTM D-6079 y la ISO 12156. En el presente capítulo se hará un estudio de dicha norma.

2.1 Fundamentos teóricos de la práctica de laboratorio

Este método de prueba, aborda los procedimientos de laboratorio para determinar el desgaste por deslizamiento de materiales cerámicos, metales y otros posibles materiales resistentes. El mismo consiste en el deslizamiento de dos superficies tomadas como muestras: una superficie plana y una esférica. Estas superficies se mueven en relación unos con otros, en un movimiento lineal de ida y vuelta, en un determinado conjunto de condiciones. La dirección del movimiento relativo, entre las superficies de deslizamiento, se invierte de forma periódica de tal manera que el deslizamiento se produce de un lado a otro y en línea recta. Las entidades de mayor interés son los volúmenes de desgaste de la esfera, al ponerse en contacto con materiales o superficies planas. El coeficiente de fricción cinético también puede determinarse a partir del método descrito. Este abarca tanto los procedimientos de prueba sin lubricar, como en condiciones lubricadas. El alcance de este método de prueba no incluye las pruebas en ambientes corrosivos o químicamente agresivos.

2.2 Terminología utilizada y definiciones

Fuerza de fricción: Resistencia a la fuerza tangencial en la interface entre dos cuerpos cuando bajo la acción de una fuerza externa uno de los cuerpos se mueve o tiende a moverse sobre el otro.

Presión de contacto Hertziana: Magnitud de la presión en cualquier lugar específico en un área de contacto hertziana, calculada a partir de las ecuaciones de Hertz de deformación elástica.

Desgaste: Daño a una superficie sólida, por lo general involucrando pérdida progresiva de material debido al movimiento relativo entre una superficie y otra superficie de contacto.

Tasa de desgaste: Cantidad de material removido o cambio dimensional debido al desgaste por unidad de parámetro de exposición, por ejemplo, la cantidad removida (masa, volumen, espesor) por unidad de distancia de deslizamiento o de tiempo.

2.3 Aplicación de la carga

La carga se aplica verticalmente a través de la punta esférica contra superficie plana de la muestra colocada horizontalmente. La carga normal, la longitud del recorrido, la frecuencia y el tipo de oscilación, la temperatura de prueba, el lubricante (si lo hay), la duración de la prueba, y el medio ambiente atmosférico (incluido el rango de humedad relativa) se seleccionan de acuerdo una de las dos variantes de procedimientos establecidos en la Norma G133-05. (ASTM, 2010)

Este método involucra un deslizamiento recíprocante, donde los cambios en la velocidad de deslizamiento y la dirección del movimiento ocurren durante la prueba. Las condiciones de velocidad constante no son mantenidas. La manera en la cual la velocidad varía con el tiempo, es determinada por el diseño del mecanismo, que permite el movimiento recíprocante entre la esfera y la superficie plana de la muestra. Los cambios dimensionales de las dos superficies: esfera y plana, son utilizados para calcular los volúmenes y las tasas de desgaste. Las fuerzas de fricción son medidas durante la prueba y puede ser utilizada para evaluar los cambios en las condiciones de contacto o el coeficiente de fricción cinética en función del tiempo.

2.4 Significado y uso de la Norma G133-05

Este método de prueba, regido por la Norma G133-05, está diseñado para simular la geometría de un movimiento, experimentado en muchos tipos de componentes que tienen rozamiento, cuyo contacto normal de operación resulta en inversiones periódicas en la dirección del deslizamiento relativo. El desgaste que resulta de este modo de movimiento puede ser diferente del experimentado, por los mismos materiales en deslizamiento de forma continua en una sola dirección (deslizamiento

unidireccional), incluso durante períodos comparables de contacto. Las pruebas de carga y velocidad deben ser determinadas por la severidad o propósito de la prueba.

2.5 Descripción del equipamiento

En la figura 2.1. se muestra el esquema de la máquina de ensayo para la prueba de desgaste de esfera sobre superficie plana. El soporte de la esfera está montado de forma rígida y tiene una punta esférica que se mueve linealmente en movimiento recíprocante, a través de la superficie plana y pulida. El uso de una punta esférica evita o disminuye los problemas asociados con la alineación de deslizamiento sobre superficies planas. Las configuraciones alternas en las cuales la superficie plana se mueve y la punta esférica está fija, también pueden ser empleadas.

Se ha previsto la aplicación de una fuerza uniforme normal (carga) para el contacto entre la esfera y la superficie plana. La medición de la temperatura y la capacidad de control son proporcionadas para calentar y monitorear la superficie plana, la cual puede ser sumergida en un baño de lubricante o probada en seco (sin lubricante). La fuerza tangencial se puede medir continuamente durante el contacto oscilante y puede ser usada para obtener datos del coeficiente de fricción.

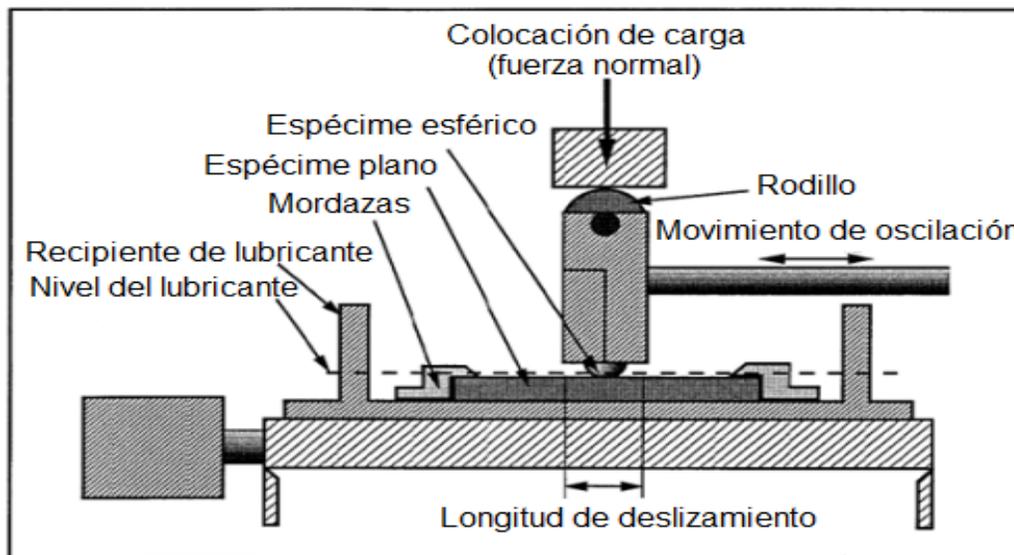


Figura 2. 1. Esquema de la máquina recíprocante para el de ensayo de desgaste de esfera y superficie plana.

La fuente de energía se suministra a partir de un motor, capaz de proveer un movimiento recíproco y uniforme a la esfera y superar la resistencia friccional de las superficies en contacto, para ello una carga máxima, es requerida.

Componente esférico

La punta esférica puede ser un balín fijo o cualquier elemento esferoidal, siempre que el contacto deslizante sea el equivalente a una esfera sobre una superficie plana. Si un balín es usado, deberá estar lo suficientemente apretado para evitar el deslizamiento durante la prueba. El soporte para la punta esférica debe ser rígido, como para que la inversión periódica en la dirección de deslizamiento, no se traduzca en falta de alineación, de inclinación o de otro tipo de contacto.

Característica de la muestra plana.

La muestra rectangular se fija a la base de la máquina, para evitar deslizamiento o pandeo, durante la prueba. Una gran variedad de formas para la muestra son posibles configurar. El principal criterio es que se presenta una superficie plana y horizontal al contacto de la punta esférica.(ASTM, 2010)

2.6 Elementos de instrumentación

- **Medición de la fuerza de fricción:** Una celda de carga de tensión-compresión o un dispositivo similar para medir fuerza, puede ser usado para medir las fuerzas de fricción generadas durante el deslizamiento. La calibración de las fuerzas de fricción en ambas direcciones, de avance y retroceso de deslizamiento, son necesarias. Puesto que la dirección de la fuerza de fricción cambia con rapidez durante la prueba, los registros de cuadro tradicionales, pueden ser lo demasiado lentos, para seguir estos cambios en altas frecuencias de reciprocidad. El método de detección y registro de la fuerza de fricción durante la prueba deberá ser descrito en el informe de la prueba.

