



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Análisis térmico y de opacidad de motores diésel comparando diésel y biodiésel como combustible

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el título de:

INGENIERO ELECTROMECAÁNICO

Presenta

Edgar Alfonso Álvarez García

Director

Dr. Luis Alberto Morales Hernández

San Juan del Río, Qro. Mayo 2015

Dedico el presente trabajo:

A mi madre Martha Patricia García Martínez.

Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante, que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

A mis hermanas Claudia y Erika por ser mi ejemplo a seguir, además del apoyo incondicional que siempre me han brindado.

A todas aquellas personas cercanas a mí que participaron directa o indirectamente en la elaboración de esta tesis.

Que esta tesis sirva como ejemplo de inspiración, perseverancia y constancia hacia lo que nos apasiona en la vida.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor de tesis, Dr. Luis Alberto Morales Hernández por su valiosa dirección y apoyo constante para la elaboración de la presente tesis. Sin su apoyo no habría sido posible la realización de este trabajo.

Al comité tutorial integrado por el Dr. Juan Primo Benitez Rangel, el Dr. Miguel Trejo Hernández y el M en C. Manuel García Quijada, por todos sus comentarios y sugerencias que permitieron mejorar este trabajo de tesis.

A cada uno de mis profesores de la carrera que fueron parte de mi enseñanza compartiendo todos sus conocimientos, encaminándome a impulsar el desarrollo de mi formación profesional como ingeniero.

Al Dr. Saúl López Ordaz responsable de la producción de biodiesel en la facultad de química, que me permitió usar un lote de biodiesel para lograr el desarrollo de este trabajo, y permitirme usar el autobús ruta verde para el análisis termográfico y de opacidad.

Al Dr. Juan Primo Benitez por permitirme hacer uso del minibús ecológico para las pruebas requeridas en este trabajo, y ayudarme a solucionar cualquier inconveniente con su funcionamiento.

A la SEDESU del Estado de Querétaro por el financiamiento en el proyecto "Parque de Autobuses de la Universidad Autónoma de Querétaro".

A mis compañeros de la carrera, por el apoyo mutuo que fue fundamental para lograr las metas planteadas en esta tesis.

Y finalmente quiero hacer un agradecimiento especial a mi madre y hermanas, por su paciencia y comprensión en todo este tiempo en que estuve estudiando y realizando esta tesis. Gracias por todo.

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Objetivos	9
1.2.1 Objetivo general.....	9
1.2.2 Objetivos particulares	9
1.3 Justificaciones	10
1.4 Metas	11
MARCO TEÓRICO	12
2.1 Definición de motor.....	12
2.2 Motor diésel	13
2.3 Ciclo de trabajo	17
2.4 Sistemas del motor diésel	22
2.4.1 Funcionamiento del Sistema de combustible.....	24
2.5 Combustibles.....	26
2.5.1 Diésel.....	26
2.5.2 Biodiesel.....	28
2.5.3 Comparación entre diésel y biodiesel.....	30
2.6 Termografía infrarroja.....	31
2.7 Opacímetro de humos.....	33
METODOLOGÍA	36
3.1 Instrumentación usada.....	44
3.2 Procedimiento experimental del minibús ecológico.	48
3.2.1 Caso 1.- Diésel.....	62
3.2.2 Caso 2.- Mezcla de biodiesel B5.....	64
3.2.3 Caso 3.- Mezcla de biodiesel B10	65
3.2.4 Caso 4.- Mezcla de biodiesel B20	66

3.2.5 Caso 5.- Biodiesel puro B100.....	67
3.3 Procedimiento experimental del autobús ruta verde.....	67
3.3.1 Caso 1.- Diésel.....	72
3.3.2 Caso 2.- Mezcla de biodiesel B10	72
RESULTADOS.....	73
4.1 Resultado de análisis con minibús ecológico.....	73
4.2 Resultado de análisis con autobús ruta verde	80
CONCLUSIONES	85
REFERENCIAS.....	86
APÉNDICE.....	87

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
<i>Tabla</i>	
2.5.3.1 Propiedades del biodiesel vs diesel del petroleo	31
2.7.1 Límites máximos permisibles de opacidad por la NOM-045- SEMARNAT-2006	34
2.7.2 Límites máximos permisibles de opacidad por la NOM-045-SEMARNAT- 2006	35
3.2.2.1 Porcentajes de mezclas de biodiesel B5 utilizado para 5 litros	64
3.2.3.1 Porcentajes de mezcla de biodiesel B10 utilizado para 5 litros	65
3.2.4.1 Porcentajes de mezcla de biodiesel B20 utilizado para 5 litros	66
4.1.1 Temperatura obtenida en ralentí para diésel y biodiesel en los puntos sensibles del motor	74
4.1.2 Máxima temperatura obtenida a 2500 rpm para diésel y biodiesel	75
4.1.3 Valor de opacidad de humos en ralentí emitido por el motor para diésel y biodiesel.....	77
4.1.4 Valor de opacidad de humos a 2500 rpm emitido por el motor para diésel y biodiesel.....	77
4.2.1 Temperatura obtenida en ralentí para diésel y biodiesel	80
4.2.2 Máxima temperatura obtenida a 2500 rpm para diésel y biodiesel	80
4.2.3 Valor de opacidad de humos en ralentí emitido por el motor para diésel y biodiesel.....	82
4.2.4 Valor de opacidad de humos a 2500 rpm emitido por el motor para diésel y biodiesel.....	82

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
<i>Figura</i>	
2.1.1 Clasificación de motores térmicos	12
2.2.1 Vista general del motor.....	14
2.2.2 Vista de la cámara de combustión	16
2.3.1 Cámara de combustión en un motor diésel	17
2.3.2 Carrera de admisión	19
2.3.3 Carrera de combustión	20
2.3.4 Carrera de escape.....	20
2.3.5 Inyección directa.....	21
2.3.6 Inyección indirecta.....	22
2.4.1.1 Sistema de combustible	25
2.5.2.1 Diagrama ilustrativo de producción de biodiesel	29
2.6.1 Ejemplo de una imagen termográfica	32
3.1 Diagrama de la metodología a emplear.....	36
3.2 Minibús ecológico	37
3.3 Autobús ruta verde usado para pruebas	38
3.4 Galón con diésel usado para las pruebas	39
3.5 Aceite vegetal virgen usado para obtener biodiesel	40
3.6 Biodiesel mas glicerina.....	41
3.7 Biodiesel listo para su utilización	42
3.8 Probeta utilizada para medir volumen de bodiesel.....	42
3.9 Vaso precipitado usado para medir volumen de diésel	43
3.10 Mezclas de biodiesel	43
3.1.1 Cámara termográfica FLIR GF320	44
3.1.2 Sonda de gases	45
3.1.3 Opacímetro.....	45
3.1.4 Pinza con sonda	46
3.1.5 Tacómetro digital	46
3.1.6 Estroboscopio.....	47
3.2.1 Acumulador usado para el encendido	48
3.2.2 Bidón de combustible suspendido y conectado a las mangueras	49
3.2.3 Arrancador de motores en aerosol	49
3.2.4 Imagen termográfica visualizada en el display de la cámara	51
3.2.5 Puntos sensibles a cambios de temperatura.....	52
3.2.6 Primera posición de la cámara termográfica	53
3.2.7 Segunda posición de la cámara termográfica	53
3.2.8 Tercera posición de la cámara termográfica	54
3.2.9 Medición de revoluciones por minuto	55
3.2.10 Opacímetro y pinza con sonda	55
3.2.11 Colocación del analizador de emisiones Bosch	56
3.2.12 Menú principal	57

3.2.13	Opacidad diagnosis (MID)	57
3.2.14	Opción Diésel	57
3.2.15	Opción Medición continua	58
3.2.16	Ajuste no. impulsos	58
3.2.17	Ajuste cero	59
3.2.18	Colocación de la sonda dentro del escape	59
3.2.19	Medición continua	60
3.2.20	Funciones de la medición continua	60
3.2.21	Resultados impresos	61
3.2.22	Análisis de opacidad de humos con termografía IR	62
3.2.1.1	Recipiente con diésel usado en las pruebas	63
3.2.1.2	Recipiente con diésel colocado en el minibús	63
3.2.2.1	Recipiente con biodiesel B5	64
3.2.3.1	Recipiente con biodiesel B10	65
3.2.4.1	Recipiente con biodiesel B20	66
3.2.5.1	Recipiente con biodiesel B100	67
3.3.1	Posición de la cámara termográfica IR para el análisis	68
3.3.2	Visualización de partes sensibles del motor	68
3.3.3	Imagen termográfica del motor en ralentí	69
3.3.4	Termografía del motor con aceleración constante	69
3.3.5	Colocación del opacímetro y la sonda	70
4.1.1	Análisis termográfico del motor	73
4.1.2	Gráfica de temperatura del motor en ralentí con diésel y biodiesel	74
4.1.3	Gráfica de temperatura del motor a 2500 rpm con diésel y biodiesel	75
4.1.4	Gráfica de temperaturas del motor usando diésel y biodiesel	76
4.1.5	Gráfica de porcentajes de opacidad de humos con diésel y biodiesel	78
4.1.6	Comparativa visual de las partículas de humo emitidas con diésel y biodiesel	79
4.2.1	Análisis termográfico del motor con aceleración constante	81
4.2.2	Análisis termográfico del motor con aceleración constante	81
4.2.3	Gráfica de porcentajes de opacidad de humos con diésel y biodiesel	83
4.2.4	Comparativa visual de las partículas de humo emitidas con diésel y biodiesel B10	84

INTRODUCCIÓN

La presente tesis tiene como propósito analizar por medio de termografía infrarroja y por opacidad de humos, dos motores de combustión interna a diésel usando diferentes tipos de combustible los cuales describiremos más adelante. Se compararán los resultados de cada motor y se mostrarán los procedimientos experimentales realizados.

Los motores que se utilizarán para dichas pruebas son; un autobús ruta verde de la marca International de la facultad de química y un minibús ecológico con motor Ford de la facultad de ingeniería. Estos motores a diésel cumplen con la función principal que es utilizar el calor del aire altamente comprimido para encender una carga de combustible inyectada en el cilindro, y que para estas pruebas se usará de combustible para el autobús ruta verde, diésel y mezcla de biodiesel en porcentaje; B10 (10% de biodiesel y 90% de diésel). Y para el minibús ecológico se usará biodiesel en porcentajes; B5 (5% de biodiesel y 95% de diésel), B10 (10% de biodiesel y 90% de diésel), B20 (20% de biodiesel y 80% de diésel) y un 100% de biodiesel B100.

Los análisis estarán basados en una comparativa de cada motor usando los combustibles antes mencionados, tomando como medidas de comparación en la termografía; temperatura, tiempo (s) y revoluciones por minuto (rpm.). Y para la opacidad de humos se tomará como medidas de referencia el coeficiente de absorción de luz (m^{-1}), porcentaje de absorción de luz (%), tiempo, rpm y de modo visual con termografía.

Estas comparativas señalan aspectos útiles que pueden ser factores determinantes para la viabilidad en el uso del biodiesel, logrando mayor aceptación en vehículos automotores, principalmente los destinados al transporte de carga y pasajeros, viéndolo como una alternativa para preservar los recursos petrolíferos del país y mitigar los gases de efecto invernadero.

1.1 Antecedentes

La creciente demanda de energía, aumento de los precios del petróleo, el agotamiento de las reservas petroleras y los problemas de contaminación ambiental, asociados a la utilización de combustibles fósiles han despertado un renovado interés por utilizar combustibles alternativos limpios.

Algunas investigaciones como la de *Natural Resources Defense Council (2008)* acerca del calentamiento global nos dice que la segunda causa principal de contaminación mundial por las emisiones de bióxido de carbono son los automóviles emitiendo casi 1,500 millones de toneladas de CO₂ al año. Particularmente en México *SEMARNAT (2002)* nos dice que la principal fuente de gases de efecto invernadero fue el sector energía, responsable de cerca de 70% de las emisiones por consumo de combustibles fósiles, indispensable para mover los autos y otros transportes. Es por eso que el uso del biodiesel en los vehículos automotores se debe apreciar como una alternativa para mitigar los gases de efecto invernadero y así reducir desastres naturales provocados por este efecto. Sin embargo se requieren hacer pruebas para evaluar el impacto que tendría en un vehículo, como es; el rendimiento de combustible, su funcionamiento y los gases emitidos, ya que hay muchas posiciones encontradas respecto a estos temas de interés, que darían pauta a la introducción del uso de biodiesel para los vehículos automotores de nuestro país.

El biodiesel como se ha dicho es un combustible renovable que se puede obtener principalmente a partir de aceites vegetales, animales, así como de aceites reciclados. El biodiesel tiene una ventaja ecológica, en comparación con el diésel de origen fósil, que es reducir las emisiones de gases que provocan el efecto invernadero. Un ejemplo que nos marca la *comisión nacional para el ahorro de energía (CONAE, 2007)* es que el uso de una tonelada de biodiesel, evita la producción de 2.5 toneladas de CO₂ y sobre todo elimina las emisiones de azufre SO₂ del diésel, además, lo que es fundamental; es un combustible renovable y no finito como los hidrocarburos.

El trabajo “*Potenciales y viabilidad del uso de bioetanol y biodiesel para el transporte en México (SENER, 2006)*”, comenta; la producción mundial de biodiesel en el lapso de 1993-2003 creció a una impresionante tasa del 28.5% anual, de 38 a 467 millones de galones. Lo que demuestra que se está tomando gran interés en la producción y uso de biodiesel. Y una prueba de esto es la producción de biodiesel en la UAQ (Universidad Autónoma de Querétaro) por parte de la FQ (facultad de química) y que se está usando en sus camiones para transportar estudiantes.

El biodiesel comúnmente se utiliza en mezclas de B5, B10, B20, y que pueden usarse generalmente sin modificar el motor, sin embargo también se puede emplear un 100% de biodiesel pero que en algunos vehículos es necesario ciertas modificaciones del motor que le permitan evitar problemas de mantenimiento y de desempeño.

De acuerdo con la *Comisión Nacional para el Ahorro de Energía*, México cuenta con un incipiente mercado de automóviles con motores diésel por lo que se considera que el mayor uso de este bioenergético está en los camiones dedicados al transporte de pasajeros, así como el de mercancías que generalmente emplean motores diésel. Sin embargo, cabe mencionar que Europa (principal mercado del biodiesel) cuenta con un mercado muy amplio de automóviles diésel y que actualmente fabricantes como Volkswagen anuncian que sus motores diésel pueden operar con un B100, aunque otros más conservadores como Citroën y Peugeot indican que sus actuales motores pueden emplear hasta una mezcla B30. También en reino Unido, los fabricantes de automóviles mantienen su garantía si no se excede en un 5% de biodiesel. Por su parte, Scania (2007), uno de los fabricantes más importantes de Europa en vehículos para transporte de carga y pasajeros, indica a sus clientes que sus motores pueden emplear biodiesel hasta mezclas B5 sin problema alguno.

En cuanto al comportamiento del motor con diferentes tipos de combustible, el análisis termográfico infrarrojo ayudará a visualizar cambios de temperatura en

puntos críticos del motor. Las variaciones de temperatura permitirán interpretar resultados favorables o desfavorables para la utilización del uso de biodiesel.

De los resultados favorables se encuentran las siguientes referencias; *la agencia internacional de energía (IEA, 2004)* indica que con una mezcla de 1% de biodiesel puede mejorar la lubricidad en un 30%, permitiendo alargar la vida del motor y reducir su ruido. Por otro lado *GM Colmotores y SENA* realizaron pruebas con mezclas de biodiesel B10, B20, B30 y B100 en un motor diésel de la marca Chevrolet, concluyendo que con el uso de las mezclas de biodiesel se observa un incremento en la potencia del vehículo que en promedio es del 18%.

De las investigaciones mencionadas se comprueba que hay una gran ventaja del uso de biodiesel y aún más al elevar el porcentaje de mezcla, pero como consecuencia al incremento de presión y temperatura en la cámara de combustión por tener un punto de inflamación superior al diésel, las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) generalmente se incrementan, aunque también dependerá de la calidad del biodiesel utilizado (número de cetano) y empleando diésel con muy bajo contenido de azufre. Se reduce además con motores modernos, lo cual es descrito por *Hoekman (2012)* en el artículo *Revisión de la composición, propiedades y especificaciones de biodiesel*.

Otro tema importante es la opacidad de humos en los motores diésel, emisiones de mayor toxicidad que son residuos sólidos de los gases de escape, es decir, los humos negros de carbonilla, y que puede ser medido por opacímetros. *GM Colmotores y el Servicio Nacional de Aprendizaje (2002)* utilizó un banco de pruebas especialmente diseñado para análisis de opacidad con mezclas de biodiesel en un motor diésel de la marca Chevrolet, y los resultados demostraron que la opacidad disminuye apreciablemente alcanzando hasta un 17% de reducción con el uso de biodiesel puro. También el grupo de investigaciones de la *Universidad Tecnológica de Bolívar* señala que la opacidad de humos disminuye en tanto se agrega biodiesel a la mezcla entre 20% y 30% para B20 y B50 respectivamente, dependiendo directamente de la afinación del motor y del buen estado de sus componentes (sistema de inyección).

