



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
LABORATORIO DE CONTROL DE EMISIONES

**PROTOCOLO DE ENSAYOS CON BIODIESEL
EN DINAMÓMETRO DE BANCO SIMULANDO
CONDICIONES REALES DE UN VEHÍCULO**

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

P R E S E N T A N

NEGRÓN VALDEZ JOSÉ MARTÍN
VÁZQUEZ AGUILAR FERNANDO

DIRECTOR DE TESIS

DR. ROGELIO GONZÁLEZ OROPEZA



CIUDAD UNIVERSITARIA

MÉXICO D.F. 2012

AGRADECIMIENTOS

A los proyectos PICS08-31 del Instituto de Ciencia y Tecnología del D.F. y CONACYT-SEMARNAT 23600, por su financiamiento, para el desarrollo de este proyecto.

Este proyecto es el resultado del esfuerzo conjunto de todos los que formamos el grupo de trabajo. Por esto agradecemos a nuestro director de tesis Dr. Rogelio González Oropeza.

A todo el equipo del Laboratorio de Control de Emisiones: Francisco González, José Fernando García Puertos, Pedro Ignacio Rincón, Irais Plascencia, Alfredo Severiano, Miguel Ángel Cerecero, Octavio Ramírez y Víctor Roldan ya que invirtieron su tiempo y conocimientos para ayudarnos con este trabajo de investigación.

Al Dr. Arón Jazcilevich Diamant y cada una de las personas del Centro de Ciencias de la Atmósfera que trabajaron en conjunto con nosotros.

A los ingenieros Adolfo Velasco y Leonardo Bañuelos por haber sido participes en este trabajo.

A mi amiga Karla Denisse Garay que ayudó en gran parte con la redacción de esta tesis.

Y a todas aquellas personas que de una u otra forma, colaboraron o participaron en la realización de esta investigación, hacemos extensivo nuestro más sincero agradecimiento.

DEDICATORIAS

A mis padres: Evelia y Martín, por su amor, comprensión y apoyo incondicional. Estoy infinitamente agradecido por estar presentes en mi vida.

A Guillermo y Alan por su apoyo y enseñanzas sobre la vida.

A mis abuelos Amparo y Víctor, que estén donde estén siguen estando vivos en mi corazón y no menos importante a mi abuela Guadalupe por su apoyo y aliento.

A Maribel Robles por ser una persona especial y gran apoyo a lo largo de la carrera. Gracias por ser mi amiga y cómplice...

Y a todos mis familiares y amigos que he encontrado a lo largo de mi formación, gracias de corazón.

José Martín Negrón Valdez

A mis padres, a quienes amo profundamente, les dedico esta tesis pues es reflejo de su dedicación, ya que desde pequeño han guiado mi camino. ¡Gracias por su apoyo incondicional!

A mi hermana, porque aunque sé que es una persona dedicada, esto le sirva como ejemplo para que logre todo lo que se proponga.

A todos mis amigos de la carrera que durante cinco años se convirtieron en mi familia adoptiva y con quienes compartí buenas y malas experiencias.

A todos mis amigos que no son de la facultad, que sin esperar nada a cambio, compartieron pláticas, conocimientos, consejos y diversión.

Fernando Vázquez Aguilar

INDICE

OBJETIVO	5
INTRODUCCIÓN	5
CAPÍTULO 1 Panorama del uso de los biocombustibles	7
1.1. Antecedentes	8
1.2. Proceso general de producción de biodiesel.....	12
1.3. Panorama general de la producción de biodiesel.....	15
CAPÍTULO 2 Normatividad para vehículos y/o en circulación, que usan diesel o mezclas de biodiesel	20
2.1. Internacionales	21
2.2. Nacionales.....	35
CAPÍTULO 3 Ensayos experimentales en laboratorio	39
3.1. Estructuración de los ensayos	41
3.2. Medición de gases y partículas	49
3.3. Protocolo experimental.....	52
3.4. Sistematización de resultados	60
CAPÍTULO 4 Análisis de resultados	62
CONCLUSIONES	77
REFERENCIAS	79

OBJETIVO

Propuesta de un nuevo protocolo de evaluación de emisiones contaminantes para motores diesel en un dinamómetro de banco.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo aporta un nuevo método para evaluar las emisiones contaminantes de los motores diesel, partiendo de las condiciones de operación en condiciones reales. Generalmente se ha empleado el ciclo 13 modos (descrito en el capítulo 2), el cual consiste en representar 13 maneras del comportamiento de un motor, pero éste no se ha modificado desde el año 2000. De no renovar las pruebas actuales, se considera que dejan de ser una herramienta confiable de estimación de emisiones para la certificación de motores, porque las condiciones de tránsito cambian con el tiempo debido a múltiples factores. Tal es el caso del crecimiento de la población, tecnología de los vehículos, cambios en el transporte público, transformación en la red de carreteras, nuevas legislaciones para mantener el equilibrio ecológico, entre otras.

El nuevo protocolo de prueba que aquí se presenta parte de condiciones reales de operación de un vehículo diesel en una ruta definida dentro de Ciudad Universitaria. Las pruebas se realizaron en mayo de 2011 en el Laboratorio de Control de Emisiones (LCE) en la Facultad de Ingeniería, empleando diesel PEMEX, diesel ultra bajo azufre (UBA) y mezclas con biodiesel en un motor Mercedes Benz.

La investigación en torno al desarrollo del protocolo se ha distribuido en cuatro capítulos, los cuales se detallan de la siguiente manera:

El primer capítulo da un panorama general de los biocombustibles tocando temas como su historia, definición, principales biocombustibles, proceso de elaboración y producción a nivel mundial y nacional.

El segundo menciona las principales normativas para vehículos y motores a diesel, las cuales tienen como objetivo el regular las emisiones contaminantes mediante métodos de prueba.

El tercer capítulo se enfoca en el objetivo principal del trabajo de investigación que es la propuesta de un nuevo protocolo de ensayos experimentales en un dinamómetro de banco, detallando la estructuración de los ensayos y mencionando el equipo utilizado.

En el cuarto y último capítulo se realiza el análisis de resultados obtenidos en los ensayos experimentales, comparando los niveles de emisiones contaminantes por cada combustible para poder distinguir cuál es el de menor contaminación.

CAPÍTULO 1

Panorama del uso de los biocombustibles

1.1. Antecedentes

A lo largo de su existencia, el ser humano ha generado diversos tipos de energía para satisfacer sus necesidades. Tal es el caso de la madera, que comenzó a utilizarse para la cocción de alimentos y permanece en uso hasta la actualidad.

A lo largo de su existencia, el ser humano ha implementado tecnología para la simplificación del trabajo. El momento clave fue cuando comenzó a construir máquinas que le facilitaran el trabajo y redujera el tiempo empleado; para ello, se basó en la utilización de combustibles de origen fósil para su funcionamiento.

Fue entonces que el petróleo se empezó a utilizar para poder fabricar los combustibles que alimentarían a estas máquinas ya que su costo es relativamente barato en la producción y la cantidad de energía que se puede obtener de ellos es grande. El problema fue que estos combustibles fósiles se desarrollaron y utilizaron desmedidamente, dejando como consecuencia deterioro del medio ambiente, daños a la salud y el agotamiento de yacimientos petroleros.

Esta situación ha dado pie a incursionar en el uso de fuentes de energía renovables, que no tengan grave impacto negativo en el medio ambiente y en la salud humana. Ejemplo de ello, son los biocombustibles en estado líquido que en los últimos años han sido objeto de investigación y debate.

Rudolf Diesel fue uno de los pioneros en la utilización de biocombustibles líquidos. Hace más de cien años diseñó un motor de combustión interna que funcionaba a base de aceite de cacahuate. Alrededor de 1908 el estadounidense Henry Ford implementó en su modelo T un combustible derivado de la caña de azúcar.

En el sentido estricto de la definición etimológica, biocombustible es un combustible de origen biológico. En cuanto a su uso general, se entenderá como todo combustible proveniente de sustancias orgánicas renovables de origen animal o vegetal. A estas sustancias orgánicas también se le conocen como biomasa.

Los biocombustibles líquidos que han sido objeto de investigación durante los últimos años son el bioetanol y el biodiesel, principalmente.

➤ **Bioetanol**

El bioetanol es un alcohol. Las materias primas con las que puede obtenerse principalmente son a través de la caña de azúcar, remolacha, maíz, papa y yuca. Otra alternativa son los residuos que provienen de estas materias primas, generados durante el proceso de producción de la materia prima para el consumo humano, como lo es el bagazo de caña de azúcar.

El proceso de producción puede variar dependiendo que tan complejo sea la extracción de la energía almacenada en la biomasa. De forma general, los principales procesos son el pretratamiento, la fermentación, destilación, mezclado y almacenaje.

En ocasiones al bioetanol se le suele llamar etanol ya que los dos son alcoholes, sin embargo el etanol se obtiene a partir de la hidratación del etileno, cuyo precursor es el petróleo.

Las mezclas de gasolina con bioetanol pueden ser de 2 tipos; una donde el porcentaje de bioetanol es bajo y se pueden utilizar en vehículos donde el motor no requiere modificaciones, y una segunda donde el porcentaje de bioetanol en la mezcla es alto. Para poder utilizar esta última hay que realizar modificaciones en el motor del vehículo, a estos se les conoce como los *Vehículos de Combustibles Flexibles* (FFV; Fuel Flexible Vehicles). A pesar de las modificaciones a estos vehículos también tienen la capacidad de funcionar con gasolina o con las mezclas de bajo contenido de bioetanol, ya que se ajustan automáticamente al tipo de combustible que es detectado por medio de sensores electrónicos.

Las principales mezclas de bajo contenido de bioetanol son: ^{[9][10][11][14]}

- a) E5: Mezcla de 5% bioetanol y 95% gasolina.
- b) E10: Mezcla de 10% bioetanol y 90% gasolina
- c) E25: Mezcla de 25% bioetanol y 75% gasolina

Las mezclas que contienen una elevada proporción de bioetanol por lo general son:

- d) E85: Mezcla de 85% de bioetanol y 15% gasolina
- e) E95: Mezcla de 95% de bioetanol y 5% gasolina

El E100 no es una mezcla ya que es bioetanol al 100% y también se utiliza como combustible en autobuses de gasolina modificados.

➤ **Biodiesel**

El biodiesel es un biocombustible líquido que está compuesto de ésteres, es decir, es una clase de compuestos químicos y grupos funcionales.

Es producido a partir de grasa animal o aceites vegetales. Las materias primas más utilizadas para la elaboración del biodiesel son el girasol, la colza, la soja y la jatropha. Se puede decir que la producción de biodiésel tiende a provenir mayoritariamente de los aceites extraídos de plantas.

A continuación enlistaremos más detalladamente las materias primas para la elaboración del biodiesel. ^{[13][14]}

❖ Aceites vegetales convencionales

- Aceite de girasol
- Aceite de colza
- Aceite de soja
- Aceite de jatropha
- Aceite de palma

❖ Aceites vegetales alternativos

- Aceite de brassica
- Aceite de coco
- Aceite de cardo
- Aceite de camelina
- Aceite de crambe

-
- Aceite de poganus

 - ❖ Aceites de semillas modificadas genéticamente
 - Aceite de girasol de alto oleico
 - ❖ Grasas animales

 - ❖ Aceites usados

Los aceites de semillas modificadas genéticamente, son modificados por su elevado contenido de ácidos grasos insaturados. Estas modificaciones se deben a que la operatividad del biodiesel a bajas temperaturas es buena, pero disminuyen su estabilidad a la oxidación que se traduce en un índice de yodo elevado. Si este índice elevado de yodo se encuentra en el aire entrará al cuerpo a través de las vías respiratorias, lo cual puede ser dañino ya que una alta concentración de yodo en el cuerpo puede perjudicar a la glándula de la tiroides, la cual se encarga de fabricar las hormonas necesarias para el crecimiento. ^[19]

Por otra parte, los aceites usados se refieren a todo aceite que fue utilizado y que se convierte en un residuo. Esto implica una reducción de costos, ya que es una materia prima más barata. La principal problemática de los aceites usados radica en la recolección del aceite y en su control, debido a que existen normas de regulación respecto a la producción de biodiesel procedente de los aceites usados.

El biodiesel puede mezclarse con el diesel proveniente del petróleo en distintas cantidades. Estas mezclas también suelen abreviarse dependiendo del porcentaje de biodiesel que contengan las mezclas que habitualmente son: ^{[12][17][18]}

- a) B5: Mezcla de 5% biodiesel y 95% de diesel
- b) B10: Mezcla de 10% biodiesel y 90% de diesel
- c) B15: Mezcla de 15% biodiesel y 85% de diesel
- d) B30: Mezcla de 30% biodiesel y 70% de diesel

El biodiesel se puede utilizar en 100 por ciento y es conocido como B100. Pero para poder utilizar biodiesel puro el motor requiere una serie de modificaciones evitando así, problemas de mantenimiento y rendimiento.

1.2. Proceso general de producción de biodiesel

En la actualidad existen distintos procesos industriales para la producción de biodiesel, dependiendo de la materia prima de la cual se obtiene el biodiesel ya que cada país lo fabrica con distinta tecnología e insumos.

Se puede generalizar el proceso de producción comenzando con la recolección de la materia prima a la cual se le extraerá el aceite o la grasa, si se trata de un vegetal o de animal respectivamente.

Existen dos modos de extracción para un aceite vegetal, por medios mecánicos como la compresión o simple trituración y químicamente con ayuda de solventes. Estas formas de extracción dependerán del vegetal ya que para algunos se necesita utilizar los dos métodos.

Por otro lado, las grasas animales se obtienen de los tejidos animales, mediante la aplicación de calor para poder derretirlos. Cuando se extrae este aceite o grasa se lleva a cabo la transesterificación, esto es convertir el aceite o grasa en un éster, como se ilustra en el diagrama 1.1.

Consiste en hacer reaccionar el aceite o grasa con un alcohol simple que normalmente es metanol o etanol. De esta manera se obtienen moléculas en forma de cadena larga que son muy similares a las moléculas de los hidrocarburos. Para acelerar la reacción de transesterificación se utilizan catalizadores que pueden ser ácidos, básicos o enzimáticos.