Duración de la prueba. En este método de prueba, la duración es especificada en segundos (s). Para calcular la distancia de deslizamiento en metros o número de ciclos, emplear la siguiente ecuación:

$$x = 0,002(t)(f)(L) \quad (2.1)$$

$$N = (t)(f) \quad (2.2)$$

Dónde:

X = Distancia total de deslizamiento de la esfera, (m).

N = Número de ciclos en la prueba.

t = Tiempo de la prueba (s).

f = Frecuencia de oscilación, Hz (ciclos/s)

L = Longitud de carrera (mm).

Un ciclo se define como dos longitudes de carrera (adelante y reversa). Los cronómetros electrónicos, se pueden utilizar para finalizar la prueba. Si un contador de ciclos está disponible, esto puede ser usado en lugar del cronómetro, en cuyo caso la ecuación 2, será usada.

Medición de la humedad: El desgaste y la fricción de muchos materiales son significativamente afectados por la humedad en el aire. Por lo tanto, se requiere que la humedad relativa (con una precisión del $\pm 3\%$) sea medida, antes y durante la prueba. La humedad puede variar con un flujo de aire y en diferentes partes de un mismo espacio, por lo que el sensor de humedad debe estar ubicado lo más cerca de las probetas como sea razonablemente posible. De tal manera que las condiciones de movimiento del aire, sean las mismas para el sensor de humedad como para las muestras de prueba.

Medición de la temperatura: La temperatura ambiente en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$), será medida y reportada durante la prueba. En una inmersión total, es decir, las pruebas lubricadas por líquido, la temperatura de este serán medidas y reportadas.

2.7 Calibración de la máquina de ensayo

Las partes de la máquina de ensayo que requieren calibración son las siguientes:

1. Sistemas de cargas
2. Motor (velocidad y longitud de desplazamiento)
3. Sensor de la fuerza de fricción.

Sistema de carga: La carga (fuerza normal) aplicada a la muestra debe de ser chequeada periódicamente. En las máquinas en las que se aplica una carga por medio de una palanca/muelle y se ajusta la carga con un indicador, esto puede ser realizado empleando una celda de carga de compresión, y comprobando la carga aplicada indicada sobre el disco.

Las cargas que son aplicadas estáticamente se mantienen constantes dentro de una desviación máxima de $\pm 2.0\%$ de la carga de prueba. Por ejemplo, el error estático permitido de una fuerza normal de 25 N, sería ± 0.5 N. Durante las pruebas de oscilación, la fuerza normal puede variar ligeramente sobre el valor promedio debido a la dinámica de la máquina.

Motor: La frecuencia de oscilación de la muestra en movimiento, deberá ser revisada periódicamente, para asegurarse de que la tasa de oscilación se mantenga.

Sensor de la fuerza de fricción: El sensor de la fuerza de fricción debe ser calibrado periódicamente en ambas direcciones donde se aplica la carga.

2.8 Procedimiento de operación

Preparación de Muestras: La punta esférica y la superficie plana deben estar pulidas. En este caso, las superficies deben tener los menores defectos de preparación posibles, tales como: la marca de grietas inducidas, marcas de pulido, y grano sobrepuesto. La rugosidad de la superficie debe estar entre 0.02 y 0.05 μm , Ra (rugosidad aritmética).

Para ello, lo primero es limpiar las muestras mediante de la siguiente forma:

Lavar con un detergente líquido desengrasante y secar con aire caliente. Si existe una considerable porosidad en las muestras, es necesario que se seque al horno durante 4 horas, a una temperatura superior a los 150°C, en un horno limpio.

Limpia las muestras con acetona y después con metanol, frotando la superficie con un algodón humedecido. Es posible que, durante el montaje, algún tipo de contaminación sea colocada inadvertidamente entre ellos. Esta limpieza final, ayudará a disminuir la contaminación. Se debe inspeccionar la punta de la esfera con una lupa, para asegurar que este sin defectos en la superficie de contacto.

Bajar suavemente la punta esférica hasta hacer contacto con la superficie plana, y asegurar que el movimiento del motor sea recíprocante, horizontal y paralelo a la superficie plana. El espesor de la muestra o el montaje pueden requerir un ajuste para asegurar que se cumple esta condición. Aplicar la carga que se establece en la prueba. Confirmar que la velocidad deseada oscilante sea la establecida para el ensayo

Existen dos procedimientos de ensayos, uno sin lubricación (Procedimiento A), y otro de alto esfuerzo de contacto, lubricada a una temperatura elevada (Procedimiento B).

La descripción de los dos procedimientos de ensayos se expone a continuación:

Procedimiento A: Prueba sin lubricación de desgaste, a temperatura ambiente.

- Radio de la punta de la esfera: 4.76 mm (3/16 pulgadas).
- Fuerza normal aplicada: 25 N.
- Longitud de carrera (Amplitud): 10.0 mm,
- Frecuencia de oscilación: 5.0 Hz.
- Duración de las pruebas: 16 min 40 s
- Distancia de deslizamiento: 100m.
- Temperatura ambiente: $22 \pm 3^{\circ}\text{C}$.
- Humedad relativa: 40 a 60 %.
- Lubricación, no aplica.

Procedimiento B: Prueba de alta tensión lubricada a temperatura elevada.

- Radio de la punta de la esfera: 4.76 mm (3/16 pulgadas).
- Fuerza normal aplicada: 200.0 N.
- Longitud de carrera (Amplitud): 10.0 mm
- Frecuencia de oscilación: 10.0 Hz.
- Duración de las pruebas: 33 min 20s
- Distancia de deslizamiento: 400m).
- Temperatura ambiente: $150 \pm 2^{\circ}\text{C}$.
- Humedad relativa: 40 a 60 %.
- De lubricación, una inmersión total en el lubricante seleccionado.

Dejar enfriar las muestras. Para medir el desgaste, es necesario limpiar las muestras de tal manera que las características de la superficie no sean alteradas. Para las pruebas no lubricadas, un chorro concentrado de aire puede ser utilizado para disipar los restos de la zona no lubricadas. Las superficies lubricadas con líquido, un ultrasonido de limpieza puede ser usado con un adecuado disolvente. Las muestras deberán secarse completamente.

Examinar la punta esférica para asegurarse de que ningún tipo de deslizamiento, ya sea por laminación o de otro tipo, haya tenido lugar. Cualquier movimiento de la esfera en el soporte durante la prueba, invalida los resultados. Del mismo modo, cualquier desviación de la superficie plana, invalida también los resultados de la prueba.

El procedimiento de prueba alternativo. Para lograr ciertas condiciones de simulación, o por otras razones técnicas, los procedimientos A y B puede no ser adecuados para un determinado proyecto alternativo de pruebas de desgaste. Las modificaciones de las condiciones de prueba específicas, prescritas en los procedimientos A y B pueden ser utilizados para la realización de dichas pruebas, sin embargo, deberán justificarse y explicarse distintas condiciones de prueba. Con una declaración como la siguiente, "Estas pruebas no están en plena conformidad con lo dispuesto en el método de prueba G133, procedimiento A, ya que la fuerza normal en estas pruebas fue de 50 N, en lugar de 25 N, según lo prescrito por la norma, y la longitud de la carrera fue de 5 mm, en lugar de 10 mm, según lo prescrito por la norma. Todas las demás disposiciones del método de Ensayo G133 se han seguido."

2.9 Medición y el cálculo del desgaste

Dependiendo del desgaste relativo de la esfera y la superficie plana, varias suposiciones acerca de la irregularidad geométrica de las huellas se pueden hacer. En la figura 2.2, se muestran varias condiciones de desgaste posibles. En la figura 2.2a, la superficie plana es mucho más resistente al desgaste que el material de la esfera.