Con relación a la opacidad de humos y al análisis termográfico IR, este trabajo de tesis servirá para ampliar la información que se tiene sobre la importancia que puede tener el utilizar biodiesel en vehículos automotores, especialmente el del transporte público.

IMPORTANCIA AL TRANSPORTE PÚBLICO

El motor diésel es la fuente de energía más eficiente del momento, dentro de su escala, se utiliza en gran parte para el transporte de personas. Aun así los problemas relacionados con nuestra fuerte dependencia de los combustibles fósiles como es el efecto invernadero, la dependencia energética, la contaminación urbana, tienen una creciente importancia en los últimos años.

Ventajas probadas de uso de biodiesel en el sistema de transporte público de pasajeros, es la emisión de gases de escape por encima de todo, han sido los factores determinantes y decisivos para la promoción efectiva de biodiesel como combustible “limpio” ecológicamente, mientras que su uso amplió una contribución importante para el desarrollo sostenible de las ciudades.

El artículo *Marcha de prueba de biodiesel en transporte público (2002)*, se presentan los resultados de la prueba de biodiesel en el transporte público que se refiere a la utilización de este combustible alternativo en condiciones reales de operación en el sistema de transporte público urbano, con especial énfasis en la técnica, ecológica y de aspectos del funcionamiento con el uso de biocombustible.

TRANSPORTE PÚBLICO EN MÉXICO

El consumo de energía en México en 2007 fue de 78.4 PJ (petajoules) per cápita, lo que equivale a decir que cada habitante del país consumió 13 barriles de petróleo crudo al año; que cada uno mantuvo encendidos durante todo un año 22 focos de 110 watts o que consumió 50 tanques de 50 litros de gasolina, datos proporcionados por *la Secretaría de Energía (2007)*.

El sector transporte representa el de mayor consumo de energía (44.8%) y no se espera su disminución conforme a las políticas seguidas por el gobierno, que han favorecido el mayor consumo, caracterizándose por los siguientes factores:

- Incremento del parque vehicular, que ascendió a 20.6 millones de vehículos en 2007.
- Incremento del índice de motorización, aprox. 187 vehículos por cada mil habitantes.
- Crecimiento del movimiento de carga y pasajeros, reflejado en un incremento del parque vehicular a diésel, aunque con mejoras en este combustible.
- Facilidades de crédito por los distribuidores de vehículos, originando mayores ventas y mayor demanda de combustibles.
- Regularización de importación de vehículos usados, ocasionando su incremento.
- Renovación del parque vehicular a diésel por parte de algunas empresas industriales y de servicios, debido al precio competitivo de este combustible frente a otras opciones, como el GLP.
- Mayor adquisición de automóviles a diésel, debido a mejoras en el rendimiento de los motores, elevando la relación de compresión y regulación de la potencia mediante la inyección adecuada de la cantidad de combustible y de mezcla; con ventajas respecto a los vehículos a gasolina por su capacidad de carga, potencia y menor costo de mantenimiento.
- Normas de calidad de combustibles para disminuir las emisiones contaminantes, en lugar de políticas para la reducción del uso del automóvil.
- Aspectos culturales y de seguridad que propician el uso excesivo del automóvil.

- Concesión de aerolíneas de bajo costo por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, así como acondicionamiento de aeropuertos alternos; originado el incremento de las operaciones comerciales, de negocios y de turismo, y por lo tanto, el aumento en la demanda de turbosina.

Las gasolinas mantuvieron su predominio como el combustible de mayor demanda en el sector transporte en el año 2007, con una participación del 69.7% (760,300 b/d), siguiéndole el diésel con 27.5% (300,100 b/d), el Gas LP con el 2.4% (28,900 b/d) y con una muy pequeña proporción de gas natural (0.02%).

ANTECEDENTES EN LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO.

- AUTOBÚS ECOLÓGICO

En la ciudad de Querétaro particularmente en la facultad de ingeniería se desarrolló un autobús ecológico que reduce el 30% la emisión de gases de efecto invernadero.

El minibús tiene capacidad para 18 personas sentadas, es ergonómico, funciona con biodiesel reciclado y corre a una velocidad de alrededor de 90 km/h.

- PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

La FQ realiza una producción de biodiesel en sus laboratorios, siendo el primer plantel educativo en el estado en generar este tipo de combustibles para utilizarlo en sus propios vehículos, en promedio se producen 180 litros semanales de biodiesel que se utiliza en uno de los camiones que transporta estudiantes al campus Amazcala, y además de rendir 200 km más que el diésel común, genera ahorros por cerca de 2 mil pesos.

VENTAJAS DEL BIODIESEL

- Se puede obtener a través de fuentes renovables, así como de aceites reciclados que contribuyen a la conservación del medio ambiente.
- En México se pueden emplear varios tipos de cultivos para su obtención.
- Reduce en gran medida la emisión contaminantes como es el caso del monóxido de carbono, hidrocarburos, así como partículas (en la medida en que se emplea una mezcla con mayor contenido de biodiesel, las emisiones de los contaminantes citados tienden a reducirse considerablemente) con respecto al diésel. Esto evita la contaminación del medioambiente y brinda un almacenamiento del biodiesel más seguro que el del diésel.
- Tiene mayor lubricidad y por tanto permite alargar la vida del motor y reducir su ruido.
- Mayor poder disolvente, que hace que no se produzcan depósitos de carbón en los conductos internos del motor y por tanto permite mantener limpio el interior de este. Asimismo mantiene limpios los inyectores.
- Biodiesel es un producto no tóxico y biodegradable.
- Dada su alta solubilidad con los combustibles fósiles puede ser mezclado con los mismos en distintas proporciones.

DESVENTAJAS DEL BIODIESEL

- Las emisiones de NOx generalmente se incrementan debido al incremento de presión y temperatura en la cámara de combustión, sin olvidar que también se incrementa debido al uso de biodiesel de baja calidad (con un bajo número de cetano).
- Al ser el biodiesel un mejor solvente ataca toda aquella pieza construida a partir de caucho o goma, por ejemplo mangueras y juntas de motor.
- Los costos de la materia prima aún son elevados con respecto al combustible de origen fósil.

1.2 Objetivos

Se describe el objetivo general y objetivos particulares planteados para el desarrollo de la presente tesis.

1.2.1 Objetivo general

El principal objetivo de este trabajo de tesis es analizar por medio de termografía infrarroja y por opacidad de humos dos motores de combustión interna a diésel usando como combustible diésel y mezclas de biodiesel, haciendo una comparativa de los resultados obtenidos en cada motor.

1.2.2 Objetivos particulares

Para el minibús ecológico y el autobús ruta verde se llevarán a cabo los siguientes puntos:

- Realizar pruebas de funcionamiento de los motores diésel (ignición, aceleración, rpm).
- Obtener diferente toma visual con la cámara termográfica IR e identificar cambios de temperatura en partes sensibles del motor.
- Determinar valores de tiempo y temperatura estables, es decir, cuando el motor se encuentra trabajando en ralentí y su temperatura no cambia.
- Determinar valores de tiempo y temperatura con aceleración constante.
- Suministro de los diferentes combustibles y mezclas al término de cada prueba.
- Obtener medidas de opacidad e imagen termográfica IR de los gases emitidos.
- Realizar tablas y gráficas comparativas, de los resultados obtenidos en cada una de las pruebas con análisis termográfico y de opacidad.
- Retroalimentación de resultados y experiencias, con la FQ referente al biodiesel que producen y a su autobús ruta verde.

1.3 Justificaciones

La contaminación ambiental ha alcanzado niveles muy altos, debido al excesivo uso de combustibles derivados del petróleo, aunado a esto existe un problema aun mayor, el de no ser renovable. Lo que orilla a la búsqueda e implementación de nuevas formas de energía alterna, para la disminución de la dependencia de los combustibles derivados del petróleo y a la disminución de agentes contaminantes.

Una alternativa para reducir las emisiones contaminantes y el uso de los combustibles derivados del petróleo es la utilización del biodiesel, el cual es un combustible basado en aceites vegetales o grasas animales.

Es importante destacar que los combustibles derivados del petróleo emiten una cantidad mayor de CO₂ y SO₂ a la atmosfera, en comparación a los combustibles desarrollados a base de aceites vegetales o grasas animales.

Con base en lo anterior y en la poca existencia de información, se busca ampliar el tema del comportamiento de un motor diésel al trabajar con biodiesel, siendo la primera vez que se hacen pruebas de este tipo empleando análisis termográfico IR y de opacidad en motores diésel en la FI, además será un antecedente y complemento de información para la FQ respecto al biodiesel que producen y al autobús que usan para pruebas con biodiesel.

Con la incorporación de la nueva línea terminal en ingeniería automotriz este análisis comparativo servirá de antecedente para los estudiantes de esta área y para futuras investigaciones.

HIPÓTESIS

En este trabajo de tesis se realizará un monitoreo de las emisiones de humos usando dos tipo de combustibles, diésel y biodiesel, esto con ayuda de una cámara termográfica IR que demostrará con cuál de los dos combustibles se emiten menos humos de manera cualitativa, y se validará con un sistema de

monitoreo de emisiones con el cual mediremos la opacidad de humos emitido por el sistema de combustión.

1.4 Metas

- Obtener un análisis termográfico IR de motores diésel utilizando diésel y mezclas de biodiesel.
- Obtener un análisis de opacidad de humos de motores diésel utilizando diésel y mezclas de biodiesel.
- Visualizar con termografía IR opacidad de humos emitido por el escape utilizando diésel y mezclas de biodiesel.
- Obtener tablas, gráficas e imágenes comparativas de los resultados.

MARCO TEÓRICO

2.1 Definición de motor

Es una maquina destinada a producir energía a partir de la combustión de aceite pesado en una masa de aire, la cual ha sido previamente comprimida hasta alcanzar una presión suficientemente elevada. El calor es convertido en energía mecánica.

CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES

- a) MOTORES TERMICOS
 - Motores de combustión interna
 - Motores de combustión externa
- b) MOTORES ELECTRICOS

CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES TÉRMICOS

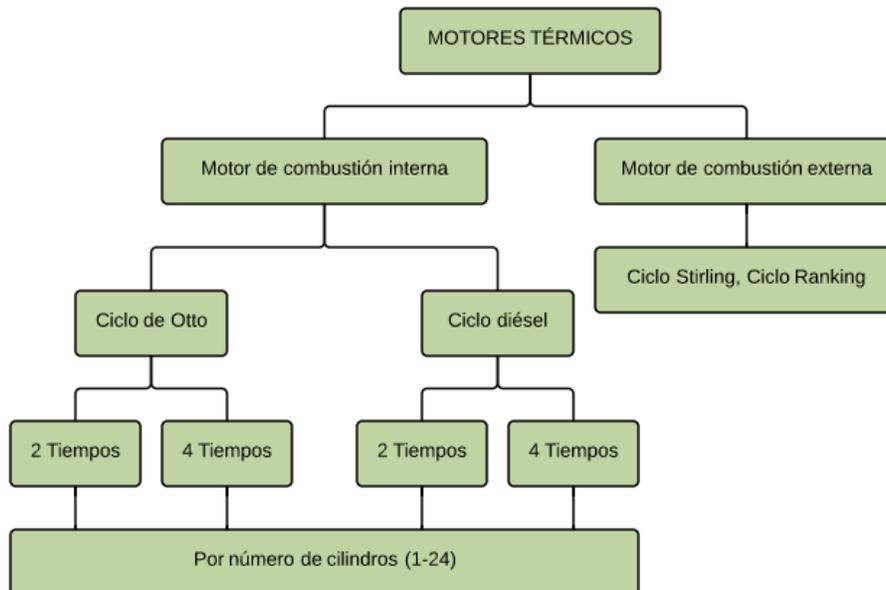


Figura 2.1.1 Clasificación de motores térmicos.

2.2 Motor diésel

El motor diésel es una máquina de combustión que aspira aire y lo comprime a una presión muy elevada. Seguidamente debe introducirse el combustible dentro del cilindro en forma de chorro muy pulverizado para formar una nube de pequeñas gotas que se dispersan en el aire, con lo cual se consigue una mezcla homogénea de combustible y aire, lo que es condición para que la combustión sea rápida y completa, generándose una enorme cantidad de calor. Este calor es recibido por la propia mezcla combustible en proceso de combustión que tratara de dilatarse y empujara al pistón transmitiendo el impulso a la manivela del cigüeñal y de esta forma se producirá energía mecánica. Por último, cuando el motor haya finalizado su carrera de combustión y los gases contenidos en el cilindro hayan perdido presión, los gases consumidos deben ser expulsados al exterior por medio del escape.

Los elementos del motor que forman su constitución pueden dividirse en las siguientes partes elementales:

ELEMENTOS FIJOS

Son los que componen la estructura externa del motor, cuya misión es la de alojar, sujetar y tapar a otros elementos del conjunto, como: el bloque del motor (monoblock), la culata (cabeza de cilindros), el cárter y la tapa de balancines.

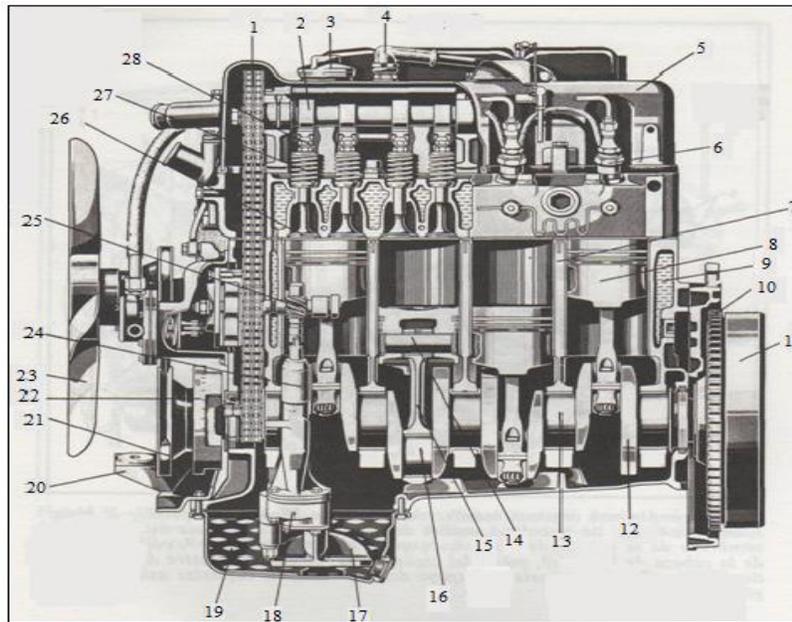


Figura 2.2.1 Vista general del motor.¹

- | | |
|---|---|
| 1. Cadena de la distribución | 10. Corona dentada del volante |
| 2. Eje de levas | 11. Volante de inercia |
| 3. Tapón de las bandas de balancines | 12. Contra peso del cigüeñal |
| 4. Conducto de los vapores del compartimiento de los balancines | 13. Cuello del cigüeñal |
| 5. Tapa de los balancines | 14. Eje del volante |
| 6. Inyector | 15. Biela |
| 7. Paredes de los cilindros | 16. Muñequilla del cigüeñal |
| 8. Émbolo | 17. Pre-filtro del aceite |
| 9. Cámara de refrigeración | 18. Bomba de aceite |
| | 19. Aceite del cárter |
| | 20. Punto de sujeción del motor al bastidor |

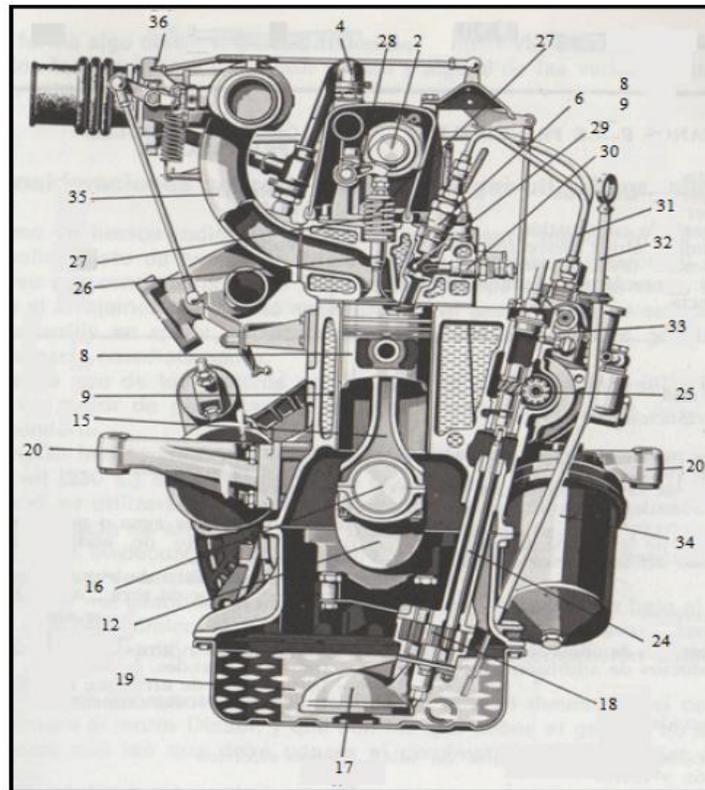


Figura 2.2.2 Vista de la cámara de combustión.¹

- | | |
|---|--|
| 1. Polea del cigüeñal | 9. Antecámara de combustión |
| 2. Marcas de puesta a punto | 10. Bujía de precalentamiento |
| 3. Ventilador | 11. Tubo que une la bomba de inyección del motor |
| 4. Eje de accionamiento de la bomba de aceite | 12. Varilla del nivel de aceite del cárter |
| 5. Piñón sobre el eje que acciona a las válvulas de inyección, alimentación y refrigeración | 13. Conjunto bomba de inyección regulador y avance |
| 6. Válvula | 14. Filtro de aceites |
| 7. Muelle de válvulas | 15. Conducto de admisión |
| 8. Semi-balancín | 16. Difusor del regulador del vacío |

¹Referencia: Edgar J. Kates (2003).