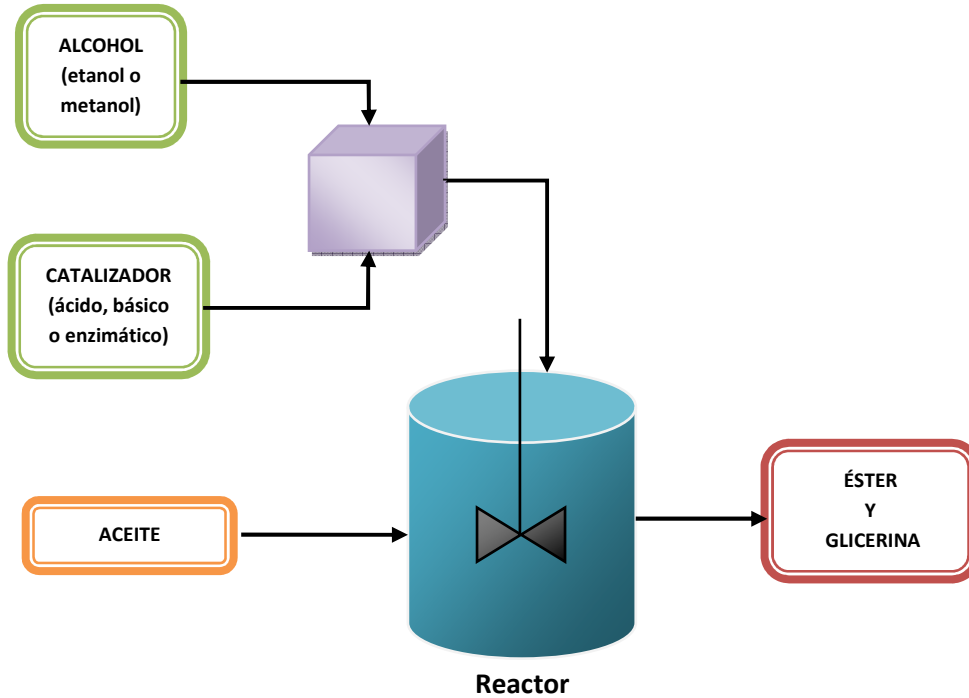


Diagrama 1.1. Proceso de transesterificación.

Esto produce un éster y glicerina, este segundo producto puede ser utilizado en cosmética, farmacia, etc.

Finalmente se realiza la separación éster y la glicerina, así como la destilación del alcohol y el catalizador que se utilizaron en la transesterificación. El diagrama 1.2 ilustra un proceso generalizado de la producción de biodiesel.

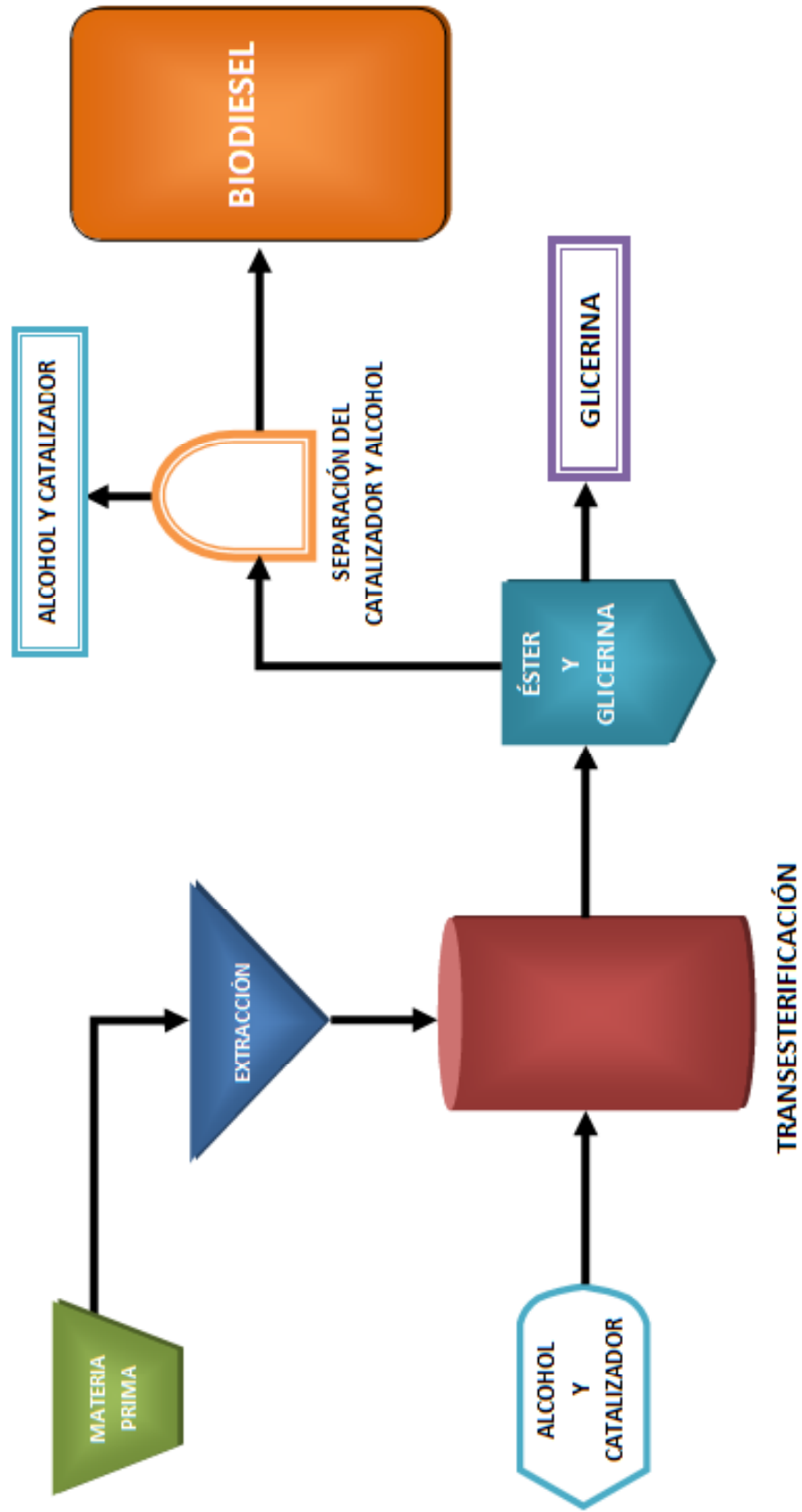


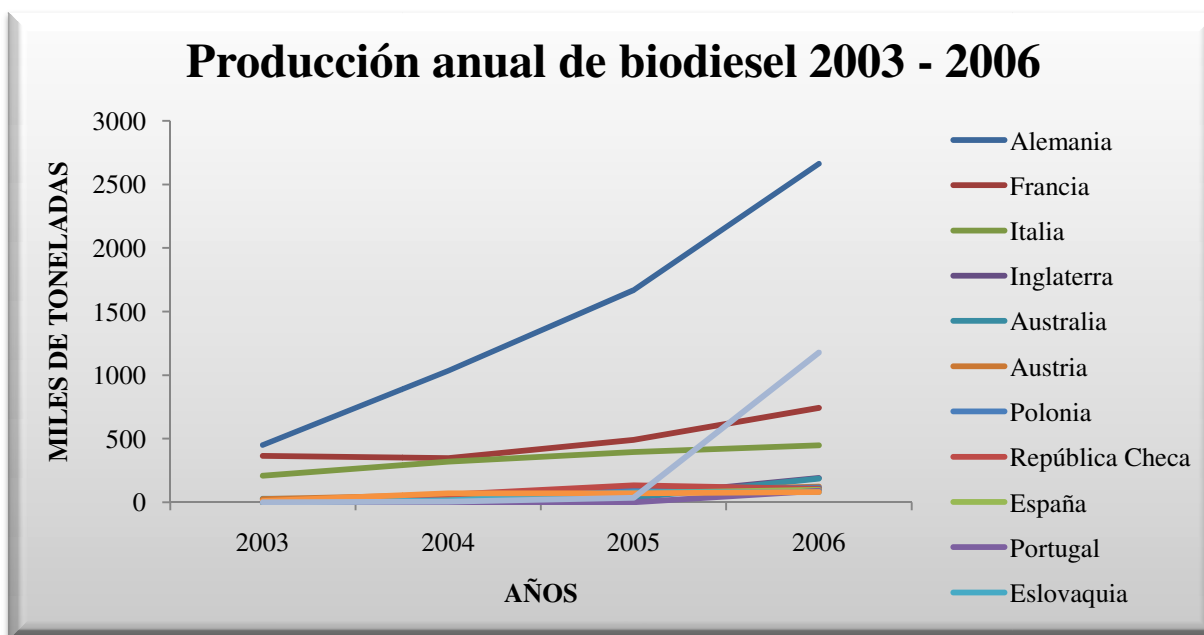
Diagrama 1.2. *Proceso general para la producción de biodiesel.*

1.3. Panorama general de la producción de biodiesel

La producción mundial de biodiesel se ha incrementado con el paso de los años, los países de todo el mundo han aceptando poco a poco esta fuente de energía alterna y se ha invertido en el desarrollo tecnológico para la producción a gran escala.

La empresa GlobalData que se especializa en el análisis e investigación de mercados, realizó un estudio extenso sobre la evolución en la producción mundial de biodiesel. Este informe señala que la producción de biodiesel pasó de 959 millones de litros en el año 2001 a 15,760 millones de litros en 2009, teniendo un 41.9% de crecimiento por año.

El mayor productor de biodiesel en el mundo es la Unión Europea, en el año 2006 alcanzó 5.9 millones de toneladas, siendo Alemania el principal productor con el 45%, le sigue Francia e Italia. En la gráfica 1.1 se puede apreciar la producción durante el periodo 2003-2006.



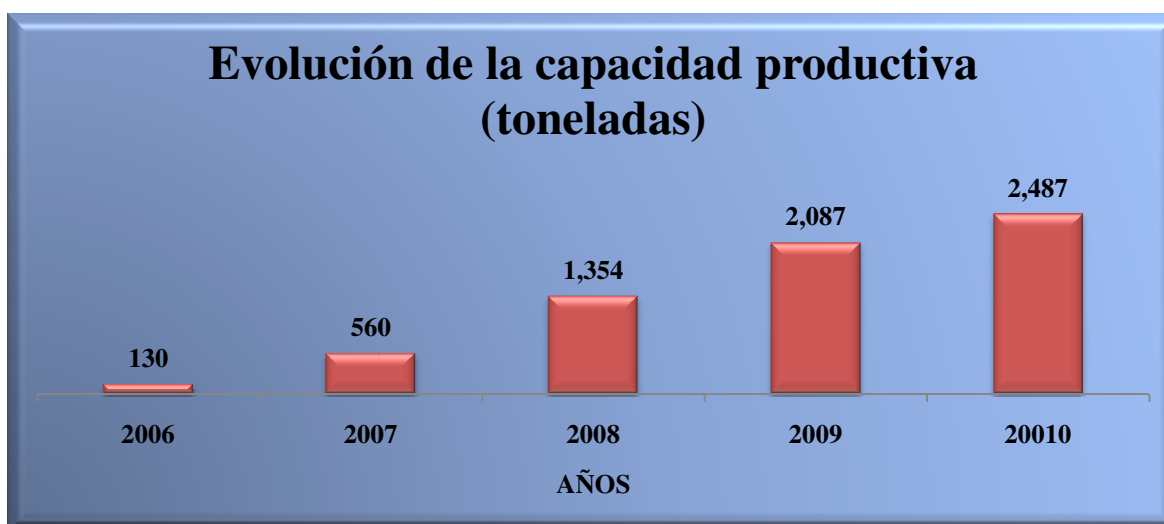
Gráfica 1.1. *Producción mundial de biodiesel en Europa. Cifras obtenidas de Steenblik, 2006.*

Para el año 2009 la Unión Europea se mantenía como el principal productor mundial, seguida por el continente americano y la región Asia-Pacífico. Con el paso de los últimos años la producción europea ha disminuido en comparación con el crecimiento de las otras dos regiones. Los principales países productores de biodiesel son Alemania, EE.UU., Brasil, Argentina y Francia, ya que produce el 68.4% del total de biodiesel en el mundo.

Estados Unidos en el año 2009 tuvo el 17.7% de la producción mundial de biodiesel y se prevé que para el año 2020 llegue a producir 6.453 millones de litros.

Los dos países más importantes de producción de biodiesel en América Latina son Brasil y Argentina. Brasil en el periodo enero a noviembre de 2010 tuvo una producción de 2.38 millones de toneladas, el país tiene aproximadamente 57 plantas autorizadas para la elaboración de biodiesel, que corresponde alrededor de 3.9 millones de toneladas/año de capacidad instalada. Actualmente la materia principal para la producción de biodiesel en Brasil es la soja con un 80% de la elaboración.

Por otra parte Argentina ha aumentado su producción de biodiesel en los últimos años y se ha colocado dentro de los primeros lugares. Durante el año 2010 produjo poco menos de dos millones de toneladas de biodiesel, teniendo un incremento del 51% respecto al 2009, y se prevé que la demanda supere las 3 millones de toneladas en los próximos años.



Gráfica 1.2. *Producción de biodiesel en Argentina. Fuente: Cámara Argentina de Energías Renovables CADER.*

En comparación con lo anterior México presenta un serio retraso en la producción de biodiesel ya que no se cuenta con plantas industriales que lo produzcan a gran escala. Sólo existen pequeñas plantas como la de Grupo Energéticos de Cadereyta en Nuevo León (figura 1.1), con una capacidad máxima de 600,000 L/mes. La producción de este biocombustible es a base de aceites y grasas recicladas de la cafetería del Instituto Tecnológico de Monterrey, se utiliza en un autobús de uso personal y en dos vehículos compactos que son propiedad del instituto.



Figura 1.1. Planta de biodiesel en Cadereyta, Nuevo León.^[23]

Esta misma empresa cuenta con una planta piloto en la Universidad Vasconcelos de Oaxaca, que también experimenta la producción a base de aceites reciclados en un autobús de la misma universidad, en estos dos casos se utiliza una mezcla B20.

Por otra parte existen proyectos como el de *Sabritas S. de R.L. de C.V.*, empresa dedicada a la producción de botanas y papas fritas. Contempla utilizar el aceite usado en la fabricación de sus productos y reciclarlo en la producción de biodiesel para proveer de combustible a su flota vehicular.

También las Universidades de Arizona y Nogales han trabajado de manera conjunta para conocer si es factible la recolección de aceite vegetal residual colectado en ambos lados de la frontera para la producción de biodiesel. En Michoacán se tiene planeado la construcción

de una planta que utilizaría higuierilla como materia prima, esto en el puerto de Lázaro Cárdenas por parte de la empresa Pro Palma.

Lo anterior, ha dado paso a que en los últimos años se tenga un mayor interés en la producción de biodiesel a gran escala y se han realizado diversos estudios con el fin de ver si es factible la introducción de este bioenergético al país.

Un estudio realizado por la Secretaría de Energía (SENER) en el año 2006, prevé la introducción de biodiesel a mediano plazo para poder reemplazar entre el 2% y 5% del diesel proveniente del petróleo. Para alcanzar estas metas se requiere incrementar las áreas de cultivos oleaginosos y la instalación de 10 plantas industriales con una capacidad de 100,000 ton/año o más de 140 plantas pequeñas con una capacidad de 5,000 ton/año, para la instalación de estas plantas se necesitarían una inversión de \$3,100 millones de pesos.

La producción de biodiesel a gran escala en México requiere de una gran investigación y desarrollo tecnológico. En noviembre del 2011 en Tuxtla Gutiérrez Chiapas (figura 1.2), se inauguró la primera estación de servicio de biodiesel en el país. La mezcla de biodiesel que se vende en esta estación está conformada por el cincuenta por ciento de biodiesel hecho a base de aceite de palma y el resto de aceites recolectados en restaurantes, hoteles y rastros porcinos de la misma localidad.

La estación proporciona servicio principalmente al transporte urbano de Tuxtla Gutiérrez y autobuses particulares, pero se ha exhortado a la entidad a sumarse al uso del biodiesel. Aunque se tiene el interés de crear dos estaciones más en esta entidad, la primera estación de servicio de biodiesel cuenta con dos tanques de suministro de 40 mil litros cada uno y dos dispensarios con una capacidad de suministrar hasta 800 litros por minuto.