En la figura 2.2b, el material de la esfera es mucho más resistente que la superficie plana. En la figura 2.2c, el desgaste es medible en las dos formas: plano y esfera.

El desgaste de la esfera. Debido a la naturaleza de este tipo de prueba, la huella de desgaste en la esfera, no siempre puede ser circular o plana. Si al final de la prueba, la esfera tiene una apariencia plana, pero no circular, el promedio de las dimensiones máximas y mínimas de la huella, deberá ser calculada y este valor será usado como el diámetro de la huella efectiva (D).

Las dimensiones de la huella del perno pueden hacerse removiendo el soporte de la esfera y colocando la porción de la huella de desgaste bajo un microscopio. Un ocular calibrado o una micrografía de magnificación conocida, pueden ser utilizados para medir las dimensiones de la huella de desgaste.

- El volumen de desgaste (V_p) de una huella de daño de la superficie plana con un diámetro efectivo D (el caso de la figura 20 (a))

- $$V_p = \left(\frac{\pi h}{6}\right) \left[\frac{3D^2}{4} + h^2\right] \quad (2.3)$$

Dónde:

h = Altura de material removido, mm, (profundidad).

Suponiendo un volumen de desgaste esférico, la altura de material removido, se puede calcular a partir de D, de la siguiente manera:

$$h = R - \left[R^2 - \left(\frac{D^2}{4}\right) \right]^{1/2} \quad (2.4)$$

Dónde:

R = Radio de la esfera original, mm.

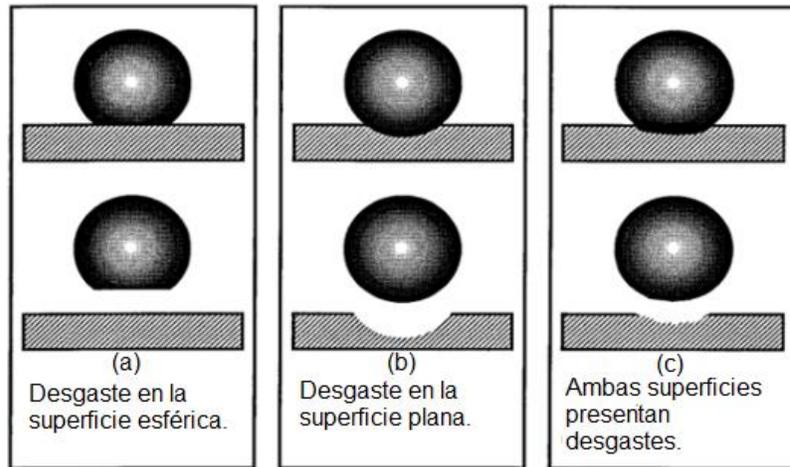


Figura 2.2. Situaciones posibles de desgaste para superficies esféricas y planas.

Si sólo hay una ligera abrasión o algunos rasguños en la punta esférica, el término, "no hay desgaste medible", puede ser utilizado. Si la punta de la esfera es oscurecida por un depósito adherente de partículas de desgaste, ninguna medida de desgaste debe ser informada, aunque la razón por la cual no fue hecha la medición, debe ser reportada.

El volumen de desgaste de la superficie plana se calcula a partir de la longitud de la carrera y el promedio de la sección transversal de la huella de desgaste, medido en puntos equidistantes a lo largo de su longitud.

En la mayoría de los casos, el ancho y la profundidad de la huella del desgaste de la superficie plana, serán relativamente uniformes en toda su longitud. Si las áreas de los tres perfiles iniciales difieren en menos del 25%, tres perfiles serán suficientes.

Si el desgaste es uniforme, seis perfiles de sección transversal se obtienen al calcular la pista media del área de la sección. Por lo general, en el cálculo de volumen de desgaste de la superficie plana, los errores menores geométricos asociados con la inversión de los puntos de dirección en cada extremo de la pista (zona de deslizamiento) pueden ser despreciados.

2.10 Reportes

Reporte cualquier evento inusual como ruido, vibración o vibración excesiva que ocurra durante el ensayo. Además, informe cualquier comportamiento de fricción inusual. Los parámetros de ensayo que deben informarse deben cumplir con el

Procedimiento A o B. Si se utilizan procedimientos distintos de A o B, el informe debe indicar explícitamente que, enumerando las condiciones que son diferentes de las descritas en 2.8.

Reportar lo siguiente:

- Caracterización de la esfera y materiales de la probeta plana. La información debe ser suficiente para establecer su origen, composición química, historial de procesamiento, tratamiento de la superficie y rugosidad media de la superficie (Ra). Se deben dar designaciones comerciales para los materiales, si corresponde. Si se usa un lubricante, proporcione su nombre comercial u otra descripción, y cualquier otra propiedad necesaria para identificar la fuente y la trazabilidad del lubricante. El tamaño del grano y el porcentaje de porosidad de las muestras se pueden informar, si corresponde. Si informa tamaño de grano, indique si el tamaño de grano no es uniforme o dúplex. Consulte Métodos de prueba E 112 y E 1181. En la Guía G 118 se encuentran pautas adicionales para informar datos.

NOTA: Las cantidades que se han medido en el mismo lote utilizado para la fabricación de muestras de prueba de desgaste se deben distinguir de las obtenidas en otros lotes de material (o valores del manual) y se supone que se aplican a las muestras de prueba dadas. Las pruebas que involucran materiales patentados están específicamente excluidas de las composiciones o procesos de informe; sin embargo, se proporcionarán números de lote de material y tantos identificadores específicos como sea posible.

- Parámetros de ensayo:

- Fuerza normal aplicada, N, y radio de la punta de la bola, mm.

- Longitud de carrera, mm.

- Duración del ensayo, seg ó min.

- Frecuencia de oscilación, Hz y tipo de movimiento producido por el sistema de accionamiento oscilante.

- Humedad relativa ambiental, %.

- Temperatura ambiente, ° C.

- Si es lubricado o no lubricado.

Resultados:

- Solo se informa el volumen de desgaste, no la tasa de desgaste, porque no hay razón para suponer que el desgaste se produce a una tasa constante durante todo el período de prueba.
- Volumen de desgaste de la esfera, si la huella es plana, en mm³. Ver 2.9 para una discusión más detallada de esta medida.
- Volumen de desgaste de la probeta plana, mm³. Ver 2.9 para una discusión más detallada de esta medida.
- Una descripción concisa de la apariencia de las huellas de desgaste, incluida la presencia de depósitos o acumulaciones de material o películas que se forman durante el deslizamiento. Se deben incluir las fotomicrografías de las cicatrices, si están disponibles.
- Al informar los resultados de múltiples ensayos, indique el número de réplicas por material y condición y el promedio de los volúmenes de desgaste para las muestras de esferas y probetas planas. Reportar la desviación estándar.

Informe Opcional:

- Informe el valor calculado de la tensión de contacto elástica máxima (S_c), según lo calculado por el método desarrollado por Hertz. Se puede usar la siguiente ecuación

$$S_c = 0.918 \left[\frac{P}{D^2 * E_0^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.5)$$

dónde:

P - carga aplicada, N, y

D - diámetro de la esfera m.

E_0 se obtiene de:

$$E_0 = \left\{ \left[\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} \right] + \left[\frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right] \right\} \quad (2.6)$$

dónde:

E_1 y E_2 - módulos de elasticidad (módulos de Young) de los dos sólidos en contacto,

ν_1 y ν_2 -

Coeficiente de Poisson de los dos materiales, respectivamente.

Si la tensión de contacto calculada excede la dureza de cualquiera de los materiales, habrá una deformación plástica permanente y no se aplicarán las condiciones elásticas.

- Fotomicrográficas o datos de análisis de superficie para las huellas de desgaste en la esfera y las probetas planas.

- Una descripción del comportamiento de fricción observado durante la prueba. El coeficiente de fricción dinámica se puede calcular a partir de:

$$\mu_k = \frac{F}{P} \quad (2.7)$$

dónde:

μ_k - coeficiente de fricción dinámica,

F - fuerza de fricción medida durante el deslizamiento, N,

P - carga aplicada (fuerza normal), N.