ELEMENTOS MÓVILES

Son los encargados de transformar la energía química del combustible en energía mecánica, como: los pistones, las bielas, el cigüeñal, y el volante de inercia.

2.3 Ciclo de trabajo

Un ciclo es una secuencia completa de fases separadas, cuando el cilindro está limpio de gases consumidos, se encontrara en condiciones de recibir una carga de aire y comenzar el ciclo. El ciclo de trabajo de los motores diésel se defines en cuatro tiempos y dos tiempos. Los motores usados para esta tesis son de cuatro tiempos, un ciclo completo tiene lugar a través de cuatro carreras de pistón (una ascendente, una descendente, una ascendente y una descendente).

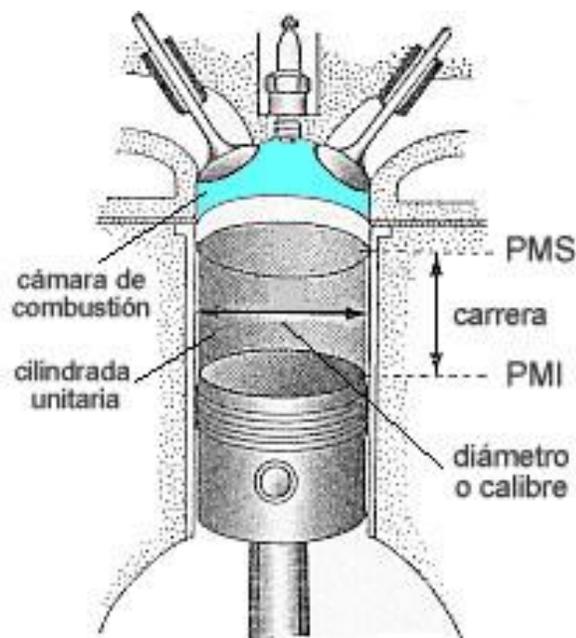


Figura 2.3.1 Cámara de combustión en un motor diésel.¹

¹Referencia: Edgar J. Kates (2003).

PRIMER TIEMPO (ADMISIÓN)

La válvula de admisión está abierta completamente cuando el émbolo pasa por el Punto Muerto Superior (PMS), mientras baja hasta el Punto Muerto Inferior (PMI) crea un vacío en el interior del cilindro y aspira aire solo. Cuando llega al PMI el cilindro está lleno de aire a la presión de casi una atm ($1\text{Kg}/\text{cm}^2$) aproximadamente y a la temperatura ambiente. La válvula de escape ha permanecido cerrada durante todo este tiempo.

SEGUNDO TIEMPO (COMPRESIÓN)

Compresión y principio de la inyección, en el PMI se cierra la válvula de admisión y al encender el émbolo va comprimiendo al aire que hay en el interior del cilindro hasta reducir su volumen al de la cámara de combustión. La válvula de escape continúa cerrada. Al final de la compresión el volumen del aire se reduce de catorce a veintitrés veces, su temperatura se eleva a más de $600\text{ }^\circ\text{C}$ y su presión de 30 a $50\text{ kg}/\text{cm}^2$.

TERCER TIEMPO (EXPANSIÓN)

Después de alcanzar el PMS el émbolo desciende hasta el PMI, las dos válvulas permanecen cerradas. La máxima presión de la cámara se alcanza poco después del PMS. Los gases se expanden y empujan el émbolo (pistón) hacia el PMI, transmitiendo una fuerza a través de la biela que actúa sobre el cigüeñal dándole un nuevo impulso de rotación. Esta es la carrera de trabajo del motor.

CUARTO TIEMPO (ESCAPE)

Después del PMI el émbolo se dirige de nuevo hacia el PMS expulsando a los gases a través de la apertura de la válvula de escape, que se ha abierto poco antes de que termine la carrera de expansión. La válvula de admisión permanece cerrada al llegar el émbolo del PMS empezara un nuevo ciclo.

Generalmente, en el colector de admisión, no hay válvula de mariposa que determine la cantidad de aire que debe llegar a los cilindros que dependerá de la aspiración o succión de los pistones (vacío que se crea en los cilindros) y en los motores sobrealimentados del compresor volumétrico o del turbo-compresor.

Mediante el pedal del acelerador se determina la cantidad de combustión que se inyecta en el tercer tiempo, actuando sobre la bomba inyectora. Una vez que el aire se encuentra comprimido en la cámara de combustión (momento de la máxima temperatura del aire) se inyecta el combustible, inflamándose la mezcla por auto combustión.

No obstante, el diésel precisa un pequeño tiempo para adquirir la temperatura necesaria para su combustión, cuyo tiempo se conoce como “retraso en la iniciación de la combustión” o “retardo a la inflamación”.

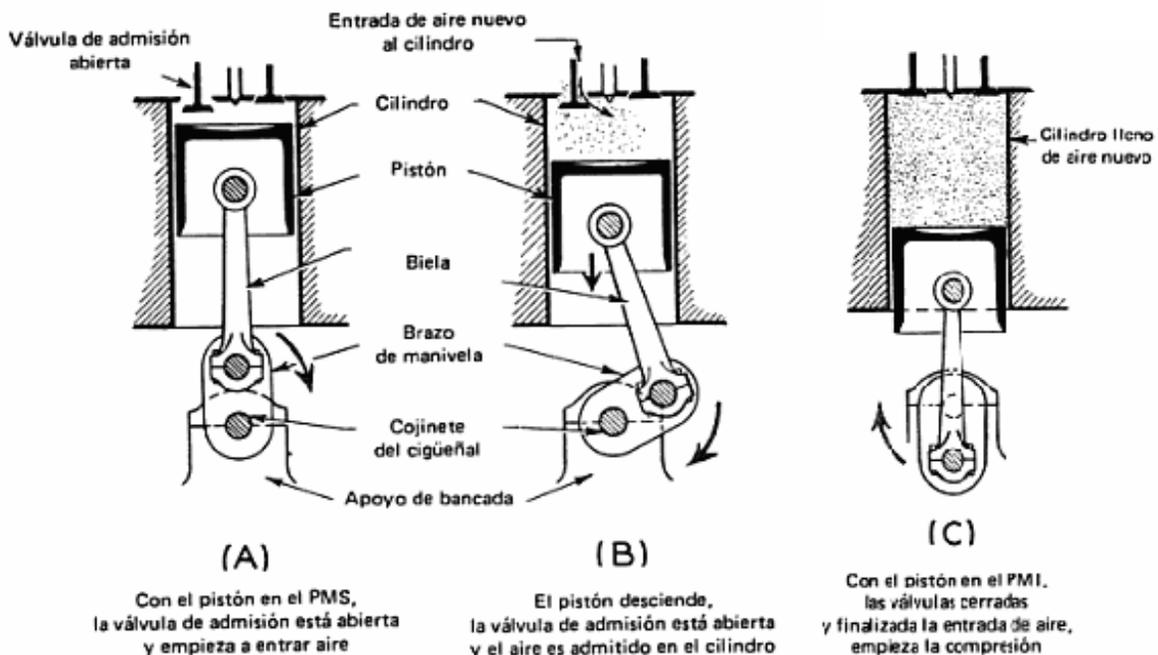


Figura 2.3.2 Carrera de admisión.¹

¹Referencia: Edgar J. Kates (2003).

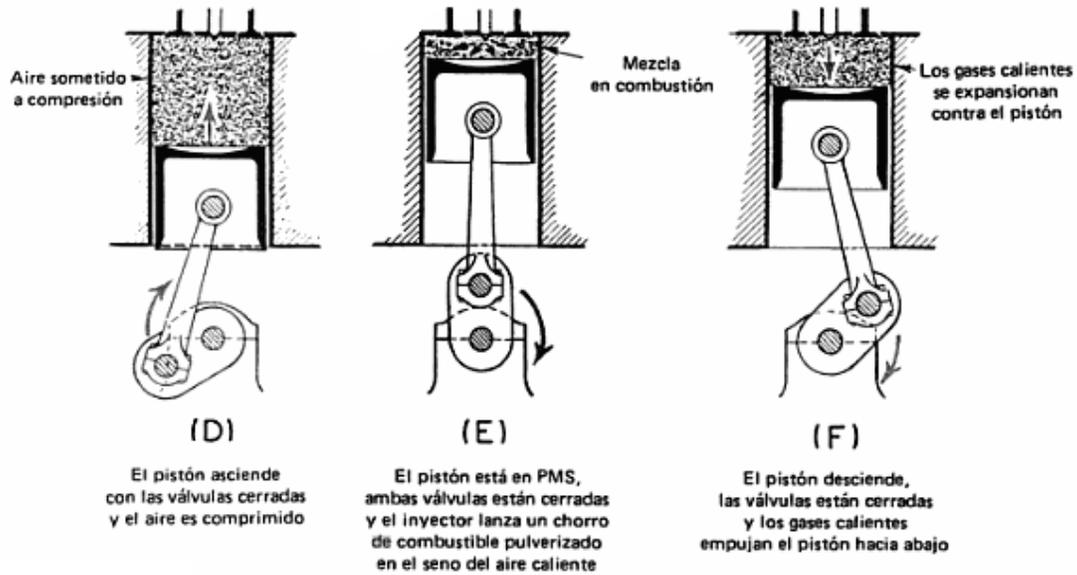


Figura 2.3.3 Carrera de combustión.*

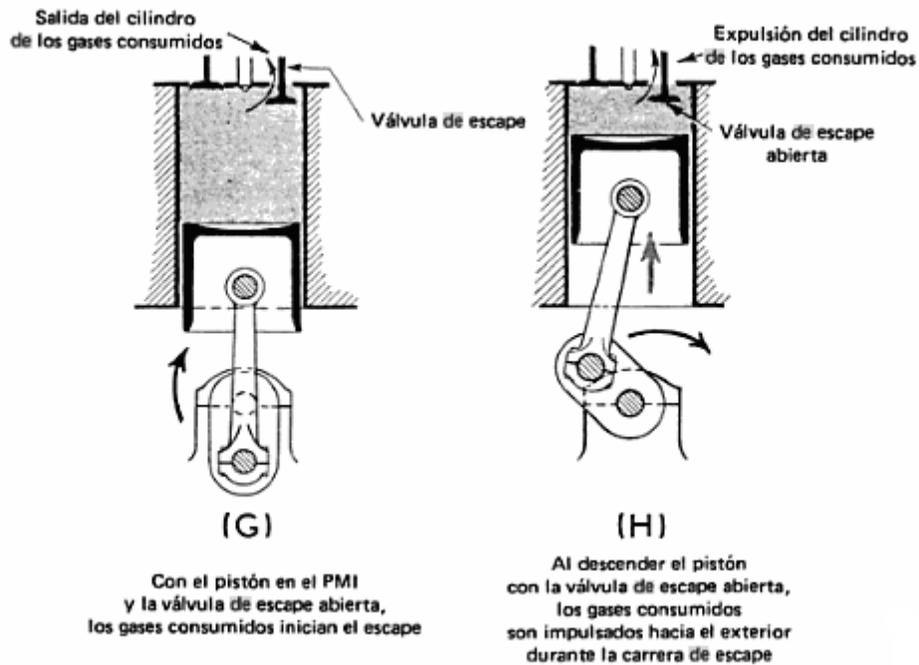


Figura 2.3.4 Carrera de escape.*

*Referencia: Edgar J. Kates (2003).

CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES DIÉSEL

Según sea el tipo de inyección y de cámara empleada en los motores diésel se clasifican en dos grupos:

- Motores de inyección directa o de cámara abierta.
- Motores de inyección indirecta o de cámara dividida.

1. Sistema de inyección directa

El combustible se inyecta directamente en la cámara de combustión (situada por lo general en el pistón) por un inyector de múltiples orificios.

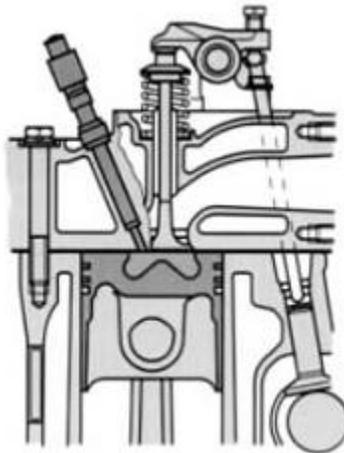


Figura 2.3.5 Inyección directa.

2. Sistema de inyección indirecta

Se tiene una pre-cámara donde se inyecta el combustible e inicia la combustión aunque no puede realizarse totalmente por falta de aire. Generalmente el inyector es de un solo orificio encarado con el conducto estrecho que une la antecámara y la cámara principal de combustión que es donde termina de realizarse el total de la combustión y que puede hallarse o no totalmente en el cilindro.

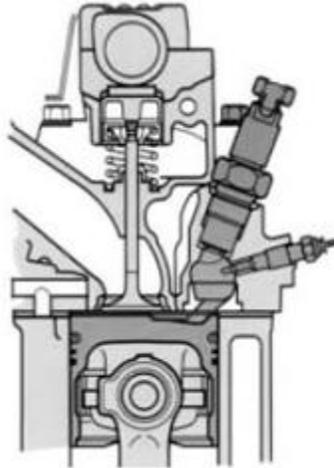


Figura 2.3.6 Inyección indirecta.

2.4 Sistemas del motor diésel

En la constitución del motor diésel encontraremos dividido su funcionamiento en sistemas, los cuales básicamente pueden ser:

a) Sistema de distribución

El sistema de distribución es el conjunto de órganos que aseguran, en el momento preciso, la apertura y el cierre de las válvulas de admisión y de escape, (entrada y salida de los gases en el cilindro) y de ello dependerá el correcto funcionamiento del motor.

b) Sistema de alimentación

El sistema de combustible tiene como finalidad hacer llegar combustible a una determinada presión para la inyección del mismo en diversas condiciones del funcionamiento del motor.

En los motores diésel existen tres tipos de circuitos de combustible según sea la posición del depósito, y son:

- Circuito con depósito de salida por gravedad

- Circuito con depósito auxiliar
- Circuito con depósito a nivel inferior

c) Sistema de enfriamiento

Con el motor funcionando, llegan a producirse temperaturas de hasta 2200°C, lo que en algunos casos, podría llegar a fundir las piezas metálicas, por lo que es necesario utilizar un sistema de refrigeración capaz de evacuar parte del calor producido por la combustión.

El calor que ha de absorberse no ha de ser ni poco (se producirán dilataciones excesivas) ni demasiado (bajaría el rendimiento del motor), aproximadamente un 30%.

Las altas temperaturas, además de dilatar, hacen que el llenado de los cilindros sea escaso y el aceite de lubricación pierda sus propiedades lubricantes.

Las partes que requieren mayor enfriamiento son las que están sometidas a más altas temperaturas, como son:

- La culata (especialmente la zona próxima a la válvula de escape).
- Las válvulas (con sus asientos y guías).
- Los cilindros (debido al roce del pistón).

El enfriamiento de estas piezas se hace a costa de calentar el aire del ambiente, renovándose constantemente.

d) Sistema de lubricación

El sistema se emplea para evitar el elevado desgaste, recalentamiento y atascamiento de las superficies frontales; para disminuir el consumo de la potencia indicadora por pérdidas mecánicas del motor y eliminar productos del desgaste. En algunos motores el sistema de lubricación se utiliza para enfriar el fondo del émbolo. Además el aceite mejora el empaque para aros de

embolo del espacio por encima del embolo y protege a las piezas del motor de la corrosión.

2.4.1 Funcionamiento del Sistema de combustible

La bomba de aspiración succiona combustible del depósito a través de una rejilla filtrante, que se encuentra en el extremo del tubo de aspiración. Este combustible llega a través de un primer filtro que elimina las impurezas más gruesas que lleva en su suspensión el gasóleo. Después la bomba lo manda al filtro del combustible y de ahí pasa a la bomba de inyección, que lo manda a los inyectores.