Otra información que se dio a conocer es que por el momento el litro de biodiesel es más caro que el diesel y no se menciona información de dónde se produce el combustible o si existen proyectos para la construcción de plantas. Aunado a esto último tampoco se menciona si en realidad las emisiones contaminantes emitidas por los autobuses que utilizan biodiesel se reducen.



Figura 1.2. Estación de servicio de biodiesel en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.^[24]

CAPÍTULO 2

**Normatividad para vehículos
y/o en circulación, que usan
diesel o mezclas de biodiesel**

El uso excesivo de combustibles derivados del petróleo durante las últimas décadas ha traído problemas ambientales y de salud debido al incremento de las emisiones contaminantes producidas por la combustión de los motores. Es por eso que se han adoptado políticas que limiten las emisiones contaminantes en la mayor parte del mundo y México no es la excepción.

Por lo tanto, en este capítulo se dará un panorama general de las principales normativas para motores y vehículos diesel de uso pesado, por ejemplo camiones y autobuses. Estas normas han servido como base para regular las emisiones contaminantes a nivel mundial, así como los métodos de prueba.

De acuerdo con las normativas existentes, hay métodos de prueba para medir las emisiones contaminantes en motores, vehículos nuevos y vehículos en circulación. Cabe señalar que al mencionar motores se refiere a los que serán instalados en vehículos nuevos, no obstante el método de prueba es distinto entre motores y vehículos. Por otro lado, es evidente que no hay prueba para “motores en circulación” ya que es ilógico retirar el motor de un vehículo en circulación. Los vehículos nuevos son aquellos que aun permanecen en planta, mientras que los vehículos en circulación son aquellos que integran el parque vehicular.

2.1. Internacionales

A mediados de los años 60 Estados Unidos fue uno de los pioneros en restringir las sustancias nocivas producidas por los automóviles, específicamente en el estado de California, posteriormente se aprobó a nivel federal. Otros países también decidieron legislar dichas sustancias, entre las principales normativas de acuerdo al orden de aparición se encuentran:

- Normativa CARB (California Air Resources Board)
- Normativa EPA (Environmental Protection Agency)
- Normativa UE (Unión Europea)
- Normativa Japonesa ^[34]

En general estas normas mencionadas se utilizan como referencia a nivel mundial.

A finales de 1987 en la Unión Europea se establecen los límites permisibles de gases contaminantes para motores diesel de acuerdo a la Directiva 88/77/CEE, la cual se encarga de establecer las disposiciones de dichas normas de acuerdo a las autoridades internas competentes. ^[28]

Con el paso del tiempo y después de una serie de modificaciones de los límites admitidos y de los métodos de prueba en distintas etapas como Euro I, Euro II, Euro III, Euro IV y Euro V, la Directiva 05/55/CE ^[26] estableció en el 2009 la publicación más reciente de los límites de emisiones permisibles en motores nuevos para vehículos de uso pesado.

El ciclo de prueba con el que se inició hasta la etapa Euro II fue la prueba R49 o comúnmente llamada *ciclo 13 modos*. Es utilizada también en Estados Unidos y Japón prácticamente con el mismo procedimiento pero con distintos régimen de giro, cargas y factores de ponderación. Sin embargo, en la Unión Europea esta prueba fue sustituida por el Ciclo Estacionario Europeo (*European Stationary Cycle*, ESC) a partir de la Euro III hasta la etapa vigente (Euro V).

El ESC se aplica para la certificación de emisiones para motores de encendido por compresión (MEC). Consiste en aplicar 13 modos de operación establecidos por la Directiva 1999/96/CE y 3 modos aleatorios adicionales dentro de un rango de regímenes de giro, es decir, operar de acuerdo al orden que se muestra en la figura 2.1. Los valores de carga y régimen de giro del motor deben ser normalizados, esto es obtener el cociente del valor de carga y régimen de giro entre su respectivo valor máximo. Después de haber llevado a cabo la prueba, los datos recolectados por el equipo de medición son ponderados de acuerdo al factor en cada modo correspondiente, como se muestra en la tabla 2.1.

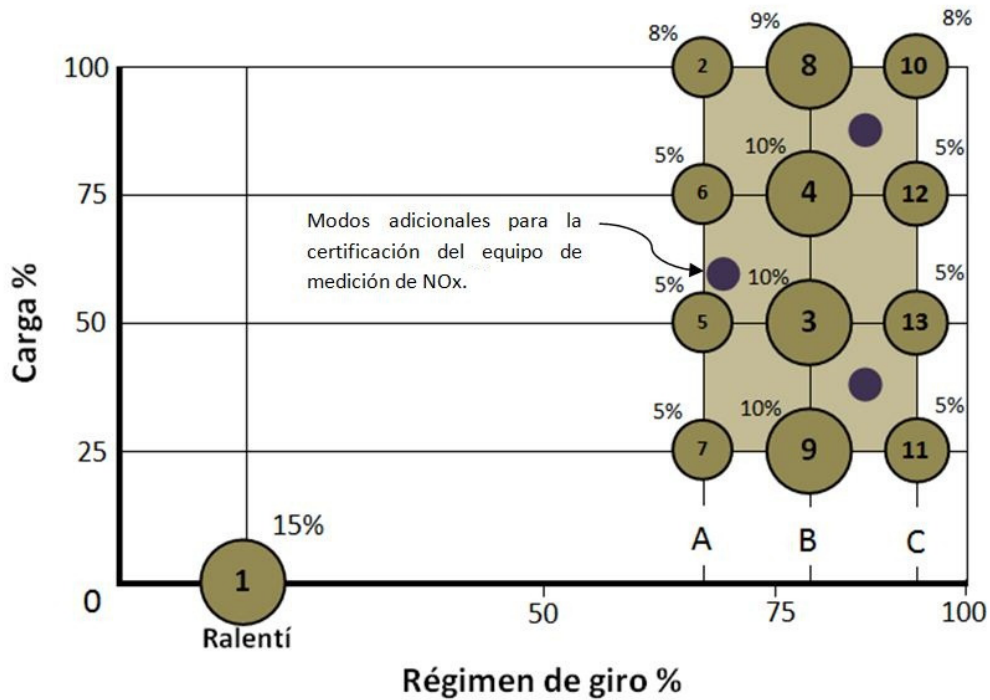


Figura 2.1. Orden de los modos de operación y los valores normalizados de carga y régimen de giro.^[26]

Los regímenes de giro (A, B y C) son calculados mediante funciones, que son:

- Régimen de giro A = $n_{Lo} + 25\% (n_{Hi} - n_{Lo})$
- Régimen de giro B = $n_{Lo} + 50\% (n_{Hi} - n_{Lo})$
- Régimen de giro C = $n_{Lo} + 75\% (n_{Hi} - n_{Lo})$

Donde:

- n_{Hi} = 70% del régimen de giro a la potencia nominal^I del motor.
- n_{Lo} = 50% del régimen de giro a la potencia nominal del motor.^[26]

El ralentí, punto uno de operación, es el régimen de giro mínimo en funcionamiento de un motor sin carga. Los regímenes de giro y factores de ponderación se muestran en la tabla 2.1.

^I Es la máxima potencia del motor a plena carga que establece el fabricante.

Modo	Régimen de giro	Carga %	Factor de ponderación	Duración (minutos)
1	Ralentí	0	15	4
2	A	100	8	2
3	B	50	10	2
4	B	75	10	2
5	A	50	5	2
6	A	75	5	2
7	A	25	5	2
8	B	100	9	2
9	B	25	10	2
10	C	100	8	2
11	C	25	5	2
12	C	75	5	2
13	C	50	5	2

Tabla 2.1. Ciclo 13 modos con regímenes de giro definidos por una función aritmética, factores de ponderación y tiempo de duración.^[26]

En Estados Unidos (US EPA) existe la *Prueba Suplementaria de Emisiones SET* por sus siglas en inglés *Supplementary Emissions Test*, que a partir del 2010 es obligatoria para los fabricantes de motores de uso pesado. Se puede decir que la prueba SET es la misma que el Ciclo Estacionario Europeo (ESC) pero con tiempo especificado en la transición de modo (tabla2.2).

Ciclo SET modo rampa							
Modo RMC	2007 – 2009				2010 y posteriores		
		Tiempo (s)	Velocidad	Par (%)	Tiempo (s)	Velocidad	Par (%)
1a	Estado estable	170	Ralentí en caliente	0	170	Ralentí en caliente	0
1b	Transición	20	Transición lineal	Transición lineal	20	Transición lineal	Transición lineal
2a	Estado estable	170	A	100	173	A	100
2b	Transición	20	A	Transición lineal	20	Transición lineal	Transición lineal
3a	Estado estable	102	A	25	219	B	50
3b	Transición	20	A	Transición lineal	20	B	Transición lineal
4a	Estado estable	100	A	75	217	B	75
4b	Transición	20	A	Transición lineal	20	Transición lineal	Transición lineal
5a	Estado estable	103	A	50	103	A	50
5b	Transición	20	Transición lineal	Transición lineal	20	A	Transición lineal
6a	Estado estable	194	B	100	100	A	75
6b	Transición	20	B	Transición lineal	20	A	Transición lineal
7a	Estado estable	219	B	25	103	A	25
7b	Transición	20	B	Transición lineal	20	Transición lineal	Transición lineal
8a	Estado estable	220	B	75	194	B	100
8b	Transición	20	B	Transición lineal	20	Transición lineal	Transición lineal
9a	Estado estable	219	B	50	218	B	25
9b	Transición	20	Transición lineal	Transición lineal	20	Transición lineal	Transición lineal
10a	Estado estable	171	C	100	171	C	100
10b	Transición	20	C	Transición lineal	20	C	Transición lineal
11a	Estado estable	102	C	25	102	C	25
11b	Transición	20	C	Transición lineal	20	C	Transición lineal
12a	Estado estable	100	C	75	100	C	75
12b	Transición	20	C	Transición lineal	20	C	Transición lineal
13a	Estado estable	102	C	50	102	C	50
13b	Transición	20	Transición lineal	Transición lineal	20	Transición lineal	Transición lineal
14	Estado estable	168	Ralentí en caliente	0	168	Ralentí en caliente	0

Tabla 2.2. Ciclo SET. ^[26]

Para motores con un dinamómetro de banco existe otra prueba llamada *Ciclo Transitorio*. La cual consiste en aplicar un programa de operación del motor, donde los distintos puntos de carga y régimen de giro son variables; a diferencia de la prueba en estado estable donde los modos de carga y velocidad permanecen constantes.

En la Unión Europea el ciclo transitorio para motores es llamado *Respuesta de Carga Europea* ELR por sus siglas en inglés *European Load Response*, utilizada para medir opacidad (impedimento al paso de luz). Consta de una secuencia de tres cargas paso a paso en cuatro regímenes de giro definidas por un programa de secuencia. Durante la prueba la opacidad es medida cada 20 segundos, figura 2.2.

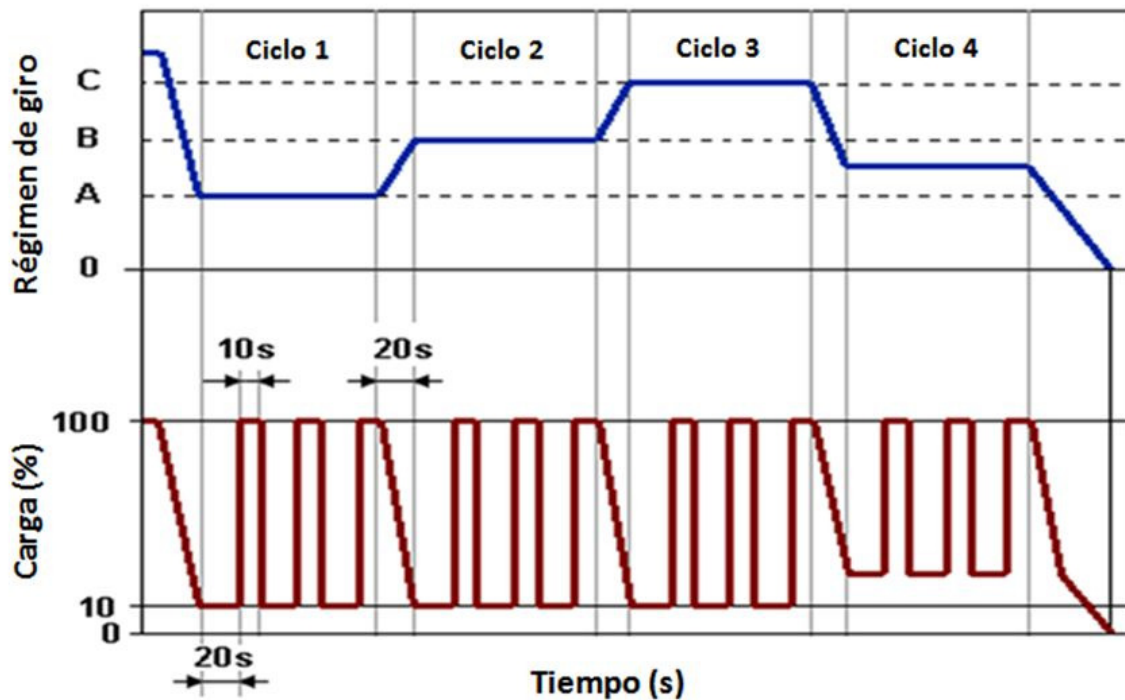


Figura 2.2. Secuencia de operación del motor en el dinamómetro para determinar la opacidad. ^[26]

En Estados Unidos existe el ciclo transitorio llamado *Procedimiento de Prueba Federal* FTP, por sus siglas en inglés *Federal Test Procedure*, ésta se utiliza para la certificación de motores de encendido por compresión (MEC). El ciclo transitorio FTP para motores es la adaptación de prueba UDDS (EPA Urban Dynamometer Driving Schedule) la cual se lleva a cabo en un dinamómetro de chasis.

El ciclo consiste de cuatro fases:

- 1) NYNF (New York Non Freeway) fase típica de tránsito urbano ligero con paradas y arranques frecuentes.
- 2) LANF (Los Angeles Non Freeway) fase típica de congestión vehicular urbana con pocas paradas.
- 3) LAFY (Los Angeles Freeway) en esta fase se simula el tránsito congestionado de las autopistas en Los Angeles.
- 4) La primera fase NYNF se repite (figura 2.3).