En algunas máquinas, la fuerza de fricción media cuadrática está disponible como salida de instrumentación. El informe de la prueba debe indicar claramente la manera en que se obtuvo la fuerza de fricción. En la Guía G 115 puede encontrar más información sobre cómo medir y reportar datos de fricción.

NOTA: la fuerza de fricción puede variar durante un experimento debido a la ejecución y otros factores. Por ejemplo, puede comenzar alta, luego experimentar una transición a un valor más bajo durante la prueba. A menudo es útil para analizar los resultados de las pruebas para observar las magnitudes y duraciones de las transiciones de fricción observadas. Si la fuerza de fricción permanece estable a lo largo de la prueba o alcanza rápidamente un estado estable, un valor nominal puede ser suficiente, de lo contrario, el tipo de datos de fricción reportados dependerá de las tendencias generales observadas durante la prueba. Si la fricción nunca alcanza un valor estable, su rango de valores puede reportarse con notaciones apropiadas en cuanto a su comportamiento.

2.11 Precisión

Precisión: la precisión de las determinaciones de desgaste depende de las características de desgaste del material bajo las condiciones de ensayo impuestas. Algunos materiales se desgastan de manera uniforme para producir huellas de desgaste claramente definidas, y las dimensiones de desgaste se pueden medir con

un mayor grado de precisión que para otros materiales que se desgastan de manera desigual y cuyas huellas de desgaste no se pueden delinear con tanta claridad.

Repetibilidad y reproducibilidad: el procedimiento A se utilizó en el mismo laboratorio para realizar ocho pruebas de nitruro de silicio que se deslizan sobre nitruro de silicio. El coeficiente de variación del volumen de desgaste de las muestras planas fue del 34,7%. El coeficiente de variación para el coeficiente de fricción en las mismas pruebas fue de 1.8%. Los mismos materiales se probaron en cinco laboratorios utilizando el Procedimiento B con lubricación con aceite mineral. El coeficiente de variación para el volumen de desgaste de las muestras planas dentro del laboratorio fue de 623.7%. La reproducibilidad se reflejó en un coeficiente de variación entre laboratorios de 648.6%. Para el coeficiente de fricción, el coeficiente de variación dentro del laboratorio fue de 62.64% y el coeficiente de variación entre laboratorios fue de 65.29%. El Apéndice X1 proporciona ejemplos de la repetibilidad y reproducibilidad de los Procedimientos A y B cuando se aplican a pruebas de cerámica de nitruro de silicio. Estos valores numéricos para la repetibilidad y reproducibilidad no representan necesariamente las cantidades que se obtendrían si se probaran otras combinaciones de materiales según los Procedimientos A y B. Dado que la repetibilidad y reproducibilidad de los datos de desgaste y fricción dependen del material, una declaración general para los Procedimientos A o B no se puede hacer.

Sesgo: dado que no hay un material de referencia aceptado para determinar el sesgo de los procedimientos en este método de prueba de desgaste, no hay una base sobre la cual determinar el sesgo.

2.12 Discusión

La prueba de desgaste implica una cuidadosa atención a los procedimientos de preparación, caracterización, limpieza y prueba de la muestra. La geometría de contacto, la fuerza normal, el tipo de movimiento, la temperatura, el acabado de la superficie y el ambiente deben estar lo más cerca posible de la aplicación elegida si la prueba de desgaste debe proporcionar resultados significativos.

La tasa de desgaste puede cambiar durante el transcurso de una prueba o durante el transcurso de la vida útil de una pieza. Las tasas de desgaste de ejecución pueden

exceder las tasas de desgaste en estado estable, y pueden ocurrir transiciones catastróficas en la tasa de desgaste para terminar la vida útil de un componente. En este método de prueba, el desgaste se informa solo como el volumen total perdido después de un período de deslizamiento determinado. Esto evita suponer que la tasa de desgaste fue constante durante la prueba. Una indicación indirecta de que la tasa de desgaste puede estar cambiando es un cambio significativo en el nivel nominal de la fuerza de fricción durante una prueba. Para determinar el cambio en la tasa de desgaste con la duración de la prueba, se pueden realizar pruebas interrumpidas con evaluaciones periódicas del volumen de desgaste. Sin embargo, el reemplazo de las muestras en la máquina para continuar la prueba puede no producir condiciones de contacto idénticas a las de cuando se interrumpió la prueba.

Se ha demostrado que la humedad en el aire (humedad) afecta tanto la fricción como el desgaste de las cerámicas, metales y polímeros. El rango de humedades relativas dentro de las cuales se producen cambios significativos en el comportamiento tribológico puede ser relativamente corto y puede variar entre los materiales. Por lo tanto, se restringe este parámetro a un $50 \pm 10\%$ de humedad relativa, lo que no garantiza necesariamente que la fricción o el desgaste en cada extremo de la banda sean iguales. Se recomienda la variación de humedad para una serie de pruebas al $\pm 5\%$ o menos, si es posible. La construcción de un recinto de humedad controlada alrededor de los dispositivos de prueba es el mejor enfoque, pero no se requiere que cumpla con los requisitos de este método de prueba. La prueba en días con lecturas de humedad similares es una alternativa menos deseable.

A diferencia de las combinaciones de materiales, pueden desgastarse a diferentes velocidades dependiendo de qué material es la muestra de bola y cuál es la muestra plana. El espécimen de bola experimenta un contacto nominal constante, mientras que la superficie plana del espécimen experimenta un estado de tensión cambiante a medida que el deslizador pasa y puede desgastarse por un conjunto diferente de mecanismos. Por lo tanto, no debe suponerse que se obtendrían los mismos volúmenes de desgaste relativos si se invirtieran los materiales para las esferas y las probetas planas.

Conclusiones Parciales

- ❖ La ASTM establece en sus diferentes normas, los procedimientos de ensayos tribológicos. En este sentido la norma G133 establece el método de ensayo que describe el procedimiento para determinar el desgaste por deslizamiento sobre superficies de cerámicas, metales y otros materiales, con y sin la utilización de lubricantes, empleando una esfera de movimiento linear recíprocante sobre superficies planas.
- ❖ La ASTM G 133 establece dos procedimientos denominados A y B para la realización de los ensayos. Se definen claramente los parámetros de trabajo de cada uno. Sin embargo, se precisa que se pueden realizar ensayos que no tengan exactamente los parámetros descritos en los procedimientos A y B siempre que se describa claramente los parámetros de trabajo utilizados.
- ❖ En esta norma se establece que se deben reportar como resultado fundamental el volumen de desgaste. Este puede ser de una de las probetas (la esfera o la plana) o de ambas. Se plantea que se debe hacer una exposición de la apariencia de las huellas de desgaste y si es posible incluir micrografías.
- ❖ Como informaciones opcionales se pueden reportar las tensiones de contacto (de Hertz) calculadas a partir de ecuaciones que se brindan en la norma. También se puede reportar el comportamiento del coeficiente de fricción durante el ensayo, si la máquina utilizada puede medirlo.

Capítulo III. Realización del ensayo

Como se planteó en el capítulo anterior, el ensayo comparativo de lubricidad en las mezclas combustibles se realizará utilizando el método lineal recíprocante de esfera sobre plano, que establece la Norma técnica ASTM G 133. En este capítulo se realizará la selección y preparación de las mezclas que se analizarán. Se realizarán los ensayos de desgaste y se procesarán los resultados.