La bomba de inyección suministra el combustible necesario a presión a los distintos cilindros, a los que pasa a través de los inyectores, que lo pulverizan. Desde ello, el sobrante que no entra en los cilindros se hace retornar por los conductos de rebose.

En el circuito de alta presión, los tubos entre la bomba de inyección y los inyectores se fabrican siempre de acero, a causa de las altas presiones que alcanza el combustible durante el funcionamiento del motor. Para asegurar el ajuste correcto de cada cilindro y una capacidad de inyección uniforme para todos ellos, los tubos deben tener la misma longitud entre sí, ya que el cambio de longitud altera el punto de inyección de un cilindro respecto a los demás.

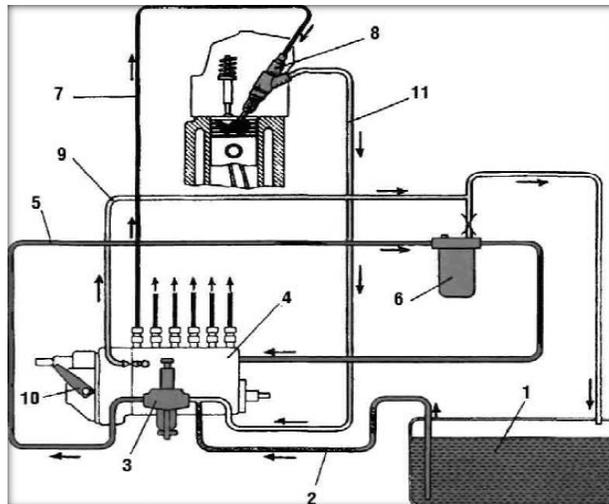


Figura 2.4.1.1 Sistema de combustible.¹

- | | |
|---|--|
| 1. Depósito de combustible | 7. Tubo de impulsión |
| 2. Tubería de acceso a la bomba de alimentación | 8. Inyector |
| 3. Bomba de alimentación | 9. Conducto de Rebose de la bomba de inyección |
| 4. Bomba de inyección | 10. Regulador |
| 5. Tubería hacia el filtro | 11. Conducto de rebose del inyector |
| 6. Filtro | |

¹Referencia: Edgar J. Kates (2003).

2.5 Combustibles

Combustible es cualquier material capaz de liberar energía cuando se cambia o transforma su estructura química. Supone la liberación de una energía de su forma potencial a una forma utilizable.

Los combustibles fósiles o combustibles minerales son mezclas de compuestos orgánicos que se extraen del subsuelo con el objetivo de producir energía por combustión.

La mayor parte de la energía empleada actualmente en el mundo proviene de los combustibles fósiles. Los utilizamos en el transporte, para generar electricidad, para calentar ambientes, para cocinar, etc.

Sin embargo en la actualidad la creciente demanda de energía, aumento de los precios del petróleo, el agotamiento de las reservas petrolíferas y los problemas de contaminación ambiental, asociados a la utilización de combustibles fósiles han despertado un renovado interés por descubrir y usar combustibles alternativos limpios.

2.5.1 Diésel

El combustible diésel es una mezcla compleja de hidrocarburos compuestos principalmente de parafinas y aromáticos, con un contenido de olefina que alcanza solamente a un pequeño porcentaje por volumen. La combustibilidad de un combustible diésel en los motores diésel se caracteriza por su número de cetano, el cual es una medida de su capacidad para ser sometido a ignición de compresión, bajo condiciones de prueba estándar. Los combustibles con un número mayor de cetano se queman más fácilmente en los motores de ignición de compresión.

PROPIEDADES DE LOS COMBUSTIBLES DIÉSEL

Estos combustibles tienen ciertas propiedades que los hacen adecuados para emplearlos en los motores diésel.

- VISCOSIDAD:

Debe ser bastante baja la atomización para la fácil pulverización en la cámara de combustión.

- PUNTO DE INFLAMACIÓN:

Es la temperatura a la cual el combustible empieza a despedir un vapor, que se inflama de inmediato si hay una chispa o una llama. El PI de los combustibles diésel es de unos 55 °C, lo cual los hace mucho más seguros para el manejo y el almacenamiento que la gasolina, que se vaporiza a todas las temperaturas atmosféricas normales.

- TEMPERATURA DE AUTOIGNICIÓN:

Es la temperatura a la cual el combustible atomizado se inflama y arde sin la ayuda de una chispa. Una baja temperatura de autoignición significa que el motor arrancará con facilidad y funcionará con menor cascabeleo. Esta temperatura es de alrededor de 250 °C para los combustibles diésel.

- CUALIDADES ADECUADAS PARA IGNICIÓN:

El número cetano de un combustible diésel es una medida de su calidad de ignición o de su facilidad para arder en la cámara de combustión. Los combustibles con bajo número cetano necesitan más tiempo para inflamarse después de inyectarlos, con lo que ocasionan una demora más larga, y cuando tiene lugar la ignición, habrá tendencia a un mayor

cascabeleo cuando el combustible acumulado se inflama en forma súbita y aumenta la presión.

Por otra parte, si el número cetano es suficientemente alto, el combustible se inflamará y comenzará a arder casi tan pronto como empieza la atomización. Por lo tanto, la presión de combustión aumentará uniformemente y no habrá cascabeleo.

- CONTENIDO DE AZUFRE

Todos los combustibles diésel contienen cierta cantidad de azufre. Un contenido de azufre demasiado alto produce desgaste excesivo de los cilindros por la formación de ácidos en el aceite lubricante. Los combustibles no deben contener más de 0.5% de azufre.

- AUSENCIA DE CONTAMINANTES

Dado que las holguras en las piezas para inyección de combustible son tan pequeñas, que hay que impedir que entren al combustible los contaminantes en cualquier forma, como agua, polvo, herrumbre o incrustaciones, antes de poner el combustible en el tanque del vehículo. Los contaminantes pueden ocasionar costosos daños en un tiempo tan corto.

2.5.2 Biodiesel

El biodiesel, denominado también biogasóleo o diester, es un combustible renovable sustituido del diésel que proviene del procesamiento de aceites vegetales, tanto naturales como reciclados (soya, girasol, palma, etc.) y de grasas animales. Se obtiene mediante el proceso de transesterificación de los aceites por reacción química con el alcohol para formar esteres grasos (biodiesel) y glicerina.

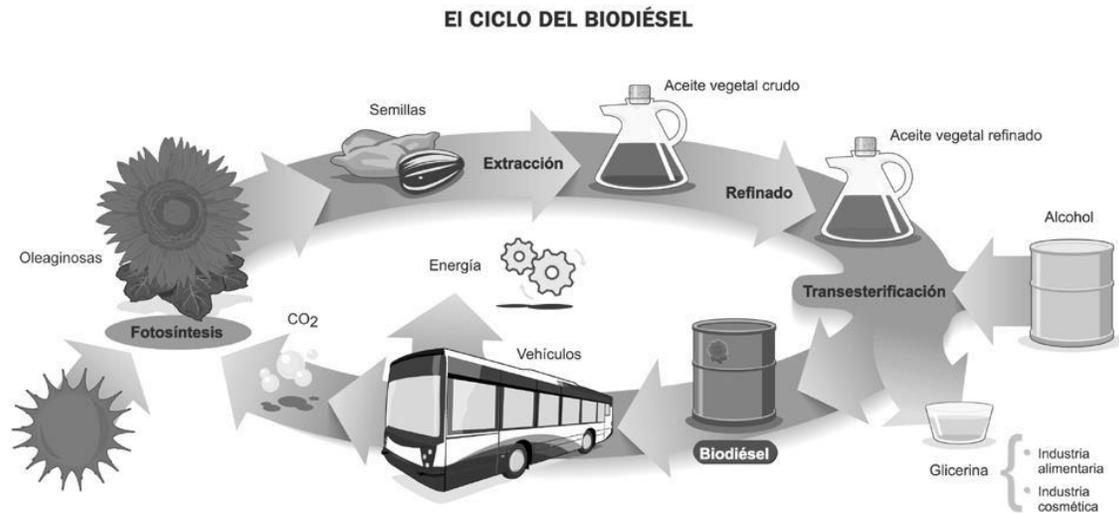


Figura 2.5.2.1 Diagrama ilustrativo de producción de biodiesel (www.energía12.com).

Es un producto no tóxico y biodegradable, que por poseer características físicas y fisicoquímicas muy similares a las del diésel, se ha convertido en uno de los combustibles más eficaces como reemplazo del diésel.

MATERIAS PRIMAS

- Aceites vegetales: Proviene de todo tipo de plantas oleaginosas (palma africana, soya, higuera, girasol, colza, jatrofa, entre otros).
- Grasas animales: Se pueden obtener como subproductos del faenamiento de ganado vacuno, porcino, etc.

NORMAS APLICABLES AL BIODIESEL

La normalización es un proceso voluntario mediante el cual se desarrollan especificaciones técnicas basadas en el consenso entre todas las partes interesadas (la industria, incluidas las pequeñas y medianas empresas, consumidores, sindicatos, ONG medioambientales, autoridades públicas, etc.).

La normalización es llevada a cabo por organismos independientes de normalización, que actúan a escala nacional, europea e internacional. Es una herramienta reconocida y aceptada por compradores y vendedores que garantizan la calidad y el comportamiento del producto al establecer parámetros claramente definidos.

Las siguientes normas están estrechamente relacionadas con el biodiesel:

- EN (Norma Europea).
- ASTM (American Society for Testing and Materials).

2.5.3 Comparación entre diésel y biodiesel

Realizar una comparativa exacta entre el diésel y biodiesel es casi imposible ya que dependerá mucho de su procesamiento así como de la materia prima a utilizar. En la *tabla 2.5.3.1* se comparan las propiedades físicas y químicas promedio del biodiesel y del diésel del petróleo; indicándose las normas ASTM establecidas para obtener una calidad uniforme de los combustibles.

Tabla 2.5.3.1 Propiedades del biodiesel vs diésel del petróleo.

PROPIEDADES	BIODIESEL	DIÉSEL
Norma del combustible	ASTM D975	ASTM PS121
Composición	C12-C22 FAME	C10 – C21 HC
Metilester	95.5 - >98% (normas)	-
Carbono (% peso)	77	86.5
Azufre (% peso)	0 - 0.0024	0.05 máx.
Agua (ppm peso)	0.05 % max.	161
Oxígeno (% peso)	11	0
Hidrogeno (%peso)	12	13
No. Cetano	48 – 55	40 – 55
PCI (KJ/Kg)	37,700	41,860
Viscosidad cinem. (40° C)	1.9 – 6.0	1.3 – 4.1
Punto de inflamación (°C)	100 – 170	60 – 80
Punto de ebullición (°C)	182- 338	188 – 343
Gravedad específica (Kg/l)(60°F)	0.88	0.85
Relación de aire/combustible	13.8	15

2.6 Termografía infrarroja

Todos los materiales que estén a una temperatura por encima del cero absoluto (0 K, -273°C) emiten energía infrarroja. La energía emitida en la banda infrarroja se convierte en una señal eléctrica por el detector (microbolómetro), esta señal se convierte en una imagen en blanco y negro, o color. El principio básico se describe a continuación.

RADIACIÓN INFRARROJA (IR)

La radiación infrarroja es una forma de radiación electromagnética como las ondas de radio, las microondas, rayos ultravioleta, rayos gamma, la luz visible, etc.

Todas estas formas de radiación en conjunto dan lugar al espectro electromagnético. Tiene en común que todas ellas emiten energía en forma de ondas electromagnéticas y se propagan a la velocidad de la luz.

La radiación infrarroja se define como aquella que tiene una longitud de onda entre $0,78 \mu\text{m}$ y $1000 \mu\text{m}$ (micras). Los rayos infrarrojos se subdividen en función de la proximidad de longitud de onda a la luz visible (cercano, medio y lejos).

Las cámaras termográficas IR que se emplean en la industria funcionan todas en la banda de infrarrojos medios (son las que detectan los llamados microbolómetros no refrigerados).

Las cámaras termográficas IR detectan la radiación infrarroja invisible que emiten los objetos y lo transforma en una imagen dentro del espectro visible en la que la escala de colores (o grises) refleja las distintas intensidades.

La intensidad de la radiación infrarroja es en función de la temperatura pero no sólo de ella, influyen también las características superficiales del objeto, el color y el tipo de material.

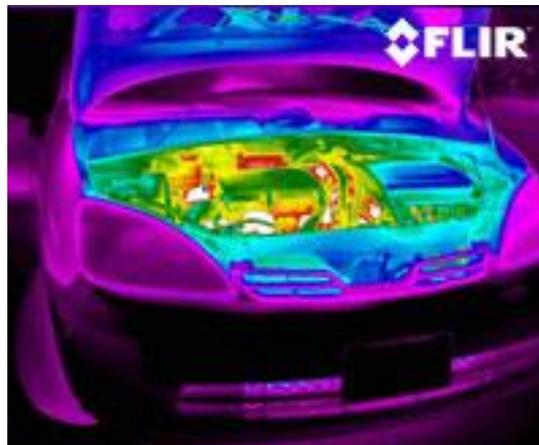


Figura 2.6.1 Ejemplo de una imagen termográfica (Flir user's manual).

2.7 Opacímetro de humos

En los motores diésel debido a que su combustión natural se genera bajo mezcla con exceso de aportación de aire, las emisiones de CO de los gases de escape son muy reducidas y por el contrario, las emisiones de mayor toxicidad son los residuos sólidos de los gases de escape, es decir, los humos negros de carbonilla. Para controlar esta cantidad de emisiones de escape en los motores diesel, se utilizan los opacímetros, que básicamente constan de una cámara de medición que porta en su interior un emisor y un receptor de luz. Al recircular por el interior de esta cámara de medición los humos de los gases de escape, se genera una absorción del haz de luz emitido hacia el receptor, en función de la mayor o menor cantidad de “negritud” del humo. Esta reducción de luminosidad nos facilita la medición porcentual de la opacidad de los gases de escape.

El opacímetro de humos deberá medir de manera continua el coeficiente de absorción de luz (coeficiente de absorción de una columna diferencial de gas de escape a la presión atmosférica y a una temperatura de 70°C expresado m^{-1}) y el porcentaje de opacidad del humo de escape del motor del vehículo, registrando el valor máximo en cada aceleración.

El coeficiente K de absorción de luz se calcula con la fórmula 1:

$$(1) \varnothing = \varnothing_0 e^{-KL}$$

dónde:

L = Longitud efectiva del paso de la luz a través de la muestra de gas.

\varnothing_0 = Flujo incidente.

\varnothing = Flujo emergente.

La relación entre la escala lineal de 0 a 100% (cero a cien por ciento) de opacidad y el coeficiente K de absorción de la luz es dado por la fórmula 2:

$$(2) K = \frac{-1 \ln(1-N)}{L 100}$$

El porcentaje de opacidad está dado por la fórmula 3:

$$(3) N = (1 - e^{-kl}) * 100$$

dónde:

L = La longitud efectiva del paso de la luz a través de la muestra de gas.

N = Una lectura en la escala lineal.

K = Valor correspondiente del coeficiente de absorción.

ln = Logaritmo natural.

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE OPACIDAD

Los límites máximos permisibles de opacidad del humo proveniente del escape de los vehículos automotores en circulación equipados con motor a diésel, en función del año-modelo del vehículo y cuyo peso bruto vehicular sea de hasta 3856 kg, es el establecido en la *Tabla 2.7.1* por la *Norma Oficial Mexicana NOM-045-SEMARNAT-2006*.

Tabla 2.7.1 Límites máximos permisibles de opacidad por la NOM-045-SEMARNAT-2006.

Año-modelo del vehículo	Coefficiente de absorción de luz (m⁻¹)	Por ciento de opacidad (%)
2003 y anteriores	2.5	65.87
2004 y posteriores	2.0	57.68

Los límites máximos permisibles de opacidad del humo proveniente del escape de los vehículos automotores en circulación equipados con motor a diesel, en función del año-modelo del vehículo y con peso bruto vehicular mayor a 3857 kg, son los establecidos en la *Tabla 2.7.2*.

Tabla 2.7.2 Límites máximos permisibles de opacidad por la NOM-045-SEMARNAT-2006.

Año-modelo del vehículo	Coefficiente de absorción de luz (m^{-1})	Por ciento de opacidad (%)
1990 y anteriores	3.0	72.47
1991 y posteriores	2.5	65.87

METODOLOGÍA

Para la presente tesis las pruebas serán llevadas a cabo en la Universidad Autónoma de Querétaro campus Querétaro y campus San Juan del Río.

Se describe a continuación la metodología a emplear para este trabajo la cual será descrita más adelante.