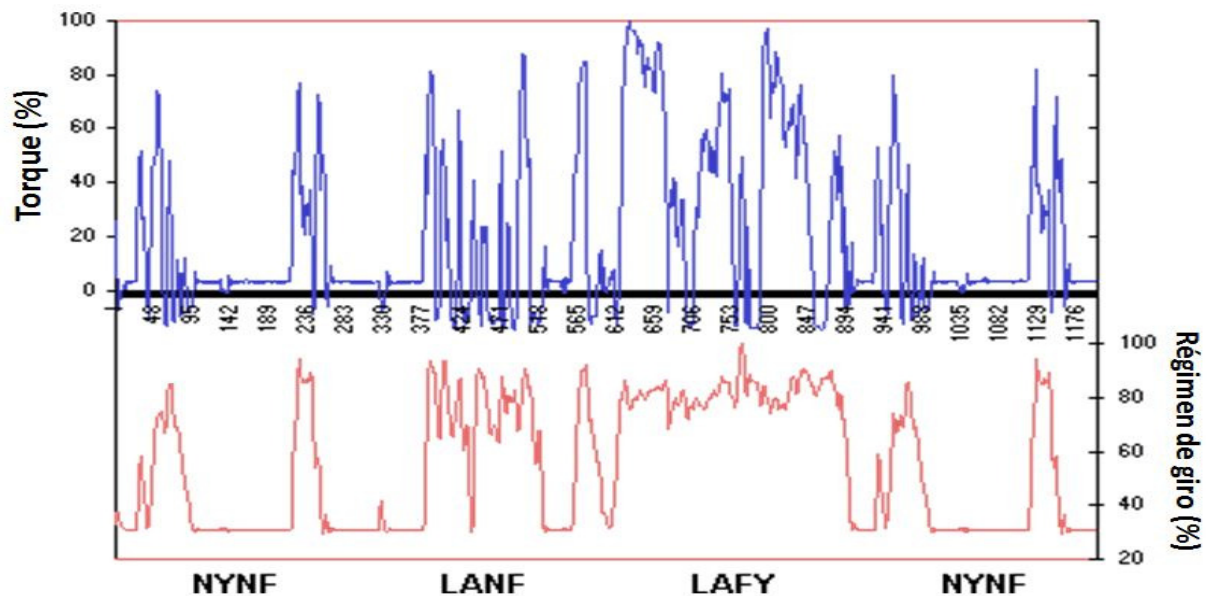


Figura 2.3. *Ciclo FTP transitorio para motores de uso pesado, análogo al ciclo de manejo para vehículos ligeros.* ^[26]

Además de las pruebas anteriores, la Regulación de Técnicas Globales GTR ^[25] por sus siglas en inglés *Global Technical Regulation*, realizó una recopilación de las condiciones típicas de manejo en la Unión Europea, Estados Unidos, Japón y Australia. Actualmente, cualquier país puede adoptar los procedimientos de prueba con los límites de emisiones de acuerdo a la legislación local.

Existen dos etapas para ésta prueba:

- En estado estable llamada Ciclo Estacionario Armonizado Mundial WHSC por sus siglas en inglés *World Harmonised Stationary Cycle*, la cual se lleva a cabo con un inicio en caliente.
- Ciclo transitorio llamado Ciclo Transitorio Armonizado Mundial WHTC por sus siglas en inglés *World Harmonised Transitory Cycle*, y se lleva a cabo con un inicio tanto en frío como en caliente. ^[27]

Con base en el siguiente algoritmo se representa la secuencia general que aplica la GTR para la certificación de motores, diagrama 2.1.

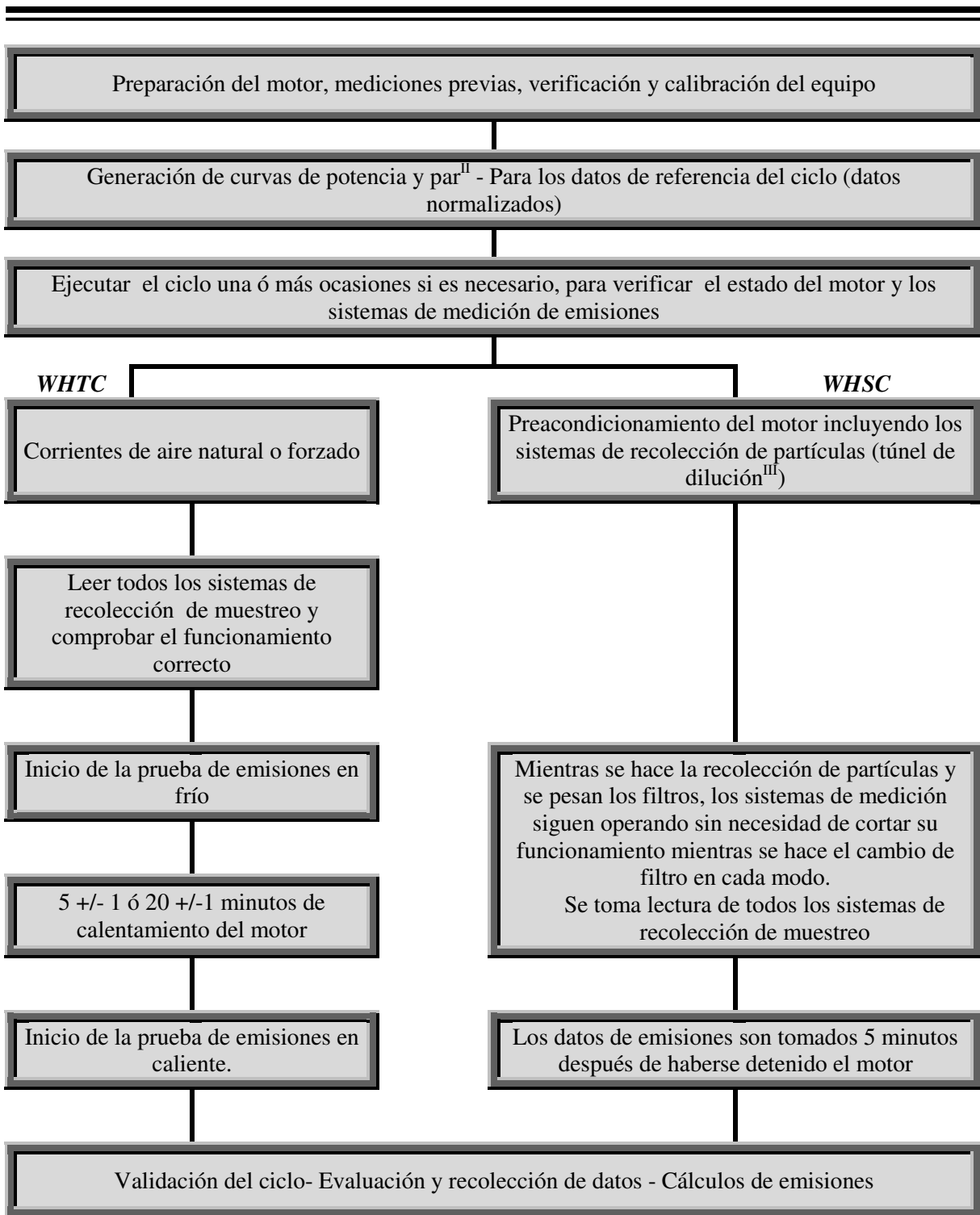


Diagrama 2.1. Algoritmo de la secuencia general que aplica la GTR. ^[25]

^{II} Las curvas características representan los valores máximos de par y potencia característicos del motor, a su vez el régimen de giro a la cual se alcanzan estos valores.

^{III} Un túnel de dilución es una cámara a la cual se lleva una muestra de gases de escape para mezclarla con aire atmosférico, se hace con el objetivo de simular las condiciones ambientales.

Hasta el momento, las pruebas mencionadas son aquellas que se realizan en dinamómetros de banco no obstante, existen pruebas para vehículos de uso pesado en dinamómetros de chasis. Consisten básicamente en llevar a cabo un ciclo de manejo, es decir, seguir un perfil de velocidades en un plano velocidad-tiempo representando las condiciones típicas de manejo de una cierta zona: ciudad, autopista o rural.

En la Unión Europea la prueba para vehículos nuevos es el llamado *Ciclo Transitorio Europeo* ETC por sus siglas en inglés *European Transient Cycle* (figura 2.4), basados en los patrones de manejo típicos de los diferentes tipos de camino en los que circulan los vehículos equipados con motores de uso pesado.

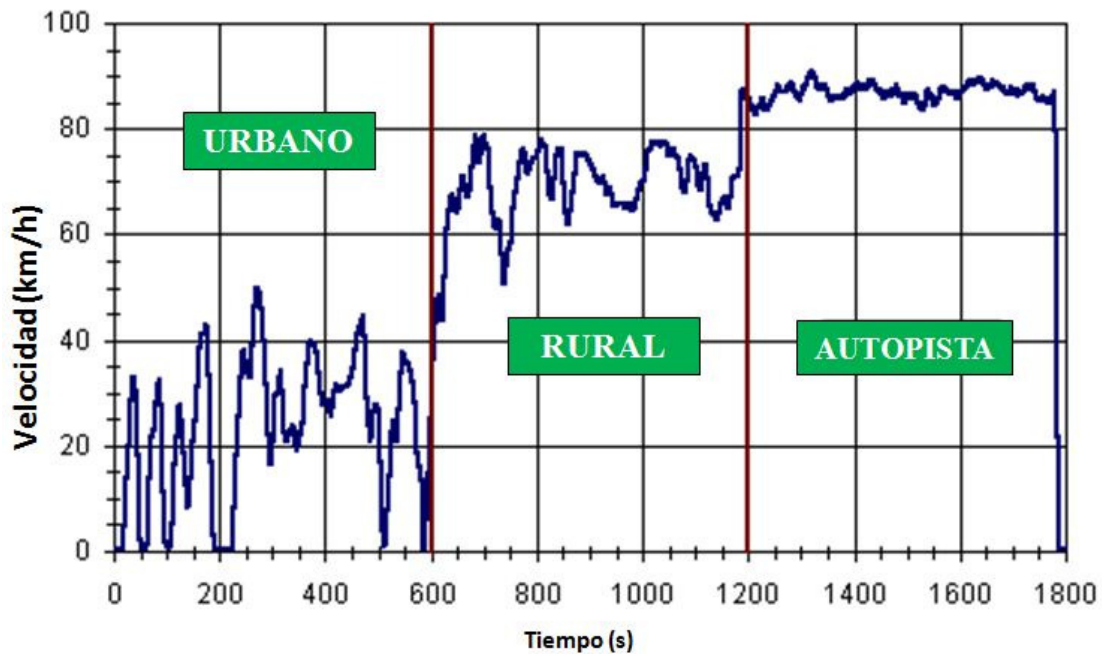


Figura 2.4. *Ciclo transitorio ETC, el ciclo dura 1800 s y la duración de cada etapa es de 600 s.*^[26]

Estados Unidos cuenta con varios ciclos de manejo, sin embargo sólo se mencionarán dos.

La EPA estableció el ciclo de manejo urbano en dinamómetro de chasis, *Urban Dynamometer Driving Schedule* (UDDS), figura 2.5. Este ciclo no debe confundirse con el FTP-72 ya que también se suele conocer como la prueba UDDS. Para distinguir la prueba en vehículos de uso pesado habitualmente se agrega HD-UDDS.

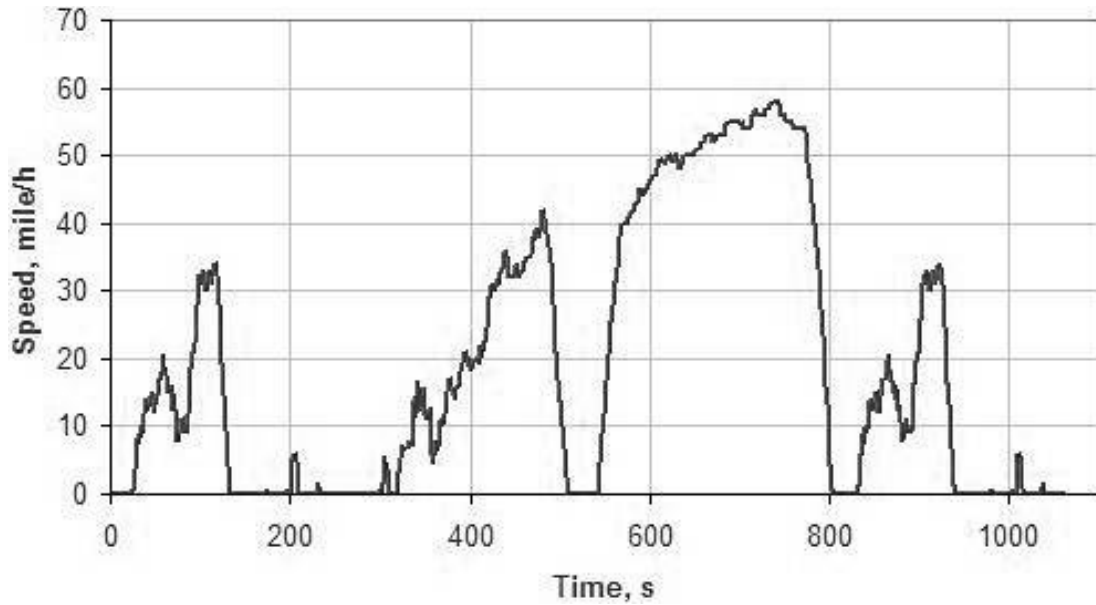


Figura 2.5. Ciclo HD-UDDS, el ciclo dura 1060 s, recorre una distancia de 5.55 millas (8.9 km), con una velocidad promedio de 18.86 mi/h (30.4 km/h) y una velocidad máxima de 58 mi/h (93.3 km/h).^[26]

El otro ciclo considerado importante es el ciclo en dinamómetro de chasis para camiones diesel de uso ultrapesado, Heavy Heavy-Duty Diesel Truck (HHDDT). El ciclo consiste en cuatro diferentes modos de velocidad-tiempo, los cuales son:

- Ralentí
- Creep (figura 2.6)

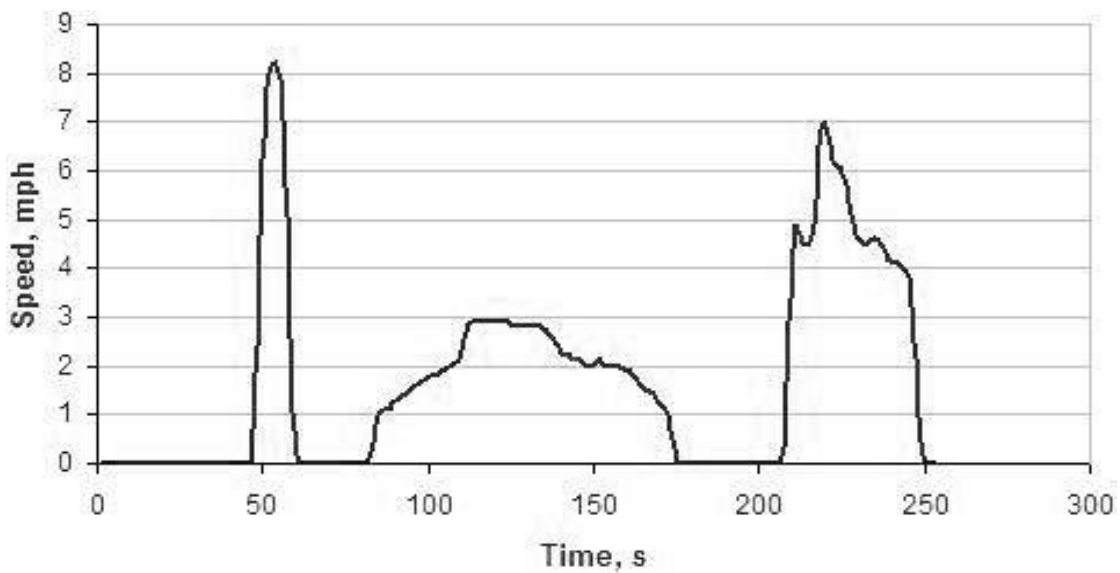


Figura 2.6. Con una duración 253 s, recorre una distancia de 0.124 mi (0.2 km), con una velocidad promedio de 1.77 mph (2.84 km/h) y una velocidad máxima de 8.24 mph (13.26 km/h).^[26]