En la figura 3.1 se muestra la máquina utilizada en los ensayos y sus partes fundamentales:

- 1- Motor eléctrico
- 2- Controles eléctricos
- 3- Sistema para la aplicación de la carga
- 4- Porta probetas

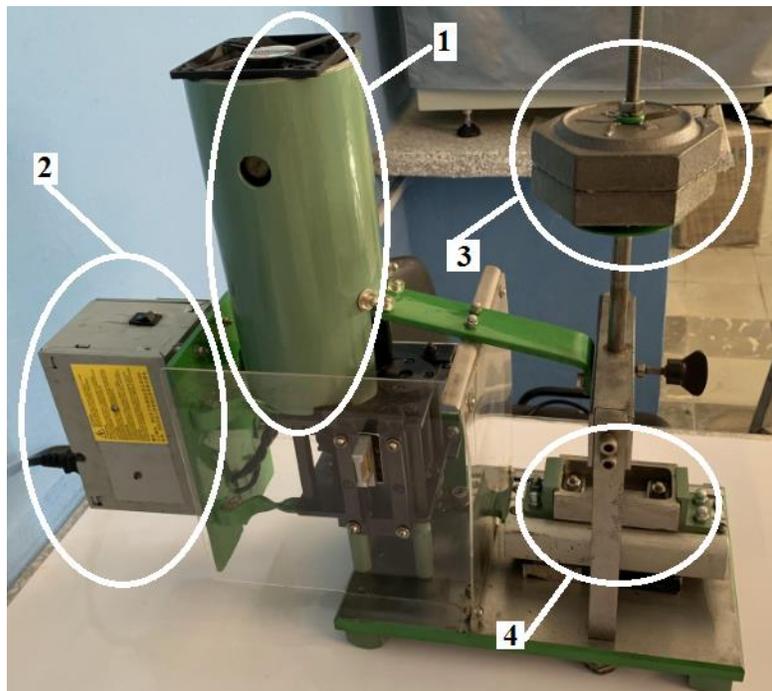


Figura 3.1. Máquina utilizada en los ensayos y sus partes fundamentales

3.1 Selección y preparación de las mezclas

3.1.1. Selección de las mezclas

Como se ha planteado anteriormente en el Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías Ambientales (CEETA) de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la

UCLV se ha trabajado en el estudio de mezclas diesel-biocombustibles formadas por etanol, diesel y aceite de higuera [6, 7, 12]. En estos trabajos se llegó a establecer un rango de mezclas que garantizaban una perfecta miscibilidad y mantenían en niveles aceptables otras propiedades como son la viscosidad cinemática, el punto de obstrucción del filtro en frío (POFF) y el poder calorífico superior (PCS). En estas mezclas estudiadas no se tuvo en cuenta un análisis de lubricidad, siendo esta una propiedad muy importante de los combustibles como se ha podido apreciar en los capítulos anteriores.

Ya en la facultad se comenzaron a hacer algunos trabajos para estudiar la lubricidad de una de las mezclas que se encuentra dentro del rango seleccionado. Específicamente se estudió la mezcla compuesta por un 10 por ciento de diésel, 35 por ciento de aceite de higuera y 55 por ciento de etanol (10-35-55) [5, 8]. El estudio fue comparativo entre esta mezcla, el diésel puro y el ensayo sin lubricación y se utilizó el método pin sobre disco.

Para este trabajo se seleccionaron tres mezclas que se encuentran dentro del rango seleccionado en [6, 7, 12], una de ellas coincide con la utilizada en [5, 8]. Esta selección se realizó en colaboración con los especialistas que hicieron dicho trabajo y además de estar dentro del rango aceptado se buscó que se trabajara con porcentajes de los productos que fueran relativamente fáciles de calcular y manipular.

Las mezclas seleccionadas fueron:

Mezcla 1: con 28,6 % de diésel, 30 % de aceite y 41,4 % de etanol.

Mezcla 2: con 10 % de diésel, 35 % de aceite y 55 % de etanol.

Mezcla 3: con 20 % de diésel, 40 % de aceite y 40 % de etanol.

3.1.2. Preparación de las mezclas

Las mezclas se prepararon en el Laboratorio Químico perteneciente al CEETA. El diésel utilizado se adquirió en un servicerio de la ciudad de Santa Clara, el etanol fue facilitado por un laboratorio de la Facultad de Química de la UCLV y el aceite de higuera se adquirió en una farmacia de la misma ciudad.

Se decidió hacer 250 ml de cada mezcla, pues con esta cantidad alcanza para la realización de los cinco ensayos que se harán con cada una de ellas. Las cantidades de componentes para hacer las mezclas seleccionadas fueron:

Mezcla 1: con 28,6 % de diésel, 30 % de aceite y 41,4 % de etanol.

Para hacer la preparación cumpliendo con esos porcentos se utilizaron 71,5 ml de diésel, 75 ml de aceite y 103,5 ml de etanol.

Mezcla 2: con 10 % de diésel, 35 % de aceite y 55 % de etanol.

Para hacer la preparación cumpliendo con esos porcentos se utilizaron 25 ml de diésel, 87,5 ml de aceite y 137,5 ml de etanol.

Mezcla 3: con 20 % de diésel, 40 % de aceite y 40 % de etanol.

Para hacer la preparación cumpliendo con esos porcentos se utilizaron 50 ml de diésel, 100 ml de aceite y 100 ml de etanol.

En la figura 3.2 se muestra el proceso de preparación de una de estas mezclas.

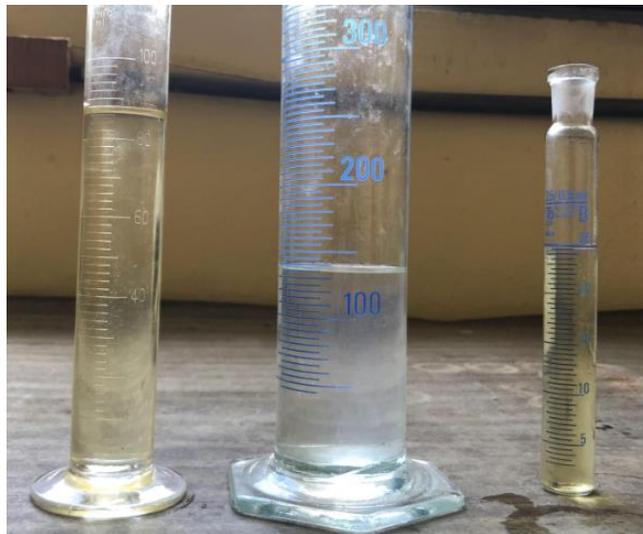


Figura 3.2. Cantidades para la confección de la Mezcla 2.

3.2. Preparación de las probetas

En los ensayos que se realizarán, el desgaste se controlará sólo en las probetas planas. La esfera utilizada en la máquina pertenece a un durómetro Brinell que no se encuentra apto para el uso, además con esto se garantiza que su dureza sea superior a la del acero de las probetas planas. La esfera fue inspeccionada con un microscopio y no se detectaron daños en su superficie que puedan interferir en los resultados.

Las probetas planas se fabricaron a partir de un laminado de acero del que no se conocían sus datos. Por tal motivo fue necesario hacer una caracterización del mismo.

3.2.1. Análisis químico del material

Para la realización del análisis químico se utilizó una máquina Spektrometrie Opto-Electronik, marca Belec de fabricación alemana (Fig. 3.3) que se encuentra en la Empresa Planta Mecánica de Santa Clara.



Figura 3.3. Máquina utilizada en el análisis químico.

En el procedimiento se realizaron cuatro mediciones en diferentes partes de las probetas (Fig.2.4) y los resultados se muestran en el ANEXO 1.



Figura 3.4. Probeta analizada en el espectrómetro.

En la Tabla 3.1 se muestran el valor promedio de algunos de los elementos químicos fundamentales que componen el material de las probetas utilizadas, en el Anexo 1 se muestra la totalidad de los elementos componentes.

Tabla 3.1. Valores de la composición química del acero.