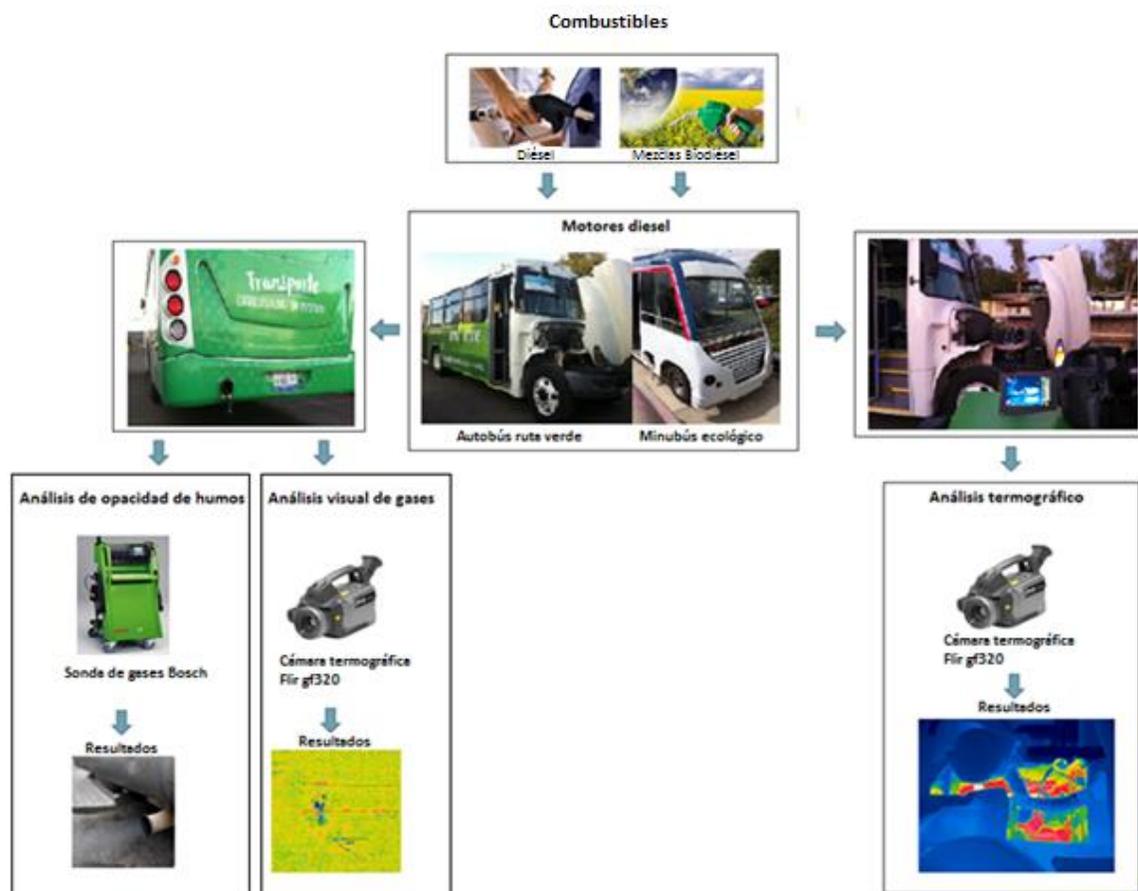


Figura 3.1 Diagrama de la metodología a emplear.

CARACTERISTICAS DEL MINIBÚS ECOLÓGICO

- Marca: Ford
- Motor: Power Stroke
- Línea: F-250
- Modelo: 1999
- Cilindraje: 8
- HP: 235 HP



Figura 3.2 Minibús ecológico.

Encontrar y analizar diferencias en el comportamiento del motor diésel por medio de termografía e inspección de humos (opacidad), utilizando los siguientes combustibles:

- Diésel
- Mezcla de biodiesel en porcentaje B5, B10 y B20
- Biodiesel B100

CARACTERISTICAS DEL AUTOBÚS RUTA VERDE

- Marca: International
- Motor: Navistar
- Línea: Chasis coraza
- Modelo: 2012
- Cilindraje: 6
- HP: 175 HP



Figura 3.3 Autobús ruta verde usado para pruebas.

Encontrar y analizar diferencias en el comportamiento del motor diésel por medio de termografía e inspección de humos (opacidad), utilizando los siguientes combustibles:

- Diésel
- Mezcla de biodiesel en porcentaje B10

COMBUSTIBLES

- Diésel

El combustible utilizado para las pruebas con diésel y para las mezclas con biodiesel fue comprado en una gasolinera PEMEX, la cual se comercializa en todo el país apegado a un mismo estándar de calidad.



Figura 3.4 Galón con diésel usado para las pruebas.

- Biodiesel: El biodiesel utilizado para realizar las pruebas fue proporcionado por el Dr. Saúl López, docente de la facultad de química encargado del proyecto de producción de biodiesel, cumpliendo con las normas de calidad Europea y ASTM.

A continuación se muestra los pasos realizados para la obtención del biodiesel usado para las pruebas en el minibús ecológico:

1.- La materia prima usada para la obtención de biodiesel fue aceite vegetal comestible virgen de 20 litros mostrado en la *figura 3.5*. Se recomendó usarlo para este tipo de pruebas por que se obtiene una mejor calidad al contener cero ácidos en comparación con un aceite que ya fue reciclado. Este aceite se entregó a la FQ para realizar el proceso de producción de biodiesel.



Figura 3.5 Aceite vegetal virgen usado para obtener biodiesel.

2.- Una vez entregado el aceite en la FQ, se realiza el proceso de transesterificación, el cual consiste en combinar el aceite vegetal con un alcohol ligero, normalmente metanol. Como resultado de la transesterificación se obtiene biodiesel con glicerina mostrado en la *Figura 3.6*.



Figura 3.6 Biodiesel más glicerina.

Después se realiza el proceso de separación y purificación del biodiesel, así como el análisis para la caracterización del biodiesel con los siguientes parámetros establecidos: humedad, niveles de jabones (sosa), aceite residual, y sólidos suspendidos. Y para finalizar se hace una limpieza del biodiesel con agua 3 veces y se almacena.

3.- El biodiesel fue entregado en bidones bien sellados y etiquetados como lo muestra la *figura 3.7*. La cantidad que se obtuvo fue casi la misma que se entregó de materia prima, existiendo mermas durante el proceso.



Figura 3.7 Biodiesel listo para su utilización.

4.- Ya teniendo el biodiesel en el taller de electromecánica, el siguiente paso fue hacer las diferentes mezclas que se usaron en las pruebas. La cantidad total de combustible por mezcla fue de 5 litros. Después usamos una probeta proporcionada por el laboratorio de ingeniería, con una graduación de 250 ml. *figura 3.8*, que nos sirvió para medir el volumen de biodiesel que necesitábamos agregar a la mezcla. Y para medir la cantidad de diésel que es mayor a la del biodiesel se usó un vaso precipitado mostrado en la *figura 3.9*.



Figura 3.8 Probeta utilizada para medir volumen de biodiesel.



Figura 3.9 Vaso precipitado usado para medir volumen de diésel.

5.- Después de hacer las mezclas de biodiesel, estas fueron almacenadas en diferentes bidones, colocando la descripción de la mezcla para evitar alguna confusión en las pruebas que más adelante describiremos.



Figura 3.10 Mezclas de biodiesel.

3.1 Instrumentación usada

- CÁMARA TERMOGRÁFICA (FLIR GF320)

FLIR GF320 es una cámara de infrarrojos para obtener imágenes térmicas y de gas óptica (OGI). La cámara portátil mejora notablemente la seguridad del operador, mediante la detección de las emisiones a una distancia segura, y ayuda a proteger el medio ambiente mediante el trazado de las fugas de gases nocivos para el medio ambiente.



Figura 3.1.1 Cámara termográfica FLIR GF320.

- Sonda de gases (BOSCH)



Figura 3.1.2 Sonda de gases.

Prueba de emisiones de gases de escape con tecnología de medición modular, de acuerdo con los últimos estándares de legislación y la más alta precisión de medición.

Accesorios de la sonda de gases utilizados en las pruebas.

- Opacímetro: Destinado a medir el coeficiente de absorción de luz, en este caso del humo de los vehículos a diésel, de cámara cerrada y de flujo parcial.



Figura 3.1.3 Opacímetro.

- Sonda: tubo abierto que se coloca dentro del escape situado en una sección donde la distribución del humo es uniforme, sujetándose a la pared del tubo mediante una pinza.



Figura 3.1.4 Pinza con sonda.

- TACÓMETRO DIGITAL (MONARCH)



Figura 3.1.5 Tacómetro digital.

Tacómetro de mano que mide de forma óptica y sin contacto las revoluciones por minuto, se enfoca un rayo de luz al objeto a medir que rebota en una banda reflectante pegada en el objeto a medir, indicando así la frecuencia de rotación. El resultado aparece en la pantalla LCD.

- ESTROBOSCOPIO DIGITAL (EXTECH INSTRUMENTS)



Figura 3.1.6 Estroboscopio.

Estroboscopio que verifica y analiza el movimiento y la velocidad simplemente dirigiendo y sincronizando la frecuencia de destello (fpm.) con un objeto giratorio, desplegando el valor de rpm en la pantalla LED de 4 dígitos con una alta precisión sobre una escala dinámica y amplia mediante un circuito LSI de microcomputadora exclusivo y una base de tiempo controlada por cristal.

3.2 Procedimiento experimental del minibús ecológico.

Las pruebas experimentales para el minibús ecológico se realizaron de una misma manera y condiciones similares (temperatura, tiempo y funcionamiento) para cada tipo de combustible suministrado.

Antes de realizar las pruebas con el minibús ecológico hay que cerciorarse de no tener ningún problema con el encendido del motor, esto debido a la fuente de alimentación, es decir que el acumulador no se encuentre completamente cargado debido al fallo del alternador con el que cuenta el minibús que impide su recarga, en estas pruebas se tuvo que cargar varias veces con ayuda de un cargador de baterías (marca Schumacher) por un tiempo aproximado de una hora con carga lenta de 20 amp.



Figura 3.2.1 Acumulador usado para el encendido.

Una vez que se coloca el acumulador cargado en el modelo experimental y se encuentra conectado a éste, el siguiente paso es colocar el bidón de combustible que se vaya a usar de manera suspendida a una altura mayor a la del

motor para que con ayuda de la gravedad, el combustible fluya a través de dos mangueras, una de entrada y otra de salida de combustible, mostrado en la *figura 3.2.2*.



Figura 3.2.2 Bidón de combustible suspendido y conectado a las mangueras.

Después de realizar estos pasos iniciales se podrá dar marcha al motor sin ningún problema, aunque si llegara a pasar eso y tuviéramos problemas al arrancar como fue en algunas ocasiones al hacer las pruebas, se puede utilizar un arrancador en aerosol que se debe echar en la entrada de admisión de aire del motor para facilitar el encendido.



Figura 3.2.3 Arrancador de motores en aerosol.

Ya sin problemas con el encendido de motor, se recomienda que antes de encender el motor para realizar las pruebas tengamos lista la cámara termográfica infrarroja, es decir que la pila esté completamente cargada para evitar un apagado inesperado por falta de energía, también debemos tener una memoria SD libre y con gran capacidad de almacenamiento para grabar todas las pruebas sin contratiempos. Cabe mencionar que en estas pruebas se usó una memoria SD de 32 GB.

Haciendo caso de las recomendaciones anteriores, lo siguiente fue el encendido de la cámara y en donde hay que esperar por varios minutos a que inicie su funcionamiento.

Ya teniendo todo listo se procedió a realizar los siguientes análisis:

ANÁLISIS TERMOGRÁFICO DEL MOTOR (MINIBÚS ECOLÓGICO)

Para este análisis el primer paso es encontrar los mejores ángulos visuales del motor, donde es posible identificar los cambios de temperatura en las partes más sensibles y que son usadas para todas las pruebas. Para encontrar estos puntos críticos de temperatura lo primero que se hizo fue usar la cámara termográfica para visualizar todo el motor, y mediante el display de la cámara observar las áreas más calientes, identificándolas por medio del color rojo de la imagen, la cual tiene relación con el rango más alto de temperatura y es donde podremos monitorear, véase *figura 3.2.4*.

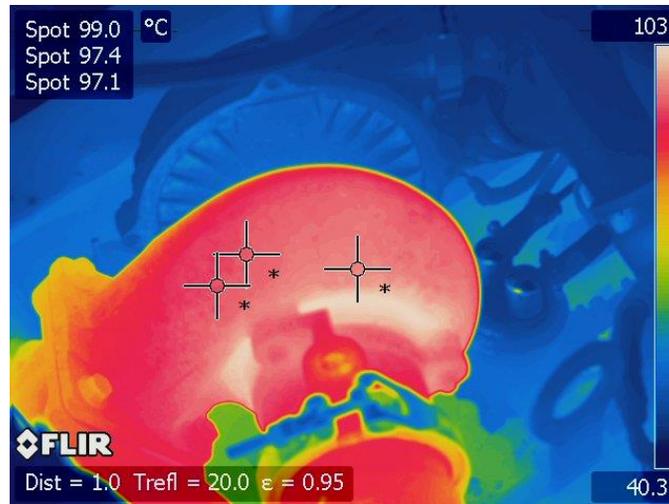


Figura 3.2.4 Imagen termográfica visualizada en el display de la cámara.

Después de visualizar con termografía IR todo el motor identificando las partes más sensibles a cambios de temperatura, se seleccionaron tres puntos críticos los cuales se observan en la figura 3.2.5, y que se mencionan a continuación:

1. Múltiple de escape lado derecho
2. Turbo compresor
3. Múltiple de escape lado izquierdo



Figura 3.2.5 Puntos sensibles a cambios de temperatura.

Para cada una de los puntos sensibles se buscó el mejor ángulo posible para grabar con la cámara termográfica IR y obtener los valores más certeros posibles. Véase *figuras 3.2.6 a 3.2.8*.



Figura 3.2.6 Primera posición de la cámara termográfica.



Figura 3.2.7 Segunda posición de la cámara termográfica.



Figura 3.2.8 Tercera posición de la cámara termográfica.

Después de colocar la cámara en las posiciones correctas, se puso en marcha el motor, dejándolo en ralentí (750 rpm aprox.) por varios minutos para que la cámara registrara las variaciones de temperatura hasta obtener un valor estable que sirvió para realizar las comparativas con las diferentes mezclas.

Al obtener un valor de temperatura estable en ralentí, el siguiente paso fue realizar una aceleración constante a 2500 rpm durante 2 minutos, después de ese tiempo se dejó de acelerar y volvió a ralentí. Los datos que se obtienen son de una máxima temperatura del motor trabajando a una aceleración constante. Y también obtendremos datos de la variación de la temperatura cuando vuelve a ralentí.

En todas estas mediciones se tuvo que utilizar un tacómetro digital y un estroboscopio *figura 3.2.9*, para obtener mediciones de rpm usando como referencia la polea del cigüeñal, y comparar los datos para estar seguros de que el valor es correcto. Esto se debe a que el minibús no cuenta con un tacómetro digital en el tablero y que como ya vimos es necesario saber las revoluciones del motor en las pruebas experimentales.



Figura 3.2.9 Medición de revoluciones por minuto.

Para finalizar el análisis termográfico del minibús ecológico con el combustible seleccionado, lo único que habrá que hacer es detener la grabación de la cámara termográfica IR y guardar el video que es almacenado en la memoria SD.

ANÁLISIS DE OPACIDAD DE HUMOS

Para el análisis de humos se tiene que colocar el opacímetro de humos y la sonda detrás del minibús, donde la pinza de la sonda pueda colocarse dentro del escape y registrar los datos de opacidad, véase *figura 3.2.10*.



Figura 3.2.10 Opacímetro y pinza con sonda.

Después se colocó el analizador de emisiones Bosch frente al modelo experimental de manera que fuera posible manipular el analizador y tomar medidas de revoluciones por minuto.



Figura 3.2.11 Colocación del analizador de emisiones Bosch.

Para realizar las pruebas de opacidad se tuvo que usar un cordón amarrado al pedal del acelerador para realizar aceleraciones constantes desde la parte frontal del minibús y poder medir las revoluciones del motor. Al mismo tiempo se monitorea el valor del coeficiente de absorción de luz en m^{-1} y en porcentaje. Se guardan las mediciones y al finalizar las pruebas se imprimen los resultados.

La medición de opacidad empieza poniendo en marcha el autobús en ralentí (750 rpm aprox.), esto visualizado en el tacómetro digital y en el estroboscopio, ya que no se cuenta con un medidor de rpm para diésel integrado al analizador Bosch.

Después se seleccionan los siguientes comandos en el analizador Bosch.

- 1.- Menú principal.



Figura 3.2.12 Menú principal.

2.- Se selecciona >Diagnóstico (MID).



Figura 3.2.13. Opción diagnóstico (MID).

3.- En >Diagnóstico (MID), se selecciona >Diésel.



Figura 3.2.14 Opción Diésel.

4.- En >Diagnosis >Diésel, se selecciona >Medición continua.