➤ Transitorio (figura 2.7)

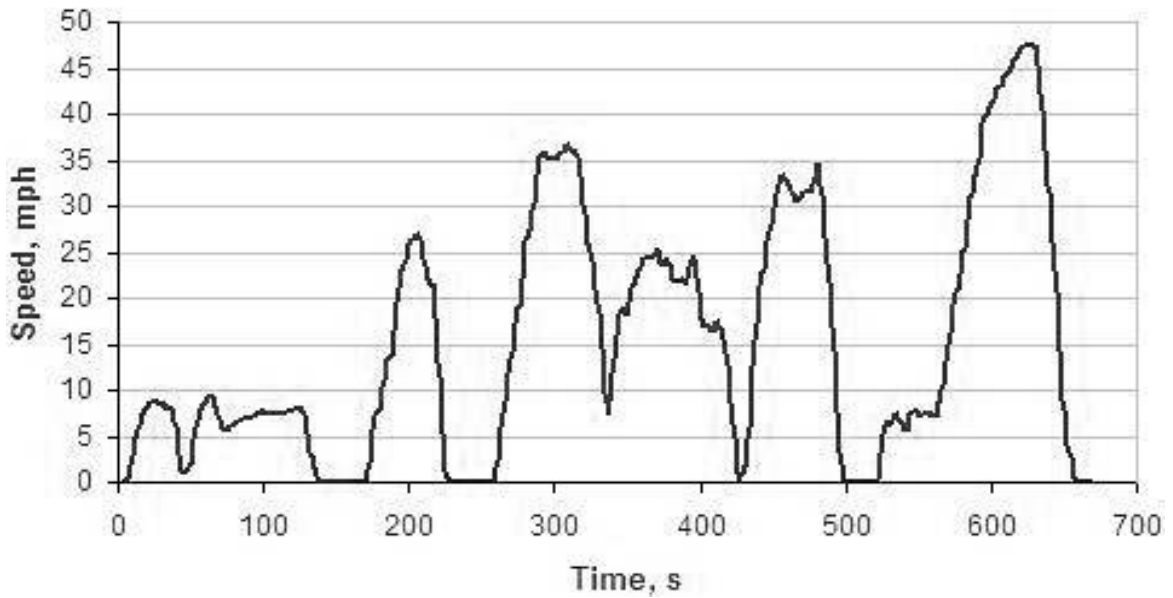


Figura 2.7. Con una duración 668 s, recorre una distancia de 2.85 mi (4.58 km), con una velocidad promedio de 15.4 mph (24.78 km/h) y una velocidad máxima de 47.5 mph (76.44 km/h).^[26]

➤ Crucero (figura 2.8)

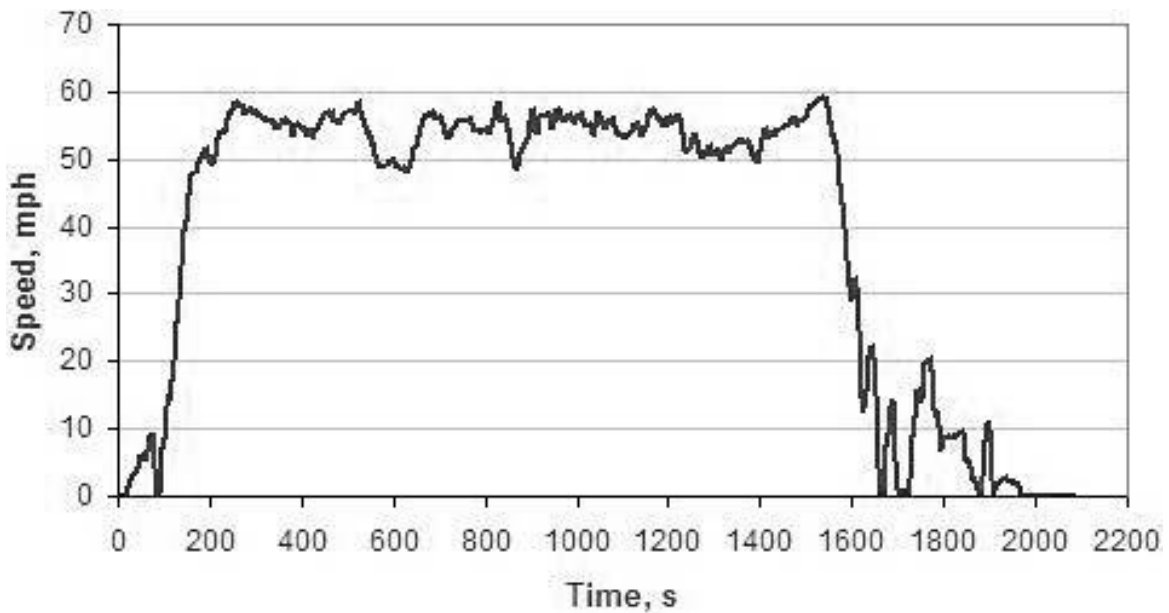


Figura 2.8. Con una duración 2083 s, recorre una distancia de 23.1 mi (37.17 km), con una velocidad promedio de 39.9 mph (64.21 km/h) y una velocidad máxima de 59.3 mph (95.43 km/h).^[26]

A partir del 2005 Japón introdujo el ciclo de manejo JE05 para vehículos diesel y gasolina, con un peso bruto vehicular^{IV} mayor a los 3,500 kg. El ciclo se basa en los patrones típicos de manejo de la ciudad de Tokio, figura 2.9.

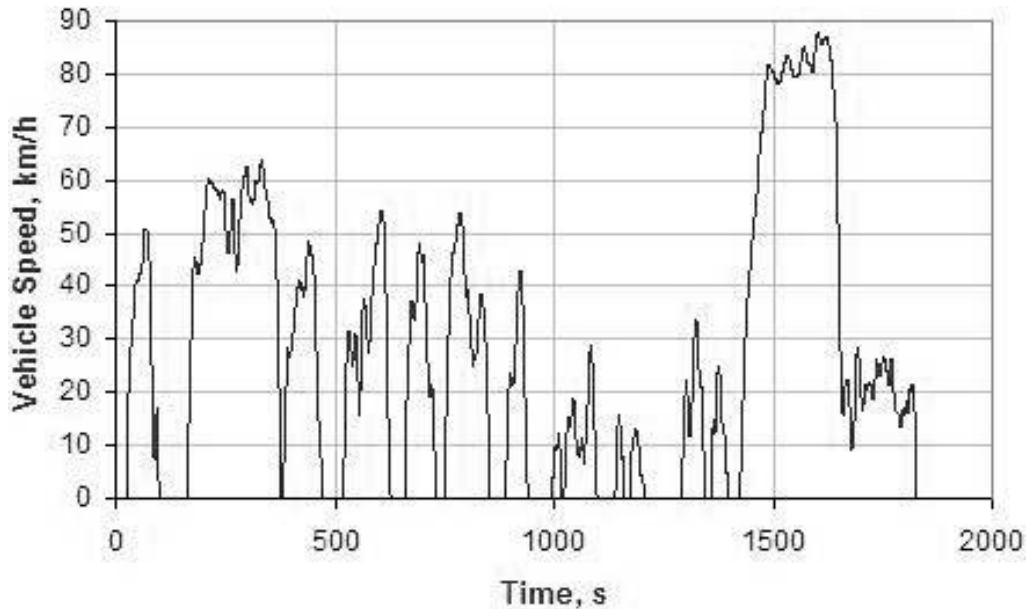


Figura 2.9. Ciclo JE05, con una duración de 1060, velocidad promedio de 26.94 km/h y una velocidad máxima de 88 km/h.^[26]

En la mayoría de los países para vehículos en circulación se mide la opacidad emitida por los vehículos diesel. Sin embargo, para los vehículos ligeros se evalúan las emisiones contaminantes, a través de posicionar al vehículo en un dinamómetro de rodillos a los cuales se les aplica carga para representar las circunstancias de manejo.

En los vehículos diesel en circulación la prueba de opacidad se realiza generalmente con el vehículo detenido, motor encendido y desembragado. Esta prueba consiste básicamente en acelerar súbitamente el motor desde ralentí hasta las revoluciones a corte de gobernador, es decir, se acelera hasta llegar a las revoluciones por minuto máximas (rpm_{max}), en este punto la bomba deja de suministrar combustible a los inyectores, en consecuencia, el motor se desacelera y se inicia la medición de opacidad.

^{IV} Es el peso del vehículo sumado a su máxima capacidad de carga conforme a las especificaciones del fabricante y al de su tanque de combustible lleno.^[30]

En general sólo se realizan pruebas de opacidad para los vehículos pesados y no en rodillos por sus elevados costos, pero en los últimos años gracias al desarrollo de la tecnología se han reducido éstos generando mayor interés en la realización de pruebas para vehículos pesados en rodillos.

Los ciclos de ensayo mencionados anteriormente son utilizados para comprobar que los vehículos cumplan los límites de emisiones máximos y cada legislación local establece los límites que mejor restrinjan.

Los motores diesel en la Unión Europea son certificados mediante los ciclos de prueba mostrados, mas falta señalar cuáles son los límites máximos permisibles para motores que equiparán vehículos nuevos. La tabla 2.3 muestra los límites máximos de acuerdo a la legislación vigente. Se destacará la norma Euro V por ser la norma vigente que regula los vehículos pesados nuevos a diesel.

Emisiones	Unidad	Euro V		Euro V – EE V ^c	
		ESC/ELR Sólo diesel	ETC diesel y gas	ESC/ELR Sólo diesel	ETC diesel y gas
CO	g/kWh	1.5	4.0	1.5	3.0
HC	g/kWh	0.46	-	0.25	-
NMHC	g/kWh	-	0.55	-	0.40
CH ₄ ^a	g/kWh	-	1.1	-	0.65
NOx	g/kWh	2.0	2.0	2.0	2.0
PM	g/kWh	0.02	0.03 ^b	0.02	0.02
Opacidad	m ⁻¹	0.5	-	0.15	-

a) Aplica sólo para motores a gas natural comprimido.

b) No aplica para motores que operan a gas.

c) Vehículos Ecológicos Avanzados Amigables con el Medio Ambiente.

Tabla 2.3. *Delphi, World Wide Emissions Standards.* ^[25]

Las últimas normas EPA de emisión se aplican a los nuevos motores diesel utilizados en vehículos en carretera de servicio pesado a partir del año 2007 y posteriores, tabla 2.4.

Fecha	Ciclo de prueba	NMHC (g/bhp-hr)	NOx (g/bhp-hr)	PM (g/bhp-hr)
2007 y posteriores	FTP (HD-UDDS) y SET	0.14	0.20	0.01

Tabla 2.4. Límites de emisiones de motores a partir del año 2007 y posteriores. ^[26]

Hasta finales del 2005 la prueba JE05 era aplicada para vehículos con un peso bruto vehicular mayor 2,500kg, posteriormente la norma se modificó y se aplicó para vehículos nuevos con un peso bruto vehicular mayor a 3,500 kg (tabla 2.5).

Fecha	CO (g/kWh)	HCNM (g/kWh)	NOx (g/kWh)	PM (g/kWh)
2005 ^a	2.22	0.17	2.0	0.027
2009 y posteriores	2.22	0.17	0.7	0.01

a) Se implementó completo hasta finales del 2005.

Tabla 2.5. Prueba JE05. ^[26]

2.2. Nacionales

México al igual que otros países, ha establecido límites de emisiones tanto para motores que equiparán vehículos nuevos como para vehículos en circulación. Los cuales son establecidos por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Las emisiones son reguladas con base en las normativas de Estados Unidos y la Unión Europea. Es por eso que en México se admiten los vehículos nuevos a diesel siempre y cuando estén avalados por un laboratorio certificado, empleando ya sea los métodos de prueba (mostrados en el subcapítulo 2.1) de Estados Unidos o de la Unión Europea con los límites máximos de acuerdo a las tablas 2.6 y 2.7, respectivamente.

Las normativas que a continuación se muestran son Normas Oficiales Mexicanas (NOM) las cuales están vigentes y aplican en toda la República Mexicana.

La NOM-044-2006 establece los límites máximos de emisión de hidrocarburos totales, hidrocarburos no metano, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, partículas y opacidad de humo provenientes del escape para motores que equiparán los vehículos nuevos con un peso bruto vehicular mayor a 3,857 kg. Los motores nuevos a diesel y las unidades nuevas que los incorporen deberán cumplir lo señalado en los incisos *a* y *b*.

- a) Las especificaciones de los límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos totales (HC), hidrocarburos no metano más óxidos de nitrógeno (HCNM + NOx), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx) y partículas (PM), así como la opacidad de humo, provenientes del escape de motores y unidades nuevas que los integren. En la tabla 2.6 establecen los límites de emisiones máximos permisibles así como los métodos de prueba.

Estándar	Método de prueba	CO (g/bhp-hr)	NOx (g/bhp-hr)	HC (g/bhp-hr)	PM (g/bhp-hr)	HCNM + NOx (g/bhp-hr)	Opacidad de Humo (%)		
							Aceleración ^V	Arrastre ^{VI}	Pico ^{VII}
A	SET	15.5	4.0	1.3	0.10	No aplica	20	15	50
B	SET y HD-UDDS	15.5	No aplica	No aplica	0.10	2.4 o 2.5 siempre y cuando los HCNM sean menor a 0.5	20	15	50

Tabla 2.6. NOM-044-SEMARNAT-2006.

^V Método de prueba caracterizado por cambiar de velocidad en el régimen de giro.

^{VI} Método de prueba caracterizado por aplicar carga de camino al motor.

^{VII} Es el valor máximo de opacidad que se presenta en cualquiera de los modos de operación del motor (aceleración o arrastre).

- Estándar A. Límites máximos permisibles para motores y/o unidades nuevos producidos en el año 2006 y hasta junio de 2008, obtenidos con el método de prueba Ciclo Transitorio FTP (HD-UDDS) descrito en el apartado 2.1.
 - Estándar B. Límites máximos permisibles para motores y/o unidades nuevos producidos a partir de julio de 2008 hasta junio de 2011^{VIII}, obtenidos con los métodos de prueba Ciclo Transitorio Europeo (ETC) y el Ciclo Suplementario (SET).
- b) Las especificaciones de los límites máximas permisibles de emisión de hidrocarburos totales (HC), hidrocarburos no metano (HCNM), monóxido de nitrógeno (NOx) y partículas (PM), así como la opacidad de humo, provenientes del escape de motores y unidades nuevas que los integren, son establecidas en la tabla 2.7.