No.	C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Cr	Ti	Co	W
1	0,111	0,025	0,359	0,007	0,021	0,013	0,039	0,010	0,002	0,008	0,010
2	0,130	0,027	0,354	0,008	0,019	0,016	0,040	0,010	0,002	0,012	0,014
3	0,108	0,026	0,356	0,006	0,017	0,014	0,040	0,010	0,002	0,011	0,011
4	0,102	0,026	0,355	0,006	0,018	0,013	0,039	0,009	0,002	0,009	0,009

Media	0,113	0,026	0,356	0,007	0,019	0,014	0,039	0,010	0,002	0,010	0,011
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Como se puede apreciar esta composición coincide exactamente con el del acero AISI/SAE 1010 [28]. De esa misma fuente se obtienen las principales propiedades físico-mecánicas del material como se muestra en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Principales propiedades del AISI 1010

Propiedades Mecánicas	
Tensión última	310 – 360 MPa
Tensión de fluencia	180 – 240 MPa
Elongación máxima	32 – 48 %
Módulo de elasticidad	200 GPa
Módulo volumétrico	160 GPa
Coefficiente de Poisson	0,29
Módulo de cortante	80 GPa

Las probetas se fabricaron de forma rectangular de 30 mm x 60 mm x 2,7 mm como se aprecia en la figura 3.5. La norma no establece las dimensiones que debe tener la

probeta, solo se plantea que deben caber dentro del porta probetas y permitir el desplazamiento de la esfera sin interferencia.



Figura 3.5. Probetas planas fabricadas para los ensayos

3.2.2. Pesaje de las probetas

Se fabricaron 15 probetas, cinco para ser utilizados en los ensayos con cada mezcla combustible (Fig. 3.5). Estas probetas se marcaron con un punzón de forma manual y se designaron con la letra A las que se ensayarían con la Mezcla 1, con la B para la Mezcla 2 y con C para la mezcla 3.

Posteriormente la superficie de trabajo se rectificó en una rectificadora plana, lo que garantiza una rugosidad superficial media (R_a) de $0,8 \mu\text{m}$.

Antes de realizar el pesaje de las probetas es necesario dejarlas bien limpias para evitar que cualquier vestigio de suciedad interfiera en los resultados, pues se utiliza una balanza de gran exactitud. Las probetas se limpiaron utilizando primeramente detergente, con posterioridad se limpian utilizando xileno. Este producto conocido también como dimetilbenceno es reconocido por sus excelentes propiedades disolventes, pero es nocivo a la salud humana. Por tal motivo se deben tomar medidas de protección para su utilización

Para la realización de los pesajes se utilizó una balanza digital marca SCALTEC que tiene una precisión de 0.0001 g como establece la norma.



Figura 3.6. Balanza digital SCALTEC

El pesaje inicial de las 15 probetas se muestra en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Pesaje inicial de las probetas

Probeta	Peso (g)	Probeta	Peso (g)	Probeta	Peso (g)
AA	24.6806	BA	24.2649	CA	25.2381
AB	24.8199	BB	23.7992	CB	23.8228
AC	24.4594	BC	25.1372	CC	25.0222
AD	25.0105	BD	25.6729	CD	24.4281
AE	25.4721	BE	25.1658	CE	24.3752

3.3. Realización de los ensayos

Para la realización de los ensayos se comenzó por establecer los parámetros de trabajo y realizar las verificaciones de los mismos.

3.3.1. Parámetros de trabajo

Los ensayos se realizaron en un local con temperatura y humedad controlados. Se trabajó a una temperatura de 25 ± 2 °C y se controló la humedad relativa con un deshumidificador a un 60 ± 2 %, como se muestra en la figura 3.7.



Figura 3.7. Control de la humedad relativa con un deshumidificador

Se trabajó con una velocidad de rotación de 600 ± 5 rpm, lo que representa una frecuencia de 10 Hz. Este parámetro se controló con un tacómetro digital marca SHIMPO DT-205L, que se muestra en la figura 3.8.



Figura 3.8. Tacómetro láser digital marca SHIMPO DT-205L

La máquina tiene un recorrido de 7 mm, lo que garantiza en un ciclo completo una longitud lineal de 14 mm. Se estableció un tiempo de duración del ensayo de 7 min, que se controló con un cronómetro, esto da como resultado una longitud total de desgaste de 58,8 m.

Se aplicó una fuerza en la zona de contacto de 25 N. Esta fuerza se garantizó aplicando directamente sobre la esfera un peso de 2251 g. El peso aplicado se controló con una balanza digital marca Sartorius con una precisión de 0,1 g, que se muestra en la figura 3.9.



Figura 3.9. Balanza marca “Sartorius” utilizada en la medición del peso aplicado
 En la Tabla 3.4 se muestra un resumen de los parámetros de trabajo empleados en los ensayos.

Tabla 3.4. Parámetros de trabajo de los ensayos

Temperatura	$25 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Humedad relativa	$60 \pm 2 \%$
Frecuencia	10 Hz
Longitud de trabajo de la máquina	7 mm
Longitud total de deslizamiento	58,8 m
Fuerza aplicada	25 N

3.3.2. Realización de los ensayos

Después de definidos los parámetros de trabajo se procedieron a la realización de los ensayos. Para esto se comenzó con las probetas indicadas con la letra A y la Mezcla 1, posteriormente las probetas B y la Mezcla 2 y finalmente las probetas C y la Mezcla 3.

Se fijó cada probeta en el dispositivo y se cubre con la mezcla como se indica en la figura 3.10. Después de esto se deja caer suavemente el dispositivo en el que se encuentra la esfera (que es el que aplica la fuerza para el ensayo) hasta que se encuentre sobre la probeta. Después de esto se enciende la máquina y se controla el tiempo de realización del ensayo, que es de 7 min.



Figura 3.10. Montaje de la probeta

Después de realizado cada ensayo se desmonta el dispositivo porta probetas, se retira la mezcla que se está analizando, se retira la probeta correspondiente, se limpia la cavidad de trabajo y se garantiza que no queden partículas del ensayo realizado con anterioridad. Posteriormente se repite todo el procedimiento descrito previamente.

3.4. Resultados

Después de realizados todos los ensayos se procede al pesaje de las probetas. Antes de esto se repite todo el proceso de limpieza de las mismas descrito en el epígrafe 3.2.2.

3.4.1. Resultados Mezcla 1

Los resultados de las probetas a y la Mezcla 1 se muestran en la Tabla 3.5. En la misma se muestra la pérdida de masa al realizado la resta del pesaje final al pesaje inicial.

Tabla 3.5. Pérdida de masa en los ensayos de las probetas A y la Mezcla 1

probeta	Peso inicial (gramos)	Peso final (gramos)	Masa perdida (gramos)
AA	24.6806	24,6641	0,0165
AB	24.8199	24,8081	0,0118
AC	24.4594	24,4451	0,0143
AD	25.0105	25,0006	0,0099
AE	25.4721	25,4569	0,0152
		Promedio	0,01354

Los resultados de la pérdida de masa en cada probeta se procesaron estadísticamente para garantizar la confiabilidad de los resultados. Para eso se utilizó el software profesional StatGraphics_plus 5.1 y los resultados se muestran a continuación.

Frecuencia = 5

Media = 0,01354

Mediana = 0,0143

Media geométrica = 0,0133179

Varianza = 0,000007093

Desviación típica = 0,00266327

Error estándar = 0,00119105

Mínimo = 0,0099

Máximo = 0,0165

Rango = 0,0066

Asimetría tipi. = -0,454025

Curtosis típificada = -0,596249

De particular interés están los coeficientes de asimetría y curtosis estandarizados que pueden utilizarse para determinar si la muestra procede de una distribución normal. Los valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican alejamiento significativo de normalidad que tendería a invalidar cualquier test estadístico con respecto a la desviación normal. En este caso, el valor del coeficiente de asimetría estandarizado está dentro del rango esperado para los datos de una distribución normal. El valor del coeficiente de curtosis estandarizado está dentro del rango esperado para los datos de una distribución normal.

3.4.2. Resultados Mezcla 2

Como se refiere anteriormente se utilizaron cinco probetas con dada mezcla, las mismas se pesaron antes del ensayo y después del mismo. Los resultados de las probetas B y la Mezcla 2 se muestran en la Tabla 3.6. En la misma se muestra la pérdida de masa al realizado la resta del pesaje final al pesaje inicial.