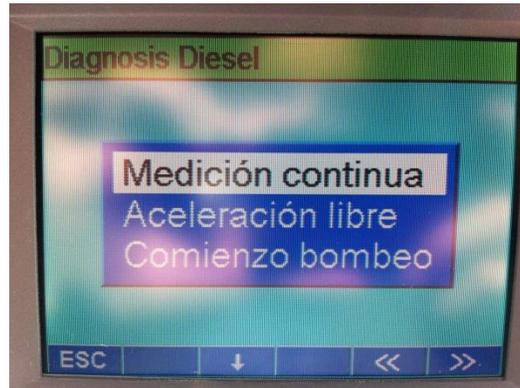


Figura 3.2.15 Opción Medición continua.

5.- Después de la anterior opción se selecciona >Ajustes no. Impulsos que es de 4 por default.

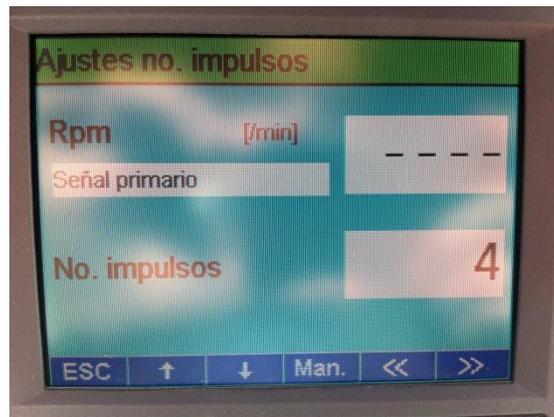


Figura 3.2.16 Ajuste no. impulsos.

6.- Enseguida se realiza automáticamente el ajuste cero donde la sonda tendrá que encontrarse fuera del escape.



Figura 3.2.17 Ajuste cero.

7.- Después de que finaliza el ajuste cero, la sonda estará lista para obtener una medición continua de la opacidad de humos emitida por el escape, por lo que debemos colocar enseguida la sonda dentro, véase figura 3.2.18.



Figura 3.2.18 Colocación de la sonda dentro del escape.

NOTA: La medición está limitada a 5 minutos, después de ese tiempo la sonda vuelve a realizar el ajuste cero y hay que volver a empezar.



Figura 3.2.19 Medición continua.

Las mediciones que se obtuvieron fueron hechas a diferentes rpm empezando de 750 hasta 2500, sin llegar al corte del gobernador por medidas de seguridad del motor, aunque la norma específica que la medición correcta es cuando el motor está en su máxima revolución.

La opacidad se puede obtener en; m^{-1} o en porcentaje seleccionando el icono %. Y para ir guardando las diferentes mediciones solo se seleccionó la flecha con el rombo (se pueden guardar varias mediciones).



Figura 3.2.20 Funciones de la medición continua.

Una vez terminadas las mediciones y guardadas por el equipo, se seleccionó la opción de imprimir los resultados después de seleccionar el ícono (>>).



The image shows a printed receipt from a Bosch gas analyzer. The receipt contains the following information:

B O S C H
Diagnosis analizador gas

Versión BEA V3 70-EURO-W
Versión RTM v2 0

Fecha: 29 11 2013
Tiempo: 20 04

No.	[°C] [1/min]	Turbidez
k1	0 01	/m
N2	1 4	%
k3	0 00	/m
N4	0 4	%
N5	1 0	%
k6	0 01	/m
N7	1 5	%
k8	0 01	/m
N9	1 1	%
k10	0 01	/m
k11	0 02	/m

Figura 3.2.21 Resultados impresos.

ANÁLISIS DE OPACIDAD DE HUMOS CON CÁMARA TERMOGRÁFICA IR

Este análisis se realizó al mismo tiempo que el análisis anterior. Se colocó la cámara termográfica IR detrás del minibús donde se pudiera visualizar el escape y se obtuvo video del humo emitido por el autobús al realizar las pruebas de opacidad de humos con el analizador Bosch, esto para poder visualizar las partículas de humo emitidas por los diferentes tipos de combustible, los cuales fueron medidos con el opacímetro.



Figura 3.2.22 Análisis de opacidad de humos con termografía IR.

3.2.1 Caso 1.- Diésel

Para el caso 1 se usó como combustible únicamente diésel para los procedimientos antes descritos. Se llenó 5 litros de diésel en un bidón para poderlo colocar en el minibús conectando las mangueras de entrada y salida de combustible hacia el motor (fig. 3.2.1.2).



Figura 3.2.1.1 Recipiente con diésel usado en las pruebas.



Figura 3.2.1.2 Recipiente con diésel colocado en el minibús.

3.2.2 Caso 2.- Mezcla de biodiesel B5

La proporción de la mezcla de biodiesel B5 para 5 litros se puede observar en la *tabla 3.2.2.1*.

Tabla 3.2.2.1 Porcentajes de mezcla de biodiesel B5 utilizado para 5 litros.

BIODIÉSEL B5		
DIÉSEL 95%	BIODIÉSEL 5%	TOTAL
4.75 Litros	0.25 Litros	5 Litros

Como ya se mencionó en el procedimiento experimental, se usó una probeta y un vaso precipitado para hacer la mezclas de biodiesel B5. Se mezcló directamente en el recipiente destinado a las pruebas de funcionamiento y se etiquetó para evitar confusiones a la hora de realizar las pruebas.

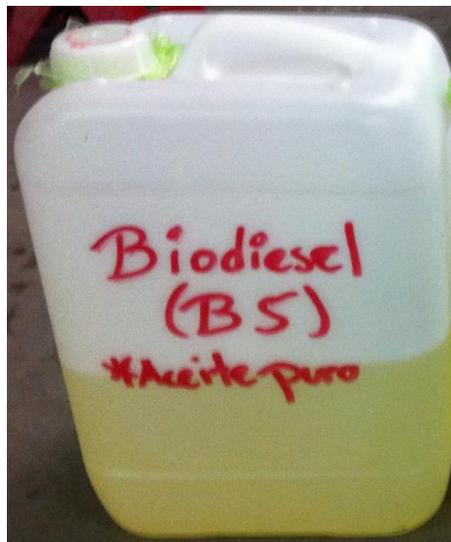


Figura 3.2.2.1 Recipiente con biodiesel B5.

3.2.3 Caso 3.- Mezcla de biodiesel B10

La proporción de la mezcla de biodiesel B10 para 5 litros se puede observar en la *tabla 3.2.3.1*.

Tabla 3.2.3.1 Porcentajes de mezcla de biodiesel B10 utilizado para 5 litros.

BIODIÉSEL B10		
DIÉSEL 90%	BIODIÉSEL 10%	TOTAL
4.5 Litros	0.5 Litros	5 Litros

Igual que en el caso 1, se usó una probeta y un vaso precipitado para hacer la mezcla de biodiesel B10. Se mezcló directamente en el recipiente destinado a las pruebas de funcionamiento y se etiquetó para evitar confusiones a la hora de realizar las pruebas.



Figura 3.2.3.1 Recipiente con biodiesel B10.

3.2.4 Caso 4.- Mezcla de biodiesel B20

La proporción de la mezcla de biodiesel B20 para 5 litros se puede observar en la *tabla 3.2.4.1*.

Tabla 3.2.4.1 Porcentajes de mezcla de biodiesel B20 utilizado para 5 litros.

BIODIÉSEL B20		
DIÉSEL 80%	BIODIÉSEL 20%	TOTAL
4 Litros	1 Litro	5 Litros

Al igual que las mezclas anteriores, se usó una probeta y un vaso precipitado para hacer la mezcla de biodiesel B20. Se mezcló directamente en el recipiente destinado a las pruebas de funcionamiento y se etiquetó para evitar confusiones a la hora de realizar las pruebas.

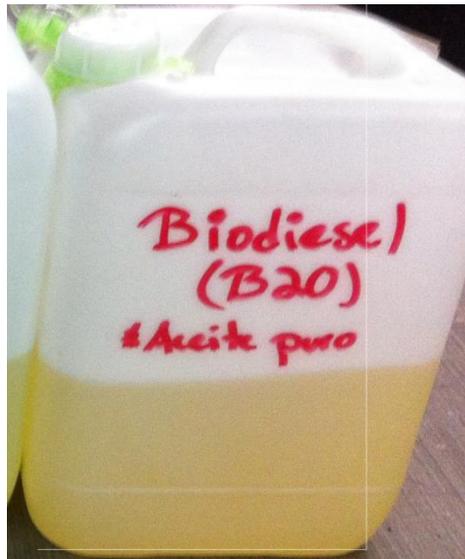


Figura 3.2.4.1 Recipiente con biodiesel B20.

3.2.5 Caso 5.- Biodiesel puro B100

Para el caso 5 se usó como combustible; biodiesel puro sin mezcla alguna.

Se almacenó 5 litros de biodiesel en el recipiente seleccionado y se etiquetó para las pruebas correspondientes.



Figura 3.2.5.1 Recipiente con B100.

3.3 Procedimiento experimental del autobús ruta verde

ANÁLISIS TERMOGRÁFICO DEL MOTOR

El primer paso para realizar el análisis termográfico del motor fue encontrar el mejor ángulo visual del motor, donde fuera posible identificar los cambios de temperatura en las partes más sensibles del motor y poder realizar una comparativa entre un combustible y otro.



Figura 3.3.1 Posición de la cámara termográfica IR para el análisis.

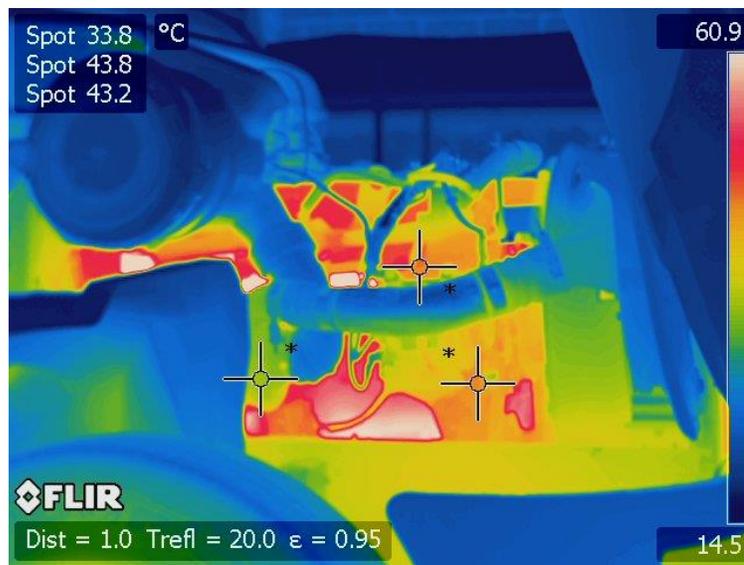


Figura 3.3.2 Visualización de partes sensibles del motor.

Determinamos valores de temperatura estables cuando el motor se encuentra trabajando en ralentí y su temperatura no cambia. La prueba fue poner en marcha el motor en ralentí (750 rpm aprox.) por unos minutos observando y registrando un incremento en la temperatura hasta obtener un valor estable, de esta prueba se obtuvo como referencia un valor de temperatura en ralentí.

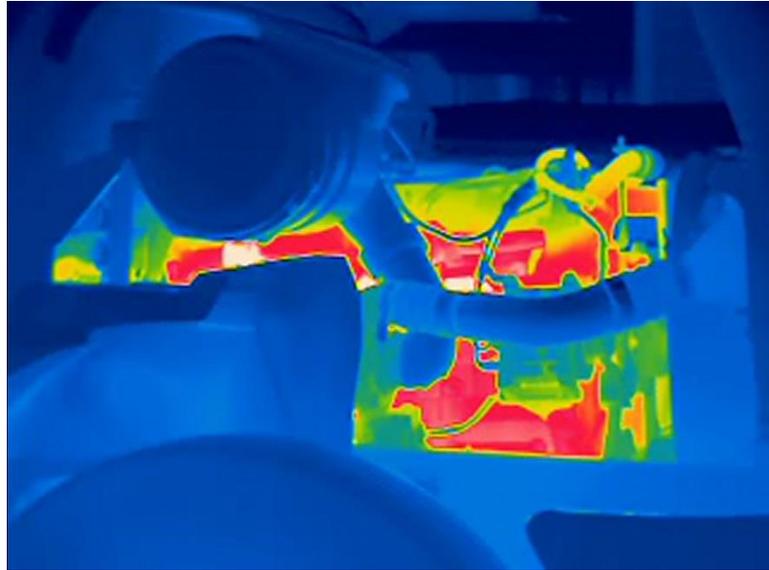


Figura 3.3.3 Imagen termográfica del motor en ralentí.

Después obtenemos valores de tiempo y temperatura al aplicar una aceleración constante, en esta prueba se aplicó una aceleración al motor de 2500 rpm por un tiempo de dos minutos y medio. Los datos recabados fueron una nueva y máxima temperatura del motor trabajando a una aceleración constante.

La siguiente figura muestra las imágenes termográficas IR del motor a 2500 rpm usando diésel y biodiésel B10.

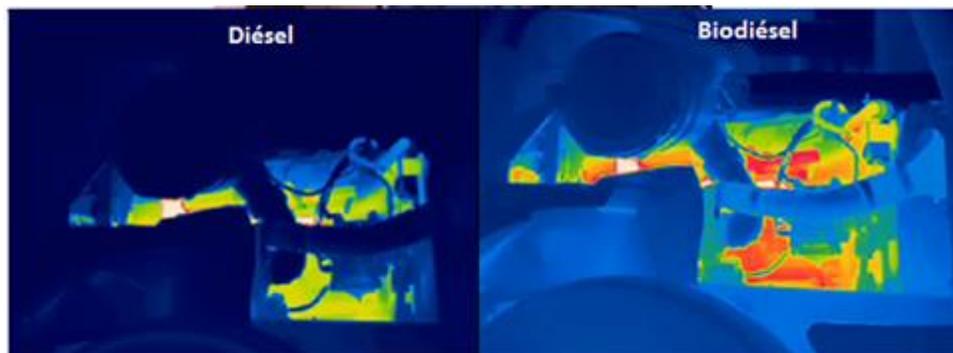


Figura 3.3.4 Termografía del motor con aceleración constante.

Las pruebas experimentales realizadas se hicieron de una misma manera y condiciones similares (temperatura, tiempo y funcionamiento) para cada tipo de combustible suministrado. De las pruebas realizadas tuvimos como resultado diferentes temperaturas de funcionamiento que sirvieron para obtener gráficas comparativas de tiempo vs temperatura entre diésel y biodiesel B10.

ANÁLISIS DE OPACIDAD DE HUMOS

Para las pruebas de opacidad de humos se colocó el analizador de emisiones Bosch detrás del autobús donde el opacímetro pudiera alcanzar el escape para poder colocar la sonda dentro y registrar los datos de opacidad, es decir, medir el coeficiente de absorción de luz (m^{-1}) y el porcentaje de opacidad del humo en el escape del autobús, registrando el valor máximo en cada aceleración. También se colocó la cámara termográfica detrás del autobús para poder observar el humo emitido por el autobús a la hora de realizar las pruebas.



Figura 3.3.5 Colocación del opacímetro y la sonda.

Las pruebas y los análisis fueron los mismos para los dos tipos de combustible; diésel y biodiésel usados por el autobús ruta verde, y en cada combustible usado se realizaron dos análisis simultáneos.

- Análisis de opacidad de humos con el analizador Bosch

Este análisis se realizó apegado a la norma oficial mexicana *nom-045-semarnat-2006, protección ambiental.- vehículos en circulación que usan diésel como combustible.- límites máximos permisibles de opacidad, procedimiento de prueba y características técnicas del equipo de medición.*

Las mediciones de opacidad obtenidas se hicieron a diferentes rpm empezando con 750 rpm en ralentí y a una máxima de 2500 rpm esto significa que no se llegó al corte del gobernador como lo especifica la norma oficial mexicana por medidas de seguridad del motor.

Como no se contaba con un medidor de rpm para diésel integrado al analizador Bosch, se obtuvieron las rpm con ayuda del tacómetro analógico del autobús.

Se configuró el analizador Bosch para realizar una diagnosis para un vehículo diésel por medio de una medición continua del humo emitido a diferentes rpm, se registró cada dato obtenido como resultado y se imprimió al finalizar la prueba.

Con este análisis se obtuvieron gráficas con los datos obtenidos de la sonda de gases, donde tuvimos como referencia emisiones medidas en m^{-1} y rpm.

- Análisis de opacidad de humos con cámara termográfica IR

Este análisis se realizó al mismo tiempo que el análisis anterior, donde se obtuvo video con la cámara termográfica (IR) del humo emitido por el autobús al realizar las pruebas a diferentes rpm, esto para poder observar de manera visual las partículas de humo emitidas por los diferentes tipos de combustible, y se obtuvieron imágenes (IR) para diésel y biodiésel.

3.3.1 Caso 1.- Diésel

Para el caso 1 se hicieron las pruebas cuando el autobús ruta verde estuvo usando únicamente diésel y fue suministrado por una gasolinera de PEMEX.

3.3.2 Caso 2.- Mezcla de biodiésel B10

Para el caso 2 se hicieron las pruebas con biodiésel B10, el cual fue suministrado por la facultad de química y que como materia prima del biodiésel se usaron aceites de cocina reciclados.