Estándar	Método de prueba	CO (g/kWh)	NOx (g/kWh)	HC (g/kWh)	PM (g/bhp-hr)	HCNM + NOx (g/bhp-hr)	Opacidad de Humo (m ⁻¹)
A	ESC	2.1	5.0	0.66	0.10	No aplica	No aplica
	ETC	5.45	5.0	No aplica	0.16	0.78	No aplica
	ELR	No aplica					0.8
B	ESC	1.5	3.5	0.46	0.02	No aplica	No aplica
	ETC	4.0	3.5	No aplica	0.03	0.55	No aplica
	ELR	No aplica					0.5

Tabla 2.7. NOM-044-SEMARNAT-2006.

- Estándar A. Límites máximos permisibles para motores y/o unidades nuevos producidos en el año 2006 y hasta junio de 2008, obtenidos con los métodos de prueba Ciclo Estacionario Europeo (ESC), Ciclo Europeo de Transición (ETC) y Ciclo Europeo de Carga (ELR), descritos en el apartado 2.1.

^{VIII} El 30 de junio del 2011 el Diario Oficial de la Federación publicó que los incisos a) y b) (mostrados) de la NOM-044-SEMARNAT-2006 siguen estando vigentes hasta junio del 2014. ^[35]

- Estándar B. Límites máximos permisibles para motores y/o unidades nuevos producidos a partir de julio de 2008 y hasta junio de 2011^{VII}, obtenidos con los métodos de prueba Ciclo Estacionario Europeo (ESC), Ciclo Europeo de Transición (ETC) y Ciclo Europeo de Carga (ELR), descritos en el apartado 2.1.

Para vehículos en circulación diesel básicamente es el mismo principio que se realiza en todo el mundo. El método de prueba para medir opacidad y los límites máximos permisibles vigentes, se encuentran en la NOM-045-SEMARNAT-2006.

Los límites máximos permisibles de opacidad del humo proveniente del escape de los vehículos automotores en circulación equipados con un motor diesel, en función del año-modelo del vehículo y cuyo peso bruto vehicular sea hasta 3,856 kg. Se establece en la tabla 2.8.

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

Tabla 2.8. NOM-045-SEMARNAT-2006.

Para vehículo cuyo peso bruto vehicular sea mayor a 3,856 kg. Se establece en la tabla 2.9.

Año-modelo del vehículo	Coefficiente de absorción de luz (m⁻¹)	Opacidad (%)
1990 y anteriores	3.0	72.47
1991 y posteriores	2.5	65.87

Tabla 2.9. NOM-045-SEMARNAT-2006.

Cabe señalar que las normas mexicanas sólo se basan en las normativas europeas y estadounidenses para la certificación de vehículos diesel y no consideran las japonesas.

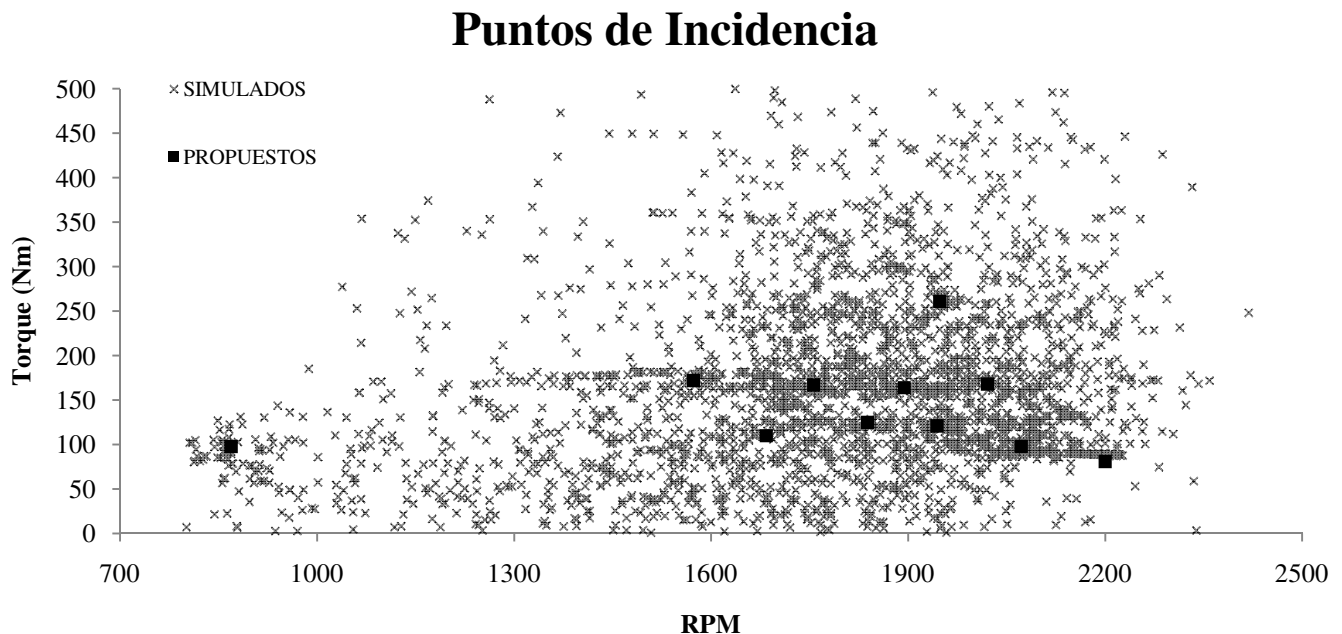
CAPÍTULO 3

Ensayos experimentales en laboratorio

Los ensayos o pruebas realizadas en el laboratorio, intentan reproducir las condiciones de funcionamiento del motor de un vehículo pesado más cercanas a la realidad. Reproduciendo dichas condiciones en dinamómetros de rodillos para vehículos ligeros y en dinamómetro de banco para los motores de vehículos pesados.

El protocolo^{IX} que se plantea, parte de las condiciones de operación de un vehículo en circulación y se pretende adaptar a las condiciones ambientales controladas en un laboratorio.

Para la elaboración de este protocolo se emplearon los resultados de una investigación previamente realizada, en conjunto con el CCA^X, donde se llevaron a cabo ensayos con un vehículo diesel en una ruta dentro de Ciudad Universitaria utilizando un Sistema de Medición de Emisiones Portátil (PEMS). Los datos recolectados se introdujeron en un simulador de vehículos denominado ADVISOR^{XI} el cual mostró en una gráfica de dispersión (gráfica 3.1) los puntos de operación del motor (torque y rpm) y se consideraron las zonas de mayor incidencia como referencia para los ensayos en el laboratorio.



Gráfica 3.1. Gráfica de dispersión realizada por ADVISOR.

^{IX} Plan escrito y detallado de un experimento científico, un ensayo clínico o una actuación médica. *Real Academia Española 2012*

^X Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM

^{XI} Software de simulación para determinar el desempeño (emisiones, par, potencia, rpm, etc) de vehículos híbridos y convencionales.

3.1. Estructuración de los ensayos

A partir de las zonas con mayor incidencia se seleccionaron los puntos y se planteó una matriz de ensayos (tabla 3.1).

Prueba	Torque (Nm)	RPM
1	98	869
2	110	1684
3	125	1838
4	121	1944
5	98	2072
6	81	2200
7	172	1573
8	167	1756
9	164	1894
10	168	2021
11	261	1948

Tabla 3.1. Puntos de operación propuestos.

En los ensayos planteados se utilizó un motor Mercedes Benz OM366LA (figura 3.1) del año 1992 con los siguientes datos de placa:

Especificaciones motor Mercedes Benz	
Potencia nominal	127 KW (170HP) @ 2600 rpm
Torque máximo	560 Nm @ 1400 – 1800 rpm
Velocidad de vacío	600 ± 50 rpm
Cilindros	6
Desplazamiento	5.9 Litros



Figura 3.1. Motor de ensayos Mercedes Benz.

Al motor se le adaptó un dinamómetro mediante un sistema de transmisión cardán-flecha (figura 3.2). El dinamómetro tiene la función de poner resistencia al giro del motor.

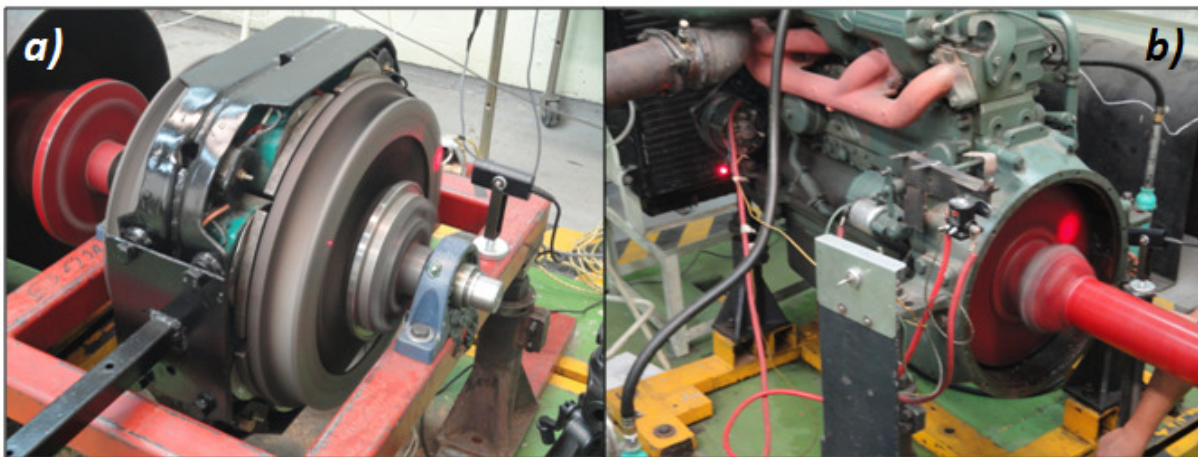


Figura 3.2. a) Dinamómetro adaptado al motor, b) Sistema de transmisión cardán-flecha.

El dinamómetro utilizado en el laboratorio es marca TELMA y tiene las siguientes características:

Especificaciones Mecánicas			
Masa	Rotores: 50 kg (110 lb)	Estator: 142 kg (313 lb)	Total: 192 kg (423 lb)
Torque máximo de frenado	1250 N-m / 921 lb-ft		
Torque máximo transmisible	12800 N-m / 9430 lb-ft		
Velocidad angular máxima	4000 rpm		

Este dinamómetro es de corrientes parásitas^{XII} el cual se utiliza para aplicar un torque de frenado al motor y es cuantificado mediante una celda de carga con un programa de computadora que registra cada segundo los valores obtenidos (figura 3.3).

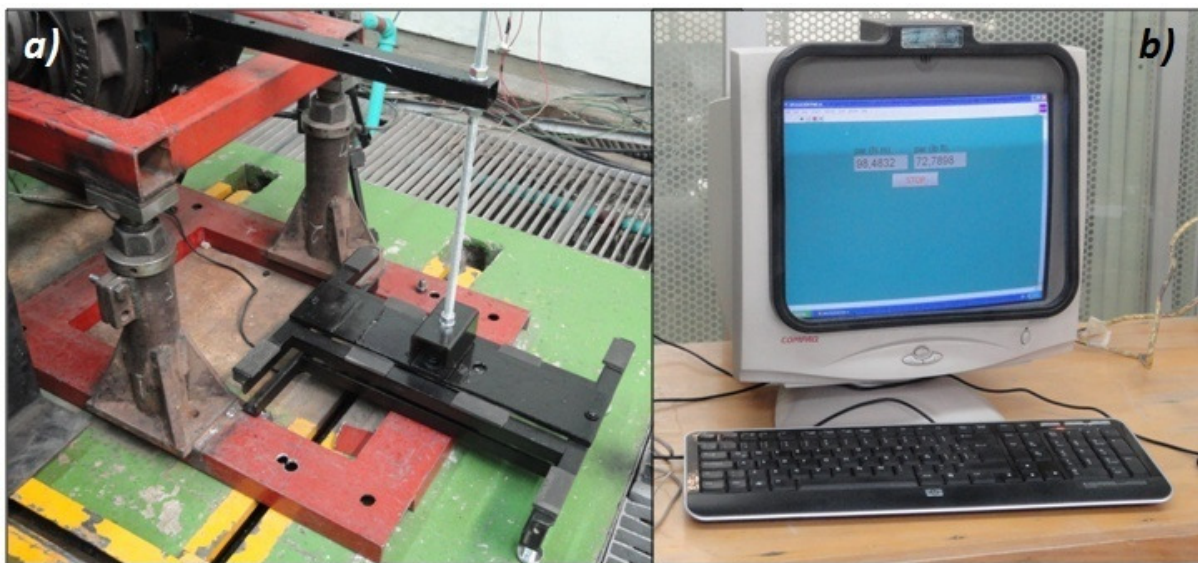


Figura 3.3. *a) Adaptación de la celda de carga, b) Registro de par.*

^{XII} Los dinamómetros de corrientes parásitas son construidos a partir de uno o más discos metálicos que se hacen girar en presencia de un campo magnético. Dicho campo magnético es producido por bobinas con una fuente de poder externa. ^[36]

La aplicación del torque de frenado en el dinamómetro fue mediante un reostato^{XIII} donde éste suministra corriente y genera un campo magnético (figura 3.4) que frena los platos del dinamómetro.



Figura 3.4. Suministro de corriente mediante el reóstato.

La medición de revoluciones en el dinamómetro fue mediante un tacómetro digital, al igual que la celda de carga registra los valores de rpm mediante un programa de computadora (figura 3.5).



Figura 3.5. a) Tacómetro digital, b) Registro de rpm.

^{XIII} Los reostatos son resistencias variables que se introducen en un circuito con el fin de variar la intensidad de corriente. ^[37]

El tacómetro utilizado en el laboratorio tiene las siguientes características:

Especificaciones del tacómetro	
Tacómetro	UNI-T modelo UT372
Medición de distancia	50 mm – 200 mm
Dígitos	5
Transductor tipo	Laser y Fotodiodo ^{XIV}

Una manera de corroborar que el tacómetro digital estuviera trabajando de forma adecuada fue comparándolo con un sensor de rpm el cual es parte del PEMS marca AXION (figura 3.6). Ésto ayudó a calibrar los sensores en caso de existir alguna diferencia en la medición de rpm (figura 3.7).