Tabla 3.6. Pérdida de masa en los ensayos de las probetas B y la Mezcla 2

probeta	Peso inicial (gramos)	Peso final (gramos)	Masa perdida (gramos)
BA	24.2649	24,2556	0,0093
BB	23.7992	23,7905	0,0087
BC	25.1372	25,1264	0,0108
BD	25.6729	25,6633	0,0096
BE	25.1658	25,1543	0,0115
		Promedio	0,00998

Los resultados de la pérdida de masa en cada probeta se procesaron estadísticamente para garantizar la confiabilidad de los resultados. Para eso se utilizó el software profesional StatGraphics_plus 5.1 y los resultados se muestran a continuación.

Frecuencia = 5

Media = 0,00998

Mediana = 0,0096

Media geométrica = 0,00992839

Varianza = 0,000001307

Desviación típica = 0,00114324

Error estándar = 0,000511273

Mínimo = 0,0087

Máximo = 0,0115

Rango = 0,0028

Asimetría tipi. = 0,406456

Curtosis típificada = -0,742703

De particular interés están los coeficientes de asimetría y curtosis estandarizados que pueden utilizarse para determinar si la muestra procede de una distribución normal. Los valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican alejamiento significativo de normalidad que tendería a invalidar cualquier test

estadístico con respecto a la desviación normal. En este caso, el valor del coeficiente de asimetría estandarizado está dentro del rango esperado para los datos de una distribución normal. El valor del coeficiente de curtosis estandarizado está dentro del rango esperado para los datos de una distribución normal.

3.4.3. Resultados Mezcla 3

Los resultados de las probetas C y la Mezcla 3 se muestran en la Tabla 3.7. En la misma se muestra la pérdida de masa al realizado la resta del pesaje final al pesaje inicial.

Tabla 3. 7. Pérdida de masa en los ensayos de las probetas C y la Mezcla 3

probeta	Peso inicial (gramos)	Peso final (gramos)	Masa perdida (gramos)
CA	25.2381	25,2285	0,0096
CB	23.8228	23,8170	0,0058
CC	25.0222	25,0159	0,0063
CD	24.4281	24,4197	0,0084
CE	24.3752	24,3673	0,0079
		Promedio	0,0076

Los resultados de la pérdida de masa en cada probeta se procesaron estadísticamente para garantizar la confiabilidad de los resultados. Para eso se utilizó el software profesional StatGraphics_plus 5.1 y los resultados se muestran a continuación.

Frecuencia = 5

Media = 0,0076

Mediana = 0,0079

Media geométrica = 0,00747118

Varianza = 0,000002415

Desviación típica = 0,00155403

Error estándar = 0,000694982

Mínimo = 0,0058

Máximo = 0,0096

Rango = 0,0038

Asimetría tipi. = 0,0516883

Curtosis típificada = -0,739061

De particular interés están los coeficientes de asimetría y curtosis estandarizados que pueden utilizarse para determinar si la muestra procede de una distribución normal. Los valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican alejamiento significativo de normalidad que tendería a invalidar cualquier test estadístico con respecto a la desviación normal. En este caso, el valor del coeficiente de asimetría estandarizado está dentro del rango esperado para los datos de una distribución normal. El valor del coeficiente de curtosis estandarizado está dentro del rango esperado para los datos de una distribución normal.

3.5. Análisis de los resultados

Después del análisis estadístico se puede asegurar que los resultados experimentales tienen validez estadística. El error estándar en los tres grupos de datos es despreciable. Los valores de los coeficientes de asimetría y curtosis estandarizados indican que los datos se encuentran en una distribución normal.

En la Tabla 3.8 se muestra el resumen de las pérdidas de masa promedio ocurridas en los ensayos de las diferentes mezclas.

Tabla 3.8. Pérdida de masa promedio en cada mezcla

Mezcla	Pérdida promedio de masa (gramos)
Mezcla 1	0,01354
Mezcla 2	0,00998
Mezcla 3	0,0076

La norma ASTM G 133 establece que en el reporte final debe indicarse el volumen perdido. Por ese motivo a partir de la masa perdida y conociendo que la densidad del acero es de 7,85 g/cm³ se calculan los volúmenes perdidos, por la fórmula 3.1.

$$V_p = \frac{M_p}{\delta} \cdot 1000 \quad (3.1)$$

Donde:

V_p = Volumen perdido en mm^3

M_p = Masa perdida en g

δ = Densidad del material en g/cm^3

Los resultados se muestran en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9. Pérdida de volumen promedio en cada mezcla

Mezcla	Pérdida promedio de volumen (mm^3)
Mezcla 1	1,725
Mezcla 2	1,271
Mezcla 3	0,968

Como se puede apreciar a simple vista las probetas ensayadas en la Mezcla 1 tienen una pérdida de volumen mayor que las ensayadas con la Mezcla 2 y esta a su vez uno mayor que los de la Mezcla 3. Numéricamente esto se demuestra a través del cálculo del error porcentual relativo por la fórmula 3.2 obtenida de [29]:

$$\varepsilon_a = \frac{\text{valor actual} - \text{valor anterior}}{\text{valor actual}} \cdot 100\% \quad (3.2)$$

Al calcular el error relativo entre los resultados de las Mezclas 1 y 2 se obtiene:

$$\varepsilon_a = \frac{1,271 - 1,725}{1,271} \cdot 100\% = -35,72\%$$

Cuando se analiza este resultado se aprecia que la Mezcla 2, que tiene un 5 % de aceite de higuera más, evita un 35,72 % más de desgaste que la Mezcla 1.

Se calcula el error relativo entre las Mezclas 2 y 3:

$$\varepsilon_a = \frac{0,968 - 1,271}{0,968} \cdot 100\% = -31,3\%$$

El resultado entre las Mezclas 2 y 3, que tienen también un 5 % de diferencia en la cantidad de aceite, da que la Mezcla 3 brinda un 31.3 % más de protección que la mezcla 2.

De forma general se puede concluir que el porcentaje de aceite de higuereta tiene una significativa influencia en la lubricidad de las mezclas combustibles analizadas. Según los resultados obtenidos un incremento de un 5 % del aceite representa alrededor de un 30 % más de protección contra el desgaste. Este porcentaje no dio exactamente (en un caso 35,72 y en el otro 31,3 %) pues el porcentaje de etanol de la mezcla también puede que tenga influencia en la lubricidad de las mezclas.

Conclusiones Parciales

- ❖ Para la realización de los ensayos se seleccionaron tres mezclas compuestas por diésel, aceite de hígado de bacalao y etanol. Las mismas se seleccionaron a partir de trabajos precedentes que ya habían establecido un grupo de estas que cumplen con varias de propiedades fundamentales como son: perfecta miscibilidad, bajo punto de obstrucción en frío y alto poder calorífico.
- ❖ En los ensayos se determinó que el control del desgaste se realizaría en las probetas planas. Estas se fabricaron de acero, comprobándose a partir de su composición química que es un AISI 1010. Las mismas se construyeron de forma prismática y sus dimensiones garantizan que se puedan fijar en la porta probetas y no interfieran en el funcionamiento de la máquina. Se rectificó la superficie de trabajo garantizándose una rugosidad Ra de 0,8 μm .
- ❖ Los parámetros de trabajo de los ensayos se definieron y los mismos no coinciden con los métodos establecidos en la norma ASTM G 133. Por tal motivo los mismos se indican detalladamente y son: temperatura de 25 ± 2 °C, humedad relativa del 60 ± 2 %, frecuencia de 10 Hz, longitud total de deslizamiento 58,8 m, longitud de trabajo de la máquina 7 mm y fuerza aplicada de 25 N.
- ❖ Los ensayos se realizaron de forma satisfactoria como demuestra el análisis estadístico de los mismos. De ellos se puede concluir que el aceite de hígado de bacalao tiene una influencia fundamental en la lubricidad de las mezclas combustibles. Un aumento del 5 % de aceite representa aproximadamente un aumento del 30 % de la lubricidad de la mezcla.