RESULTADOS

4.1 Resultado de análisis con minibús ecológico

- ANÁLISIS TERMOGRÁFICO DEL MOTOR

Los resultados obtenidos se realizaron con ayuda del software FLIR VR. Las tablas que a continuación se presentan, son los resultados de realizar pruebas termográficas IR al motor, obteniendo la temperatura de las partes más sensibles a cambios de temperatura.

En la figura 4.1.1 se muestra la imagen infrarroja de los puntos sensibles a cambios de temperatura donde se realizó el análisis.

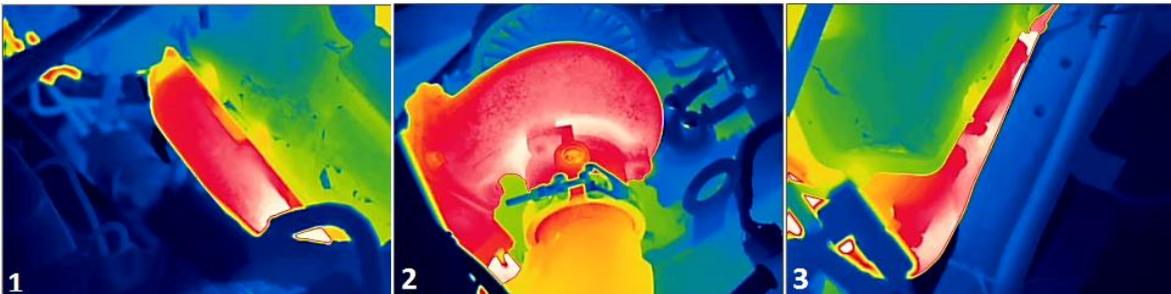


Figura 4.1.1 Análisis termográfico del motor.

La *tabla 4.1.1* muestra la temperatura del motor en ralentí usando como combustible diésel y biodiesel B5, B10, B20 y B100 en los puntos seleccionados.

Tabla 4.1.1 Temperatura obtenida en ralentí para diésel y biodiesel en los puntos sensibles del motor.

PUNTOS CRÍTICOS	DIÉSEL	B5 (°C)	B10 (°C)	B20 (°C)	B100 (°C)
1	82.90	84.70	86.60	88.30	88.70
2	99.10	102.30	92.20	100.20	94.70
3	100.40	96.80	78.80	90.20	84.30

Con los datos obtenidos de la tabla anterior se sacó el promedio de temperaturas en los puntos de medición seleccionados con cada uno de los combustibles utilizados, dando como resultado la siguiente gráfica:

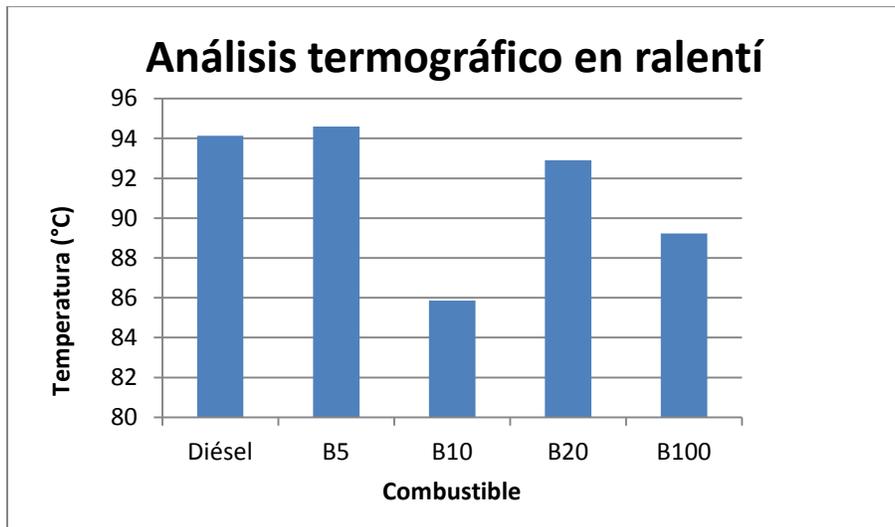


Figura 4.1.2 Gráfica de temperaturas del motor en ralentí con diésel y biodiesel.

La *tabla 4.1.2* muestra la temperatura del motor a 2500 rpm usando diésel y biodiesel en mezclas B5, B10, B20 y B100 como combustible.

Tabla 4.1.2 *Máxima temperatura obtenida a 2500 rpm para diésel y biodiesel.*

PUNTOS CRÍTICOS	DIESEL	B5 (°C)	B10 (°C)	B20 (°C)	B100 (°C)
1	121.00	119.90	120.90	120.70	120.90
2	121.40	122.70	121.20	121.30	121.40
3	103.80	122.00	119.80	120.80	121.70

Con los datos de la tabla se sacó el promedio de temperaturas en los puntos de medición seleccionados con cada uno de los combustibles utilizados a 2500 rpm, dando como resultado la siguiente gráfica:

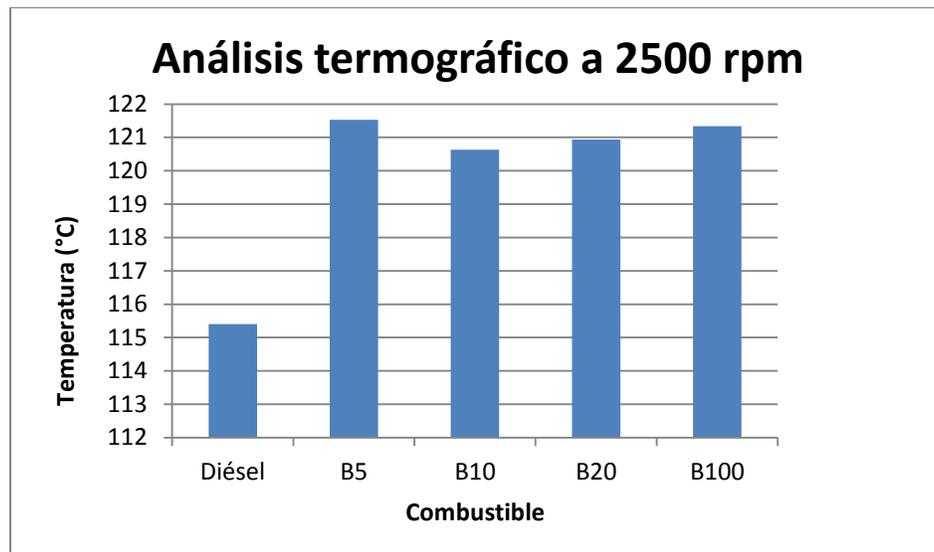


Figura 4.1.3 *Gráfica de temperaturas del motor a 2500 rpm con diésel y biodiesel.*

De las pruebas realizadas tuvimos como resultado diferentes temperaturas de funcionamiento y se logró obtener la siguiente gráfica comparativa de tiempo vs temperatura entre diésel y biodiesel B5, B10, B20 y B100, aplicando una aceleración constante de 2500 rpm.

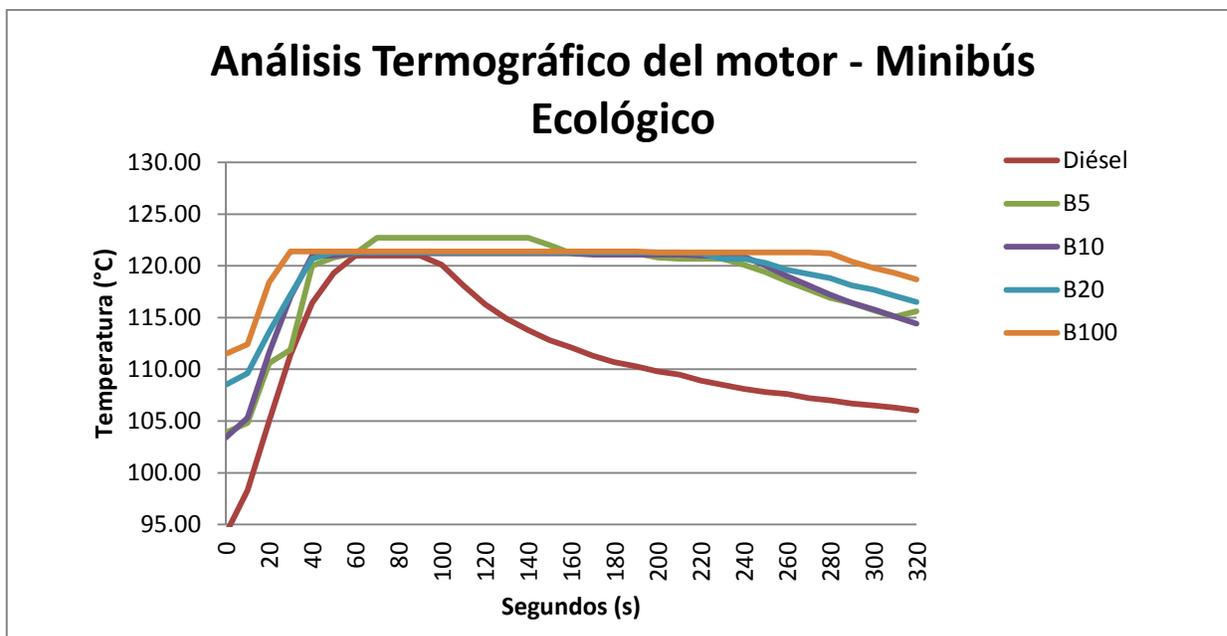


Figura 4.1.4 Gráfica de temperaturas del motor usando diésel y biodiesel.

- ANÁLISIS DE OPACIDAD DE HUMOS

Las tablas que a continuación se presentan son resultados obtenidos del sistema de análisis de emisiones modular Bosch usado para tomar medidas de opacidad de humos. La *tabla 4.1.3* y *4.1.4* muestran el valor de opacidad de humos emitido por el sistema de escape cuando el motor se encontraba en ralentí y a máximas revoluciones, usando como combustibles diésel y biodiesel B5, B10, B20 y B100.

Tabla 4.1.3 Valor de opacidad de humos en ralentí emitido por el motor para diésel y biodiésel.

COMBUSTIBLE	OPACIDAD DE HUMOS EN RALENTÍ 750 RPM'S. (m⁻¹)
Diésel	0.05
Biodiésel B5	0.02
Biodiésel B10	0.03
Biodiésel B20	0.02
Biodiésel B100	0.04

Tabla 4.1.4 Valor de opacidad de humos a 2500 rpm emitido por el motor para diésel y biodiésel.

COMBUSTIBLE	MÁXIMA OPACIDAD DE HUMOS A MÁXIMAS RPM. (m⁻¹)
Diésel	0.07
Biodiésel B5	0.05
Biodiésel B10	0.03
Biodiésel B20	0.04
Biodiésel B100	0.08

De los resultados anteriores se pudo obtener la siguiente gráfica con los datos obtenidos de la sonda de gases, donde se toma como referencia emisiones medidas en m⁻¹ en porcentaje y a máximas rpm sin llegar al corte del gobernador.

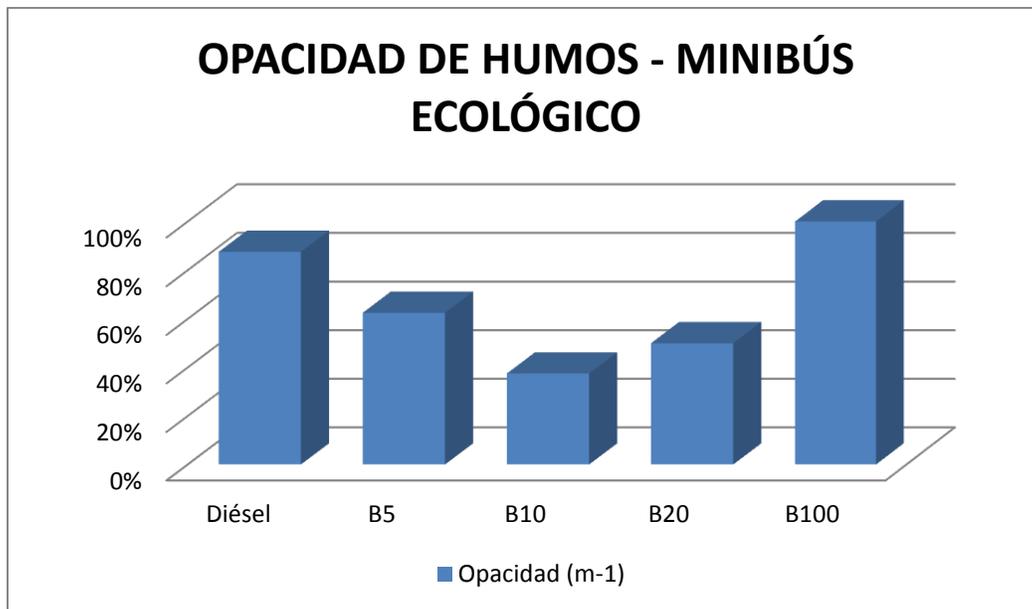


Figura 4.1.5 *Gráfica de porcentajes de opacidad de humos con diésel y biodiesel.*

- ANÁLISIS DE OPACIDAD DE HUMOS CON CÁMARA TERMOGRÁFICA

Este análisis se realizó al mismo tiempo que el análisis anterior, donde se obtuvo video con la cámara termográfica del humo emitido por el minibús al realizar las pruebas a diferentes rpm, esto para poder observar de manera visual las partículas de humo emitidas por los diferentes tipos de combustible.

La *figura 4.1.6* muestra una comparativa visual de las partículas de humo emitidas por el escape usando diésel y biodiesel B5, B10, B20, B100. En la imagen se visualiza la parte del escape donde se observan las partículas emitidas por el escape y que se puede apreciar con manchas en rojo, azul y negro.

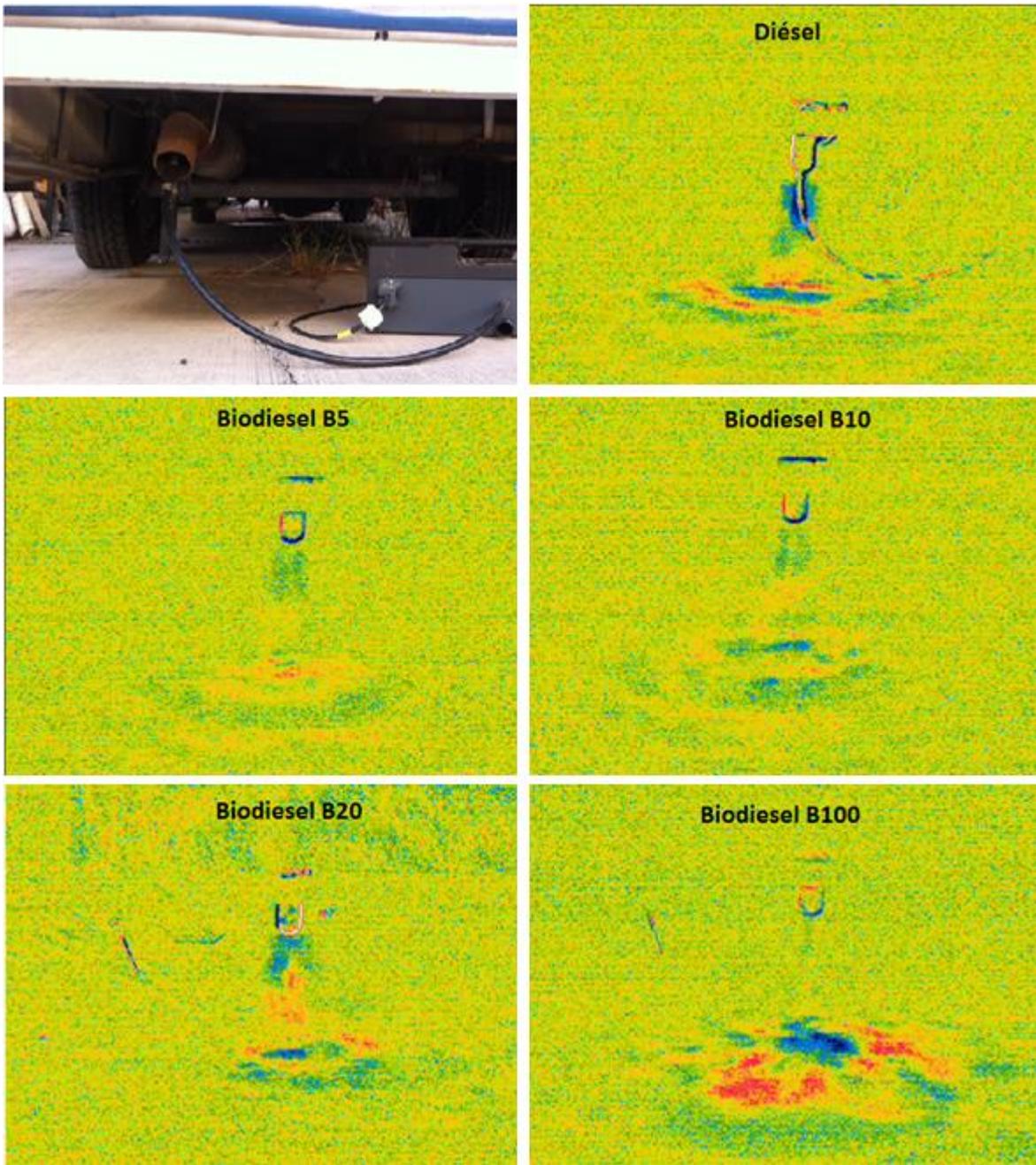


Figura 4.1.6. Comparativa visual de las partículas de humo emitidas con diésel y biodiésel.