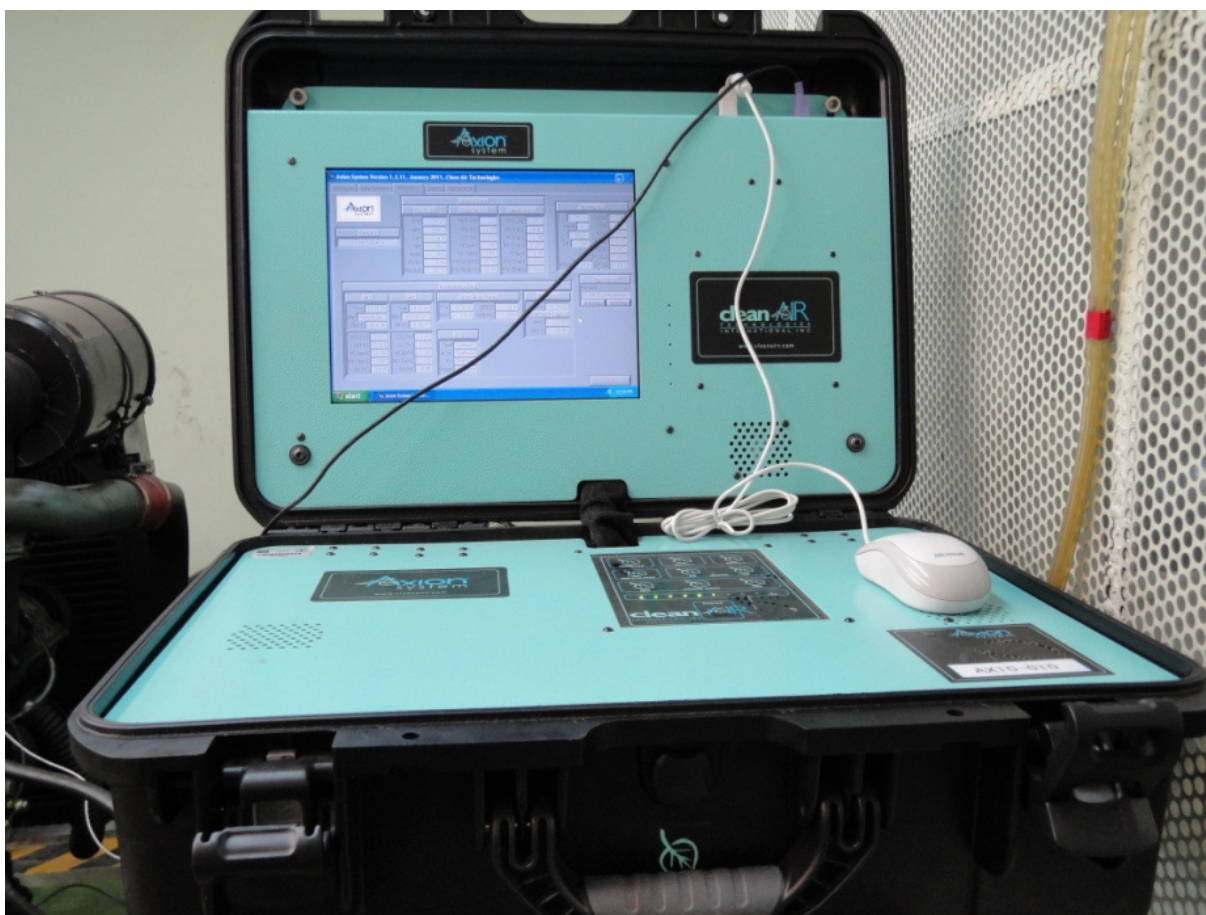


Figura 3.6. PEMS marca AXION.

^{XIV} Un fotodiodo es un dispositivo que recibe una radiación de una determinada energía como entrada y produce una corriente como salida. ^[38]

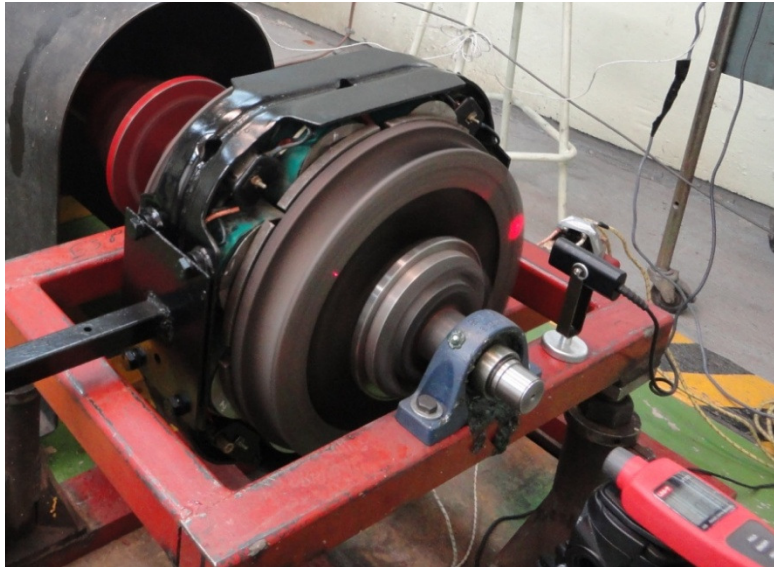


Figura 3.7. Sensor de rpm del AXION y tacómetro digital.

Aunado a lo anterior, el AXION cuenta con sensores de presión, temperatura y sondas de muestreo^{XV}.

La instrumentación de los sensores en el motor fueron los siguientes:

- Sensor de temperatura: Se instaló en el exterior del multiple de admisión para conocer la temperatura de aire hacia la cámara de combustión (figura 3.8a).
- Sensor de presión: Se instaló en la entrada del multiple de admisión para conocer la presión de aire hacia la cámara de combustión (figura 3.8b).

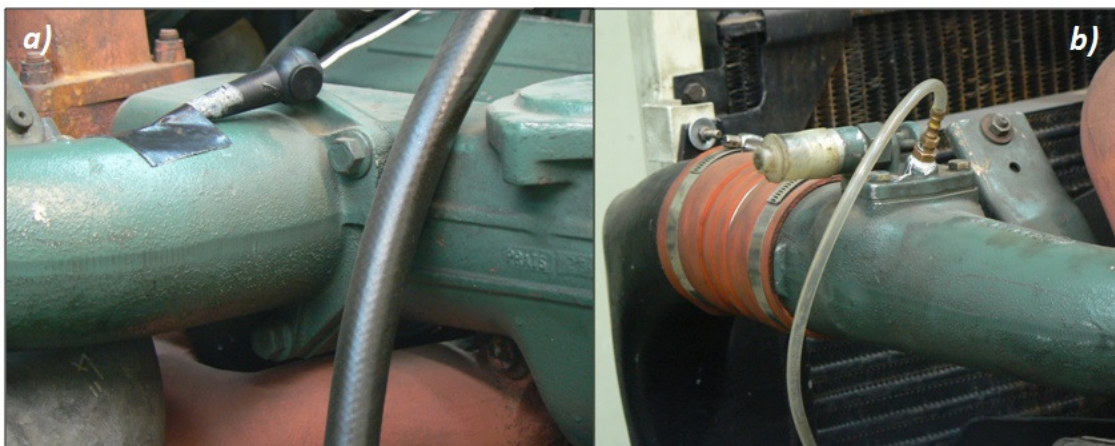


Figura 3.8. a) Sensor de temperatura, b) Sensor de presión.

^{XV} Instrumento con una cavidad para extraer una muestra de gas o de partícula con el fin de analizar.

Los sensores de rpm, presión y temperatura se conectaron a un transductor^{XVI} el cual convertía la información en datos para ser ingresados al AXION (figura 3.9).



Figura 3.9. Transductor del AXION.

En el escape se colocaron dos sondas (figura 3.10), la primera es la encargada de recolectar los gases a los sensores de CO₂, CO, NO_x e hidrocarburos y la segunda sonda lleva la muestra al sensor de material particulado (PM10 y PM2.5).



Figura 3.10. Sondas de muestreo para emisiones y material particulado.

^{XVI} Un transductor es un dispositivo que convierte una señal de un tipo de energía en otra. ^[39]

Para los ensayos se utilizaron las mezclas B5, B10 y B20 donde los números representan los porcentajes en volumen (%Vol.), es decir representa la cantidad de biodiesel que se mezcla con el diesel PEMEX, por ejemplo en una mezcla B5, 5% Vol. es biodiesel y el 95% Vol. es diesel (figura 3.11).

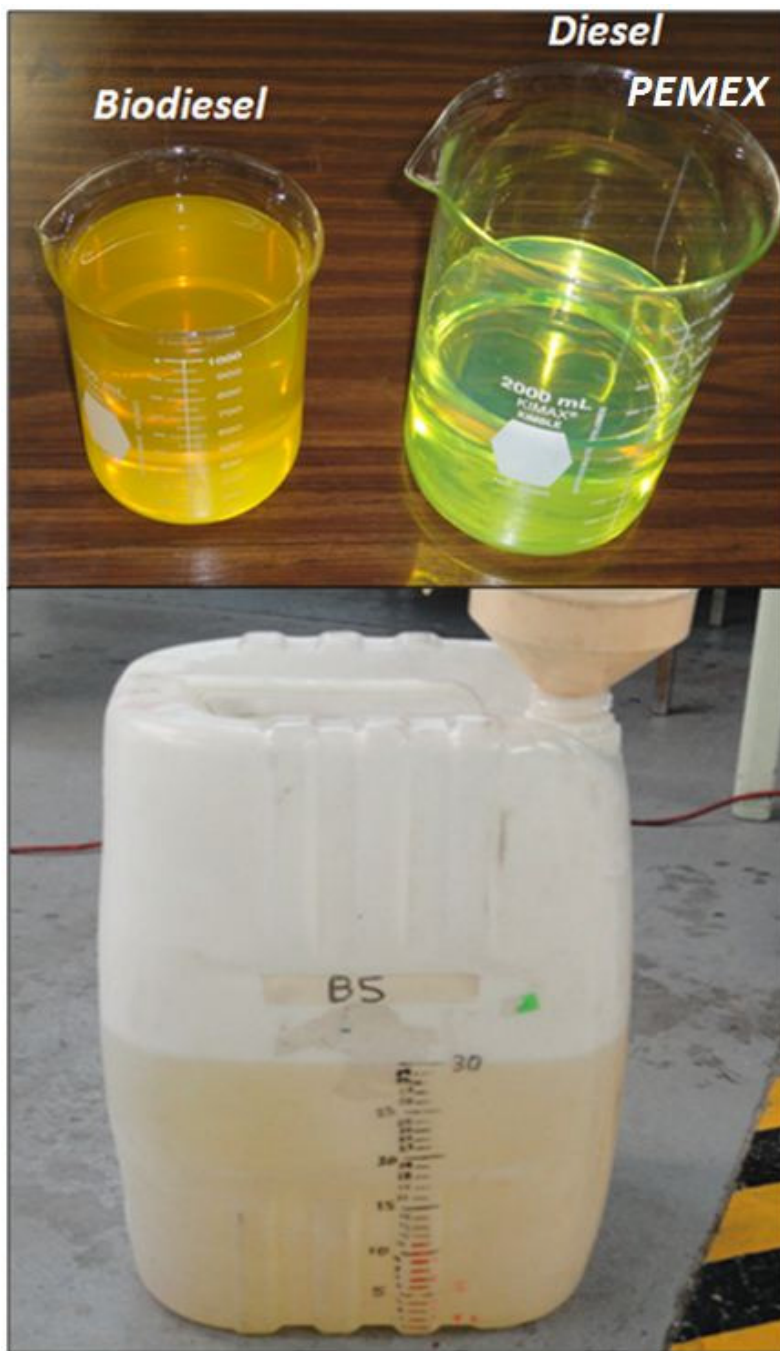


Figura 3.11. Mezcla de biodiesel.

3.2. Medición de gases y partículas

Como se mencionó en el apartado 3.1 para la medición de emisiones se utilizó un PEMS marca AXION el cual consiste dos tipos de sensores para gases y un sistema de medición de partículas, sin embargo el fabricante no especifica el método de muestreo de emisiones, por lo que a continuación se describen los métodos convencionales.

- a) Para HC, CO₂ y CO se utilizan sensores del tipo infrarrojo no dispersivo NDIR (Non Dispersive Infrared, figura 3.21) los cuales aprovechan la propiedad de varios gases de absorber la radiación infrarroja y con esto modifica la longitud de onda del haz de luz para compararla con un gas de referencia (nitrógeno regularmente).

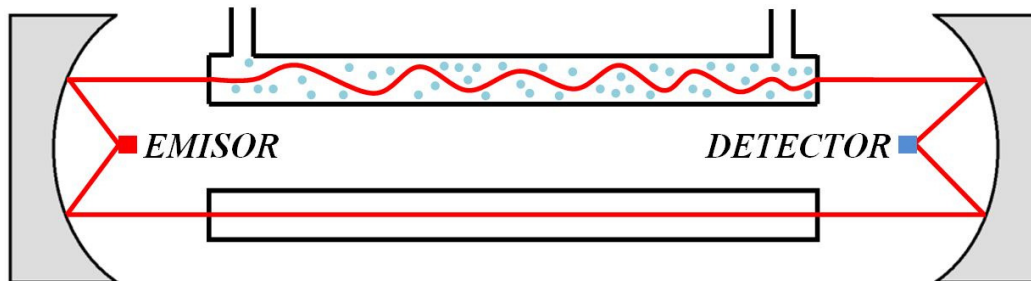
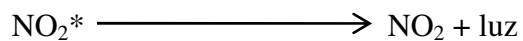
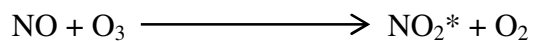


Figura 3.21. Sensor tipo infrarrojo no dispersivo NDIR.

- b) Para medir las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) se utiliza la quimioluminiscencia. La quimioluminiscencia es la cantidad de luz emitida a causa de una reacción química. Esto se realiza dentro de una cámara de reacción donde se introduce ozono (O₃) y NO, liberando dióxido de nitrógeno en estado excitado (NO₂^{*}) y oxígeno libre.



Esta reacción del NO_2^* libera radiación en forma de luz que es proporcional a la concentración de NO , esto es detectado por un filtro óptico y se convierte en una señal eléctrica mediante un tubo fotomultiplicador (figura 3.22).

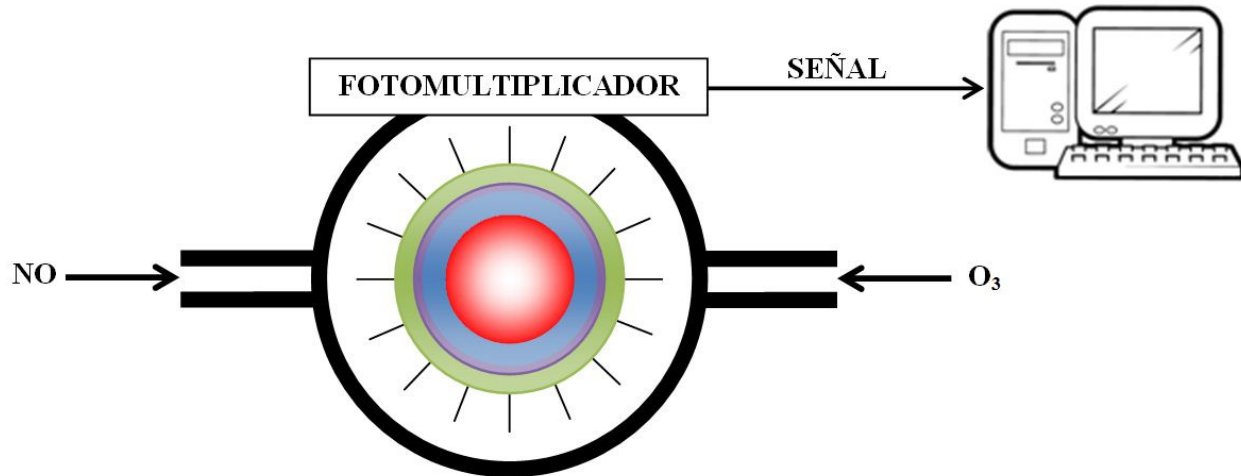


Figura 3.22. Imagen del efecto de la quimioluminiscencia y de cómo es detectada.