Conclusiones Generales

- ❖ Los biocombustibles se están utilizando mucho en el mundo en la actualidad y la tendencia es que siga aumentando su producción y utilización. Una de las funciones importantes de los combustibles es trabajar también como lubricante en las diferentes partes del motor que se ponen en contacto con él, fundamentalmente en las bombas y los inyectores. Se ha demostrado en diferentes trabajos, que el uso de los biocombustibles tanto puros como en mezclas aumentan la lubricidad y por lo tanto el poder de protección ante el fenómeno del desgaste. Es por eso que es muy importante hacer el estudio de lubricidad de cualquier biocombustible que se proponga para su uso.
- ❖ No existen normas específicas para realizar el estudio de lubricidad en los biocombustibles y sus mezclas. En muchos casos se utilizan normas que existen para determinar la lubricidad en el diesel, o en otros se utilizan diferentes métodos tribológicos. También es variable en los diferentes trabajos los valores de los parámetros utilizados en los ensayos, como son la fuerza aplicada, la temperatura de trabajo, la distancia de deslizamiento y la frecuencia. En el presente trabajo se utilizó el método recíprocante de esfera sobre superficie plana expuesto en la Norma ASTM G 133, pues se cuenta con una máquina de este tipo en el laboratorio de Resistencia de Materiales.
- ❖ Para la realización de los ensayos se seleccionaron tres mezclas compuestas por diésel, aceite de higuera y etanol. Las mismas se seleccionaron a partir de trabajos precedentes que ya habían establecido un grupo de estas que cumplen con varias de propiedades fundamentales como son: perfecta miscibilidad, bajo punto de obstrucción en frío y alto poder calorífico. Se seleccionaron las mezclas llamadas como 1 compuesta por 28,6 % de diesel, 30 % de aceite y 41,4 % de etanol (28,6-30-41,4), la Mezcla 2 (10-35-55) y la Mezcla 3 (20-40-40).
- ❖ Los ensayos se realizaron de forma satisfactoria como demuestra el análisis estadístico de los mismos. De ellos se puede concluir que el aceite de higuera tiene una influencia fundamental en la lubricidad de las mezclas

combustibles. Un aumento del 5 % de aceite representa aproximadamente un aumento del 30 % de la lubricidad de la mezcla.

Recomendaciones

- ❖ Realizar un estudio que incluya también la influencia del porcentaje de etanol y diésel en las mezclas combustibles. Para esto es necesario realizar un diseño de experimentos que tenga en cuenta todos los factores.

Bibliografía

- 1- Demshemino S. et al. Comparative Análisis of Biodiesel and Petroleum Diesel. *Internacional Journal of Education and Research*. Vol. 1. No. 8. pp 1-8. August 2013. ISSN: 2411-5681
- 2- Turrini, E. El camino del Sol. Un desafío a la humanidad en el tercer milenio. Una esperanza para los países del sur. Cubasolar. 2007. ISBN: 959-7113-17-1
- 3- Kegl, B. Effects of biodiésel on emissions of a bus diésel engine. *Bioresource Technology*. Vol. 99. No. 4. pp 863-873. 2008. ISSN: 0960-8524
- 4- Sotolongo P., José A. Optimization of alkaline transesterification of soybean oil and castor oil for biodiésel production. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. Vol 122. pp 553-560. 2002. ISSN: 02732289
- 5- Negrín L. et al. Análisis de lubricidad en mezcla diesel-biocombustible utilizando el ensayo de espiga en disco. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*. Vol. 22. No. 1. pp. 47-53. 2018. ISSN: 1137-2729
- 6- Redel-Macias M. et al. Ternary blends of diesel fuel oxygenated with etanol and castor oil for diesel engines. *Energy Procedia*. Vol. 142. pp 855-860. 2017. ISSN: 1876-6102
- 7- Pinzi S. et al. Castor oil enhanced effect on fuel etanol-diesel fuel blend properties. *Applied Energy*. No. 224. pp. 409-416. 2018. ISSN: 0306-2619
- 8- Concepción L. Determinación de la lubricidad de la mezcla combustible 10-35-55. Tesis de Grado. UCLV. Cuba. 2014
- 9- Webb A., Coates D. *Biofuels and Biodiversity*. Secretariat of the Convention on Biological Diversity. Montreal. 2012. ISBN: 92-9225-427-6
- 10- Herryman M., Blanco G., Cordovés M. Uso del alcohol como carburante en el transporte para el mejoramiento de las condiciones ambientales. *Panorámica internacional y experiencia en Cuba*. V Congreso de la Región Norteamérica y el Caribe de la Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cuba. 2001
- 11- Beltrán D., Bonilla F. Influencia de las condiciones de almacenamiento en la estabilidad química de mezclas diesel-biodiesel de aceite de palma. Tesis de grado. Universidad Libre. Colombia. 2016

- 12- Rios I. Estudio de la formulación de mezclas etano-diesel para la alimentación de motores de encendido por compresión. Tesis de Grado. UCLV. 2013
- 13- Kennedy F. et al. Modern Tribology Handbook. CRC Press LLC. Boca Raton, Florida. USA. 2001. ISBN: 0-8493-8403-6
- 14- Davis, J.R. Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance. Materials Park. Ohio: ASM International Institute of Materials. 2001. ISBN: 978-0-87170-700-0
- 15- ASTM G 40-17. Standard Terminology Relating to Wear and Erosion. 2017.
- 16- Hazrat M., Rasul M., Khan M. Lubricity Improvement of the Ultra-low Sulfur Diesel Fuel with the Biodiesel. Energy Procedia. Vol. 75. pp. 111-117. 2015. ISSN: 1876-6102
- 17- Schumacher L., Howell S. Lubricating Qualities of Biodiesel and Biodiesel Blends. Sixth National Bioenergy Conference. Nevada. USA. 1994
- 18- Oliveira H., Oliveira J. "Methodology of evaluation for diesel oil lubricity". *Boletín técnico de PETROBRAS*. 2011. ISSN: 1676-6385. Disponible en: http://www.cfdoil.com.br/2012/pdf/2011-BTP-CFD_Oil.pdf
- 19- Cárdenas A., Tinajero B., Villanueva S. Biodiesel vegetal con diesel PEMEX en un motor de bomba de mando mecánico. Emisiones y prestaciones. Tesis de Grado. Universidad Nacional Autónoma de México. 2011
- 20- Matzke M. et al. Diesel Lubricity Requirements of Future Fuel Injection Equipment. SAE Internacional Papers. 2009. ISSN 0148-7191
- 21- Xing Peng D. The Effect on Diesel Injector Wear, and Exhaust Emissions by Using Ultralow Sulphur Diesel Blending with Biofuels. Materials Transactions. Vol. 56, No. 5. pp. 642-647. 2015. ISSN: 1347-5320
- 22- Da Silva E. et al. The Lubricity Analysis of Cutting Fluid Emulsions. Materials Research. Vol. 20. No. 2. pp. 644-650. 2017. ISSN: 1980-5373
- 23- Weinebeck A., Murrenhoff H. Lubricity of new Tailor-Made Fuels from Biomass. The 13th Scandinavian International Conference on Fluid Power. June 3-5. Suecia. 2013
- 24- Kalam A. et al. The Lubricity of Ternary Fuel Mixture Blends as a Way to Assess Diesel Engine Durability. Energies. Vol. 33. No. 11. 2018. ISSN: 1996-1073

25- Gevorgyan G. et al. HFRR Test Method With Stainless Steel Specimen for Gasoline Fuels. 59th Ilmenan Scientific Coloquium. Teshnische Universitat Ilmenau. Alemania. 2017

26- Mendes A., Nóbrega J., Martins S. Micro and Nanometric Wear Evaluation of Metal Discs Used on Determination of Biodiesel Fuel Lubricity. Materials Research. Vol. 17. No. 1. pp. 89-99. 2014. ISSN: 1980-5373

27- ASTM G 133. Standart Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear

28- MATWEB. <http://www.matweb.com/>

29- Negrín L. Métodos numéricos en ingeniería. Editorial Feijoo. 2015. ISBN 978-859-312-142-2

Anexo