4.2 Resultado de análisis con autobús ruta verde

- ANÁLISIS TERMOGRÁFICO DEL MOTOR

Las tablas que a continuación se presentan, son los resultados de realizar pruebas termográficas al motor, obteniendo la temperatura de las partes más sensibles a cambios de temperatura.

La *tabla 4.2.1* muestra la temperatura del motor en ralentí usando como combustible diésel y biodiesel.

Tabla 4.2.1 Temperatura obtenida en ralentí para diésel y biodiesel.

COMBUSTIBLE	TEMPERATURA DEL MOTOR EN RALENTÍ (°C)
Diésel	105.6
Biodiesel B10	108.3

La *tabla 4.2.2* muestra la temperatura del motor a 2500 rpm usando diésel y biodiesel como combustible.

Tabla 4.2.2 Máxima temperatura obtenida a 2500 rpm para diésel y biodiesel.

COMBUSTIBLE	MÁXIMA TEMPERATURA A 2500 RPM. (°C)
Diésel	110.3
Biodiesel B10	114.5

El análisis termográfico se pudo observar de la siguiente manera; *Figura 4.2.1* recuadro izquierdo muestra la imagen a color del motor, la parte de en medio se muestra la misma toma pero visualizada con infrarrojo usando diésel, y en la parte derecha de la imagen se muestra la termografía con infrarrojo usando biodiesel.

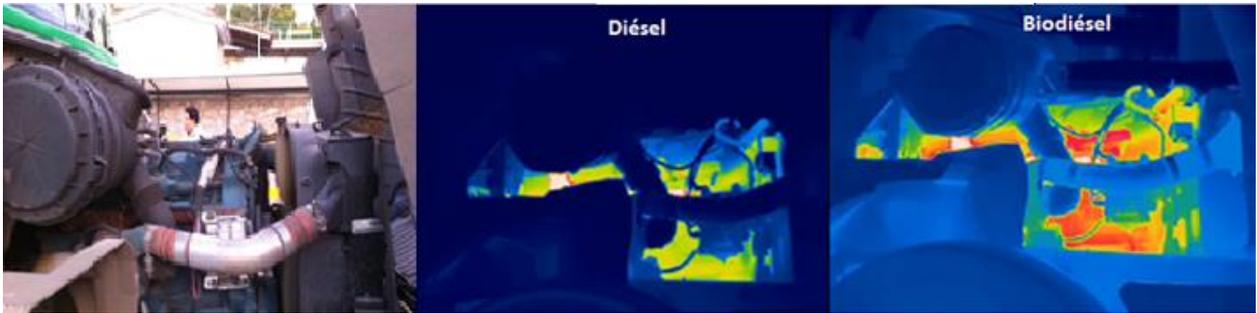


Figura 4.2.1 Análisis termográfico del motor con aceleración constante.

De las pruebas realizadas tuvimos como resultado diferentes temperaturas de funcionamiento como se pudo observar en la *figura 4.2.1*, y se logró obtener la siguiente gráfica comparativa de tiempo vs temperatura entre diésel y biodiesel B10 aplicando una aceleración constante de 2500 rpm.

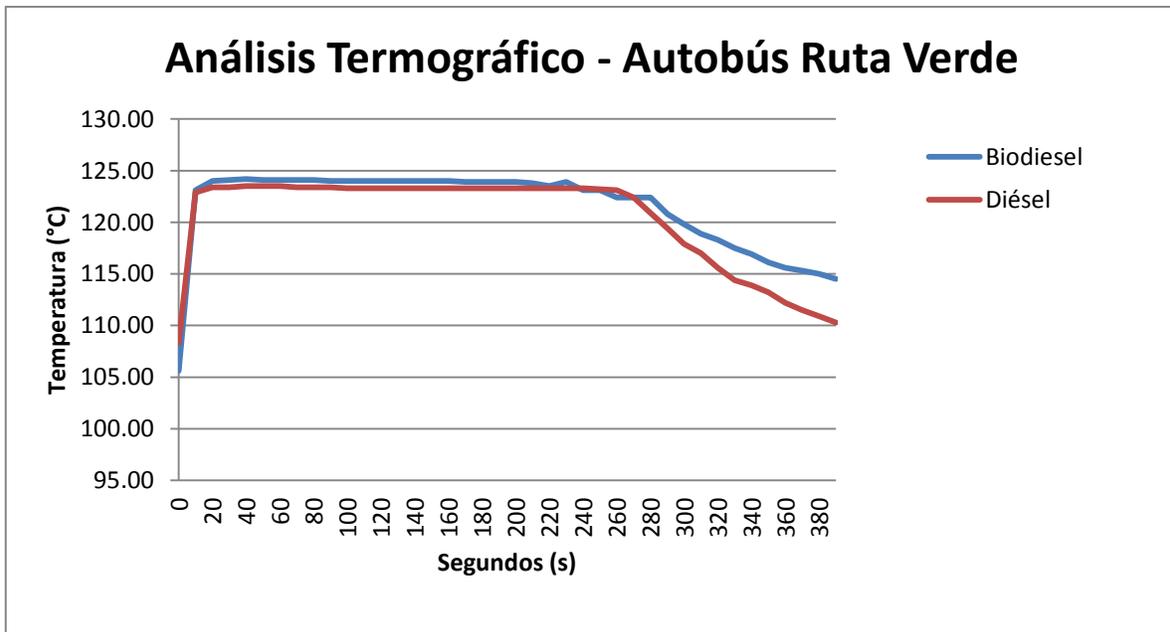


Figura 4.2.2 Análisis termográfico del motor con aceleración constante.

- ANÁLISIS DE OPACIDAD DE HUMOS

Las tablas que a continuación se presentan son resultados obtenidos del sistema de análisis de emisiones modular Bosch usado para obtener medidas de

opacidad de humos. La *tabla 4.2.3 y 4.2.4* muestran el valor de opacidad de humos emitido por el sistema de escape cuando el motor se encontraba en ralentí y a 2500 rpm usando como combustibles diésel y biodiesel.

Tabla 4.2.3 Valor de opacidad de humos en ralentí emitido por el motor para diésel y biodiesel.

COMBUSTIBLE	OPACIDAD DE HUMOS EN RALENTÍ 750 RPM. (m⁻¹)
Diésel	0.02
Biodiesel B10	0.01

Tabla 4.2.4 Valor de opacidad de humos a 2500 rpm emitido por el motor para diésel y biodiesel.

COMBUSTIBLE	MÁXIMA OPACIDAD DE HUMOS A 2500 RPM. (m⁻¹)
Diésel	0.04
Biodiesel B10	0.02

De los resultados anteriores se pudo obtener la siguiente gráfica con los datos obtenidos de la sonda de gases, donde se toma como referencia emisiones medidas en m⁻¹ en porcentaje y rpm, dando como resultado el doble de opacidad de humos entre diésel y B10.

OPACIDAD DE HUMOS B10 VS DIÉSEL

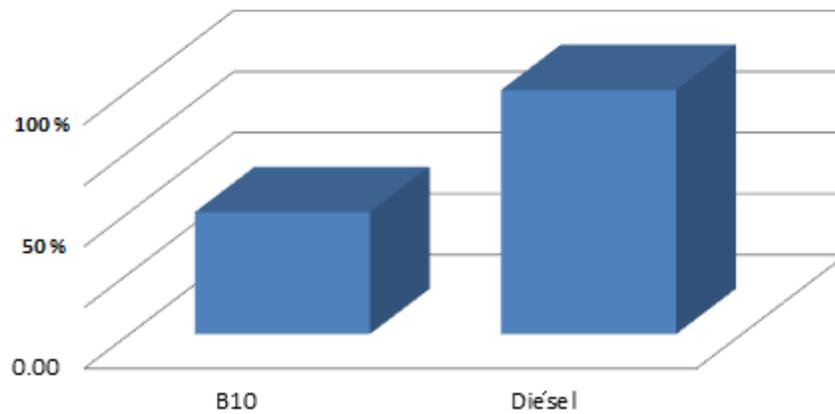


Figura 4.2.3 Gráfica de porcentajes de opacidad de humos con diésel y biodiesel.

- ANÁLISIS DE OPACIDAD DE HUMOS CON CÁMARA TERMOGRÁFICA

Este análisis se realizó al mismo tiempo que el análisis anterior, donde se obtuvo video con la cámara termográfica del humo emitido por el autobús al realizar las pruebas a diferentes rpm, esto para poder observar de manera visual las partículas de humo emitidas por los diferentes tipos de combustible.

La siguiente imagen muestra una comparativa visual de las partículas de humo emitidas por el escape usando diésel y biodiesel. En la imagen se señala con un círculo rojo la parte del escape donde se observan las partículas emitidas por el escape y que se puede apreciar con manchas en rojo, azul y negro.



Figura 4.2.4 Comparativa visual de las partículas de humo emitidas con diésel y biodiesel B10.

CONCLUSIONES

De los resultados presentados en esta tesis podemos concluir que con el autobús ruta verde hubo una diferencia bastante clara en los análisis termográficos IR y de opacidad de humos. Para el análisis termográfico se pudo observar un aumento en la temperatura del motor al usar como combustible biodiesel B5 y que al dejar de acelerar el motor la temperatura disminuye con más lentitud que cuando usa diésel. En el análisis de opacidad de humos se obtuvo un resultado favorable como se esperaba y como lo demostraban algunos trabajos e investigaciones que sirvieron de referencia para este trabajo. El resultado de la opacidad de humos para el autobús ruta verde al usar biodiesel B5 midiendo el coeficiente de absorción de luz es de la mitad de humos a comparación del diésel, demostrando que el uso de biodiesel B5 permite disminuir los humos emitidos por el escape y que son dañinos para la salud y el medio ambiente. Complementado los resultados de la opacidad de humos en el autobús ruta verde también se tomaron imágenes termográficas IR del escape, pudiendo observar el humo emitido el cual fue congruente con los resultados del opacímetro, se observó una disminución de las particular al usar biodiesel B5 viendo una nube más pequeña en la imagen a comparación del diésel.

Cabe señalar que estos resultados comparativos entre diésel y biodiesel usados en el autobús ruta verde fueron consistentes en gran medida por las buenas condiciones mecánicas en las que se encontraba el autobús cuando se realizaron los procedimientos experimentales.

De los resultados obtenidos con el minibús ecológico se puede concluir que no fueron los esperados, se obtuvieron resultados inconsistentes que no nos permite interpretar con certeza las diferencias entre cada uno de los combustibles suministrados al motor, y esto se debe en gran medida a las condiciones del motor, el cual no se encontraba en buenas condiciones mecánicas por falta de mantenimiento, por lo que los datos no son confiables, aunque si nos demuestra que la temperatura también aumenta con el uso de biodiesel y disminuyen los humos emitidos por el escape.

REFERENCIAS

- Consejo para la Defensa de Recursos Naturales (NRDC). 2008. Datos principales sobre el calentamiento global. EUA.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT-INE). 2002. Cambio climático: una visión desde México. México.
- Secretaria de Energía (SENER-BID-GTZ). 2006. Potenciales y viabilidad del uso de bioetanol y biodiesel para el transporte en México. Task B: Agricultural aspects and sources for biodiesel production. México.
- Universidad Tecnológica de Bolívar. Desempeño mecánico y ambiental de los motores de encendido por compresión al utilizar biodiesel como combustible. Perú.
- Miguel Vargas Gonzáles, Dirección de Ahorro de Energía en el Transporte, Comisión Nacional para el Ahorro de Energía. 2007. Biodiesel. México.
- General Motors Colmotores y Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). 2002. Prueba de flota de vehículos usando mezclas de biodiesel B10, B20, B30 y biodiesel puro. Colombia.
- International Energy Agency (IEA). 2004. Biofuels for transport. Paris.
- Norma Oficial Mexicana. Nom-045-semarnat-2006. Protección ambiental. Vehículos en circulación que usan diésel como combustible. México.
- S.Kent Hoekman, Curtis Robbins. 2012. Examen de los efectos de biodiesel en las emisiones de NOx. Tecnología de procesamiento de combustible, Volumen 96, p 237-249. United States.
- Edgar J. kates, William E. Luck. 2003. Motores diésel y de gas de alta compresión (2da Ed.). Chicago, USA.
- Centro Nacional de Metrología (CENAM-EMA). 2004. Guía Técnica de Trazabilidad e Incertidumbre en la Calibración de Opacímetros. México.
- Infrared Cameras for Optical Gas & Through-Flame Imaging. FLIR GF SERIES. User manual.
- Análisis de emisiones Bosch para un medio ambiente limpio – BEA 150/250/350. Manual de usuario.

APÉNDICE

ABREVIATURAS CITADAS EN ESTA TESIS

Amp	Ampere
Aprox	Aproximadamente
ASTM	American Society for Testing and Materials
Atm	Atmosfera
b/d	Barriles diarios
B10	Biodiesel diez porciento
B100	Biodiesel cien porciento
B20	Biodiesel veinte porciento
B30	Biodiesel treinta porciento
B5	Biodiesel cinco porciento
BEA	Análisis de emisiones Bosch
Cinem	Cinemática
cm	centímetro
cm ²	centímetro cuadrado
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CONAE	Comisión nacional para el ahorro de energía
Dr	Doctor
EN	Norma Europea
Etc	Etcétera
FI	Facultad de Ingeniería
Fig	Figura
fpm	Frecuencias de destello
FQ	Facultad de Química
GB	Gigabyte
GLP	Gas licuado del petróleo
GM	General Motors
HP	Horse Power
IEA	Agencia internacional de energía
ln	Logaritmo natural
IR	Infrarrojo
K	Constante de absorción de luz
Kg	kilogramo
KJ	Kilo joule
Km	kilómetro
L	Longitud efectiva del paso de la luz
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Diodo Emisor de Luz
LSI	Large Scale Integration
m ⁻¹	Coefficiente de absorción de luz

Max	Máximo
MID	Diagnosis
ml	Mililitros
N	Una lectura en la escala lineal.
NOM	Norma Oficial Mexicana
NOx	Oxido de Nitrógeno
∅	Flujo emergente
∅0	Flujo incidente.
OGI	Optical Gas Imaging
ONG	Organización no gubernamental
PCI	Poder calorífico inferior
PEMEX	Petróleos Mexicanos
PI	Punto de inflamación
PJ	Peta joule
PMI	Punto muerto inferior
PMS	Punto muerto superior
ppm	Partes por millón
Rpm	Revoluciones por minuto
s	Segundos
SD	Secure digital
Semarnat	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SENA	Servicio Nacional de Aprendizaje
SENER	Secretaría de energía
SO2	Dióxido de azufre
UAQ	Universidad Autónoma de Querétaro
VR	Video Report
%	Por ciento
>	Seleccionar opción de la pantalla
>>	Imprimir
°C	Grados Celsius
°F	Grados Fahrenheit
μ	Micro

DATOS TÉCNICOS DEL ANALIZADOR DE GASES BOSCH

Medidas	Para todos las variantes del BEA (Al x An x L en mm) 1370 x 750 x 700 Unidad de control 260 x 470 x 480
Peso	BEA 350 (c/carro) 67 kg BEA 250 (c/carro) 60 kg BEA 150 (c/carro) 63 kg RTM 430 7 kg
Clase de protección	Unidad de operación IP 30 Modulo de medición de opacidad RTM 430 IP 33
Rango de precisión	+5 °C - +40 °C
Rango de funcionamiento	+5 °C - +45 °C
Temp. de almacenam.	-25 °C - +60 °C
Alimentación	110/230 V 50/60 Hz

ESPECIFICACIONES DE IMAGEN FLIR GF 320



Imaging Specifications	GF300/320
Detector Type	Cooled InSb
Spectral Response	3.2 – 3.4 µm
Resolution	
Total Pixels	
Thermal Sensitivity	
Accuracy	±
Temperature Range	-40°C to 350°C (-40°F to 662°F)
High Temp Option	X
Lens Options	Standard: 24" x 18"; Optional: 14.5", 6"
Zoom	1 – 8x Continuous Digital
Focus	
Color LCD	
Adjustable Viewfinder	
Video Camera w/ Lamp	
Laser Spot	X
Video Out	
Analysis	
Spotmeters	10*
Area Boxes	5 (min./max./avg.)*
Profiles	1 live line (horiz. or vert.)*
Delta T	X*
Annotation	
GPS	X
File Storage	
Radiometric JPG	X
Radiometric Video (15 Hz)	
MPEG Video Recording	X