- c) La medición de material particulado (PM) se realiza mediante un sistema de dispersión de un haz de luz. El sistema consiste de una bomba de vacío de bajo caudal que induce el aire con material particulado a través de discos impactadores que filtran las partículas de acuerdo al tamaño (PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$) hasta llegar a un sensor óptico donde se cuantifica la concentración de partículas en mg/cm^3 .

La configuración general del PEMS se muestra en la figura 3.23.

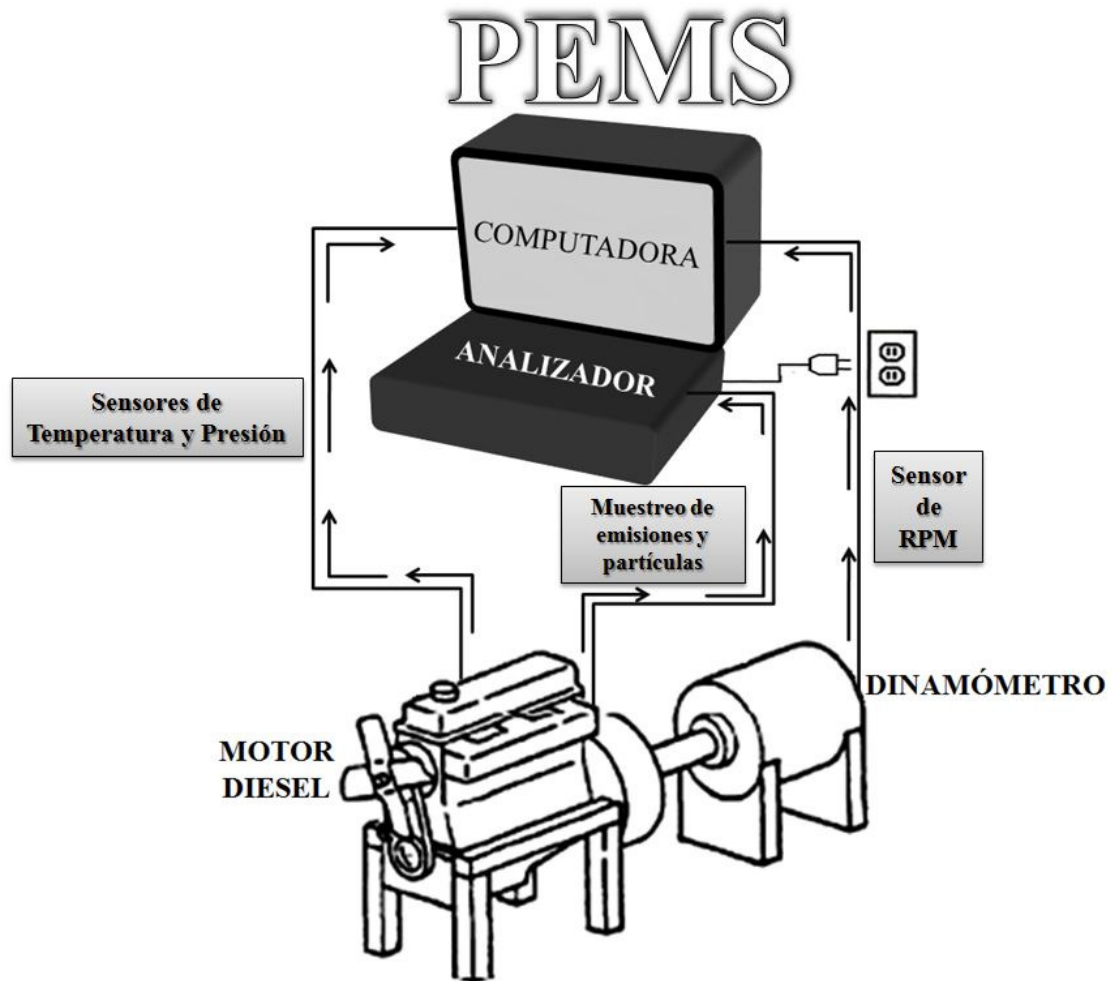


Figura 3.23. *Configuración general del PEMS.*

El AXION calcula el flujo de las emisiones mediante propiedades del combustible y parámetros del motor: número de cilindros, desplazamiento y $\text{torque}_{\text{max}} @ \text{rpm}$. Esta técnica ha sido patentada y validada con éxito por las comparaciones de pruebas repetidas en laboratorio (Technology, 2009).

3.3. Protocolo experimental

Para este protocolo de prueba se definen las condiciones de operación del motor, tomando la cantidad de puntos de operación más representativos (torque@rpm), y la implementación de las pruebas en estado estable. De esta manera se colecta una cantidad suficiente de información de gases para su análisis.

El protocolo experimental se muestra en el siguiente diagrama de flujo (diagrama 3.1):

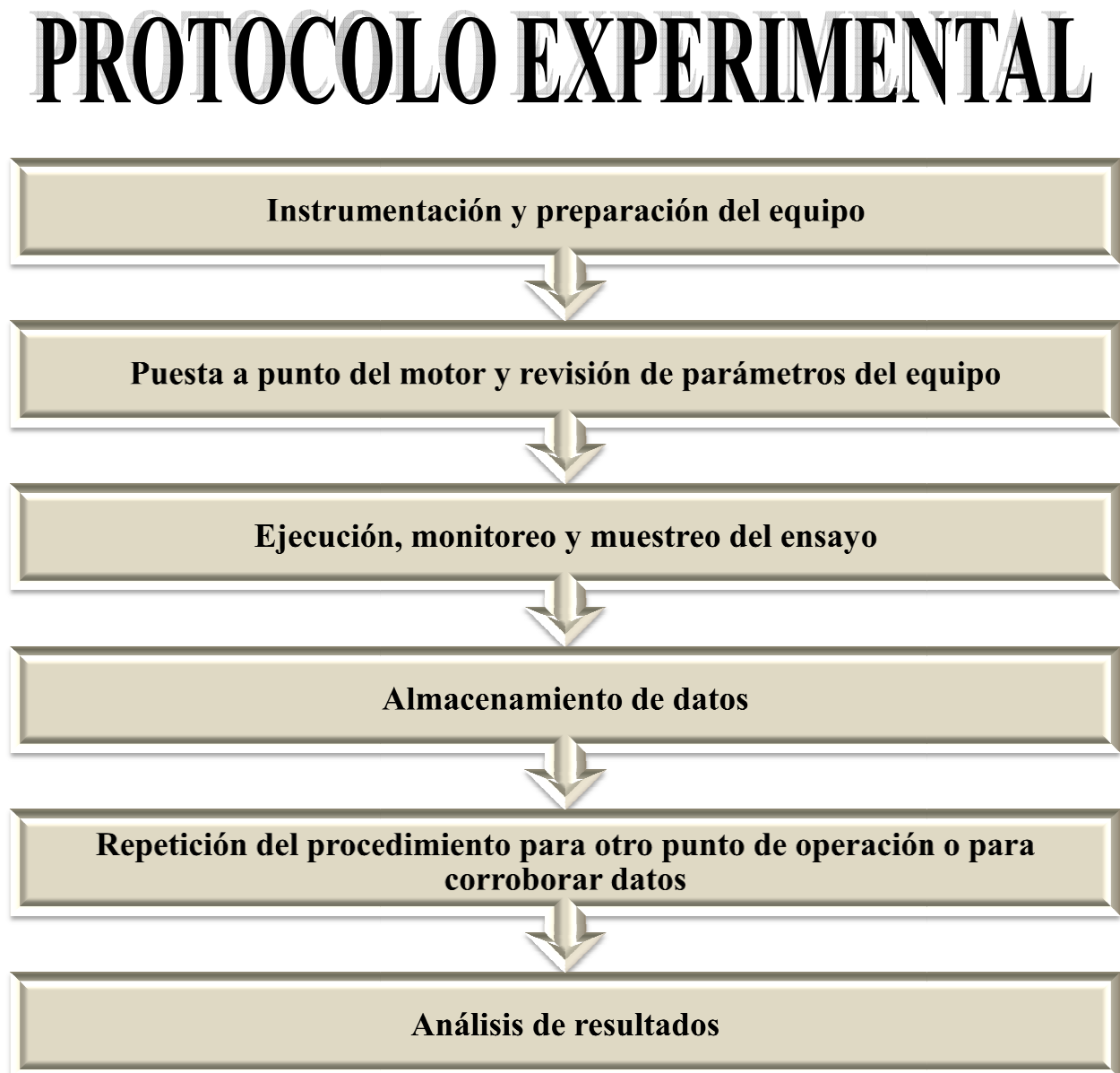


Diagrama 3.1. *Protocolo Experimental.*

a) Instrumentación y preparación del equipo

Se energizó el equipo de medición y muestreo: analizador de gases, tacómetro, celda de carga y computadoras. Estos equipos se ajustaron con la mayor exactitud posible y se verificó que las magnitudes a medir fueran correctas.

La instrumentación y preparación de los equipos fue la siguiente: la conexión de los sensores y sondas del analizador para este caso un PEMS (AXION) se instrumentó en la parte posterior (figura 3.12a) y se inició energizando la computadora, los bancos de gases, líneas de muestreo, ventiladores y GPS (Global Positioning System) durante 20 minutos aproximadamente para la sincronización de los sensores con la computadora (figura 3.12b).



Figura 3.12. a) Conexiones de sensores y sondas, b) Botones de encendido.

La celda de carga se niveló a la superficie donde ésta se encontraba, se calibró de acuerdo a las indicaciones del dispositivo y se sincronizó con la interfaz de la computadora para el registro de torque. El tacómetro óptico estuvo alineado y perpendicular a la superficie de los platos del dinamómetro, donde se colocó una cinta reflejante para la medición de las rpm y al igual que la celda de carga se sincronizó con la interfaz de la computadora.

El sistema de ventilación (ventilador 1 y ventilador 2, figura 3.15a) se encendió desde el panel de control de la consola de mando (figura 3.16), el extractor se accionó mediante un switch ubicado afuera de la sala del dinamómetro de banco y un tercer ventilador que se utilizó para reducir la temperatura de los gases en el escape (figura 3.15b).

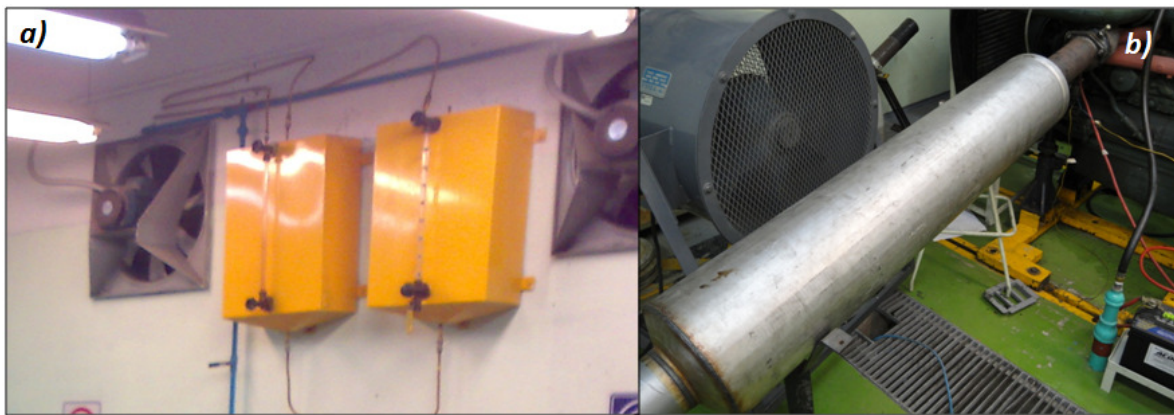


Figura 3.15. a) Ventiladores de la sala de ensayos, b) Ventilador para el enfriamiento de emisiones.



Figura 3.16. a) Consola de mando, b) Panel de control.

b) Puesta a punto del motor y revisión de parámetros del equipo

Para llevar a cabo la prueba se revisaron las condiciones mecánicas del motor *check-list*. Básicamente fue la revisión de las partes principales del motor como son: bandas, aceite, combustible, filtros de aire, radiador, compresor, etc. Esto se realizó antes y durante el primer encendido del motor durante 10 ± 1 min con la finalidad de que el motor operara en sus condiciones estabilizadas, y simultáneamente se verificaron los parámetros de medición (PEMS, tacómetro y celda de carga, figura 3.17).

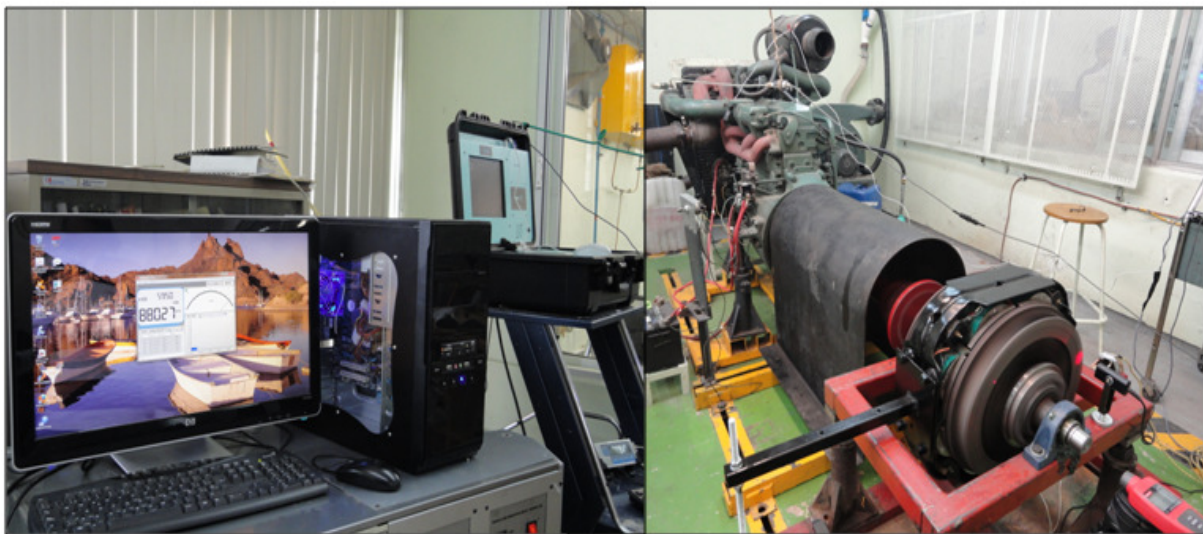


Figura 3.17. Revisión de operación del motor, tacómetro, AXION y celda de carga.

Antes de iniciar la prueba, se cercioró de tener el combustible correspondiente (figura 3.18), si el motor contiene en el depósito un combustible diferente al del ensayo, éste se purga dependiendo el tipo de motor.

El motor de estos ensayos tiene una bomba mecánica, con la cual se puede extraer el combustible no deseado y el resto en los inyectores es “quemado” en el motor mientras se homogeniza con el combustible nuevo.



Figura 3.18. Combustible correspondiente a la prueba.

c) Ejecución, monitoreo y muestreo del ensayo seleccionado

Identificado el torque y rpm de la prueba se suministró la carga en el dinamómetro para simular los puntos de operación seleccionados.

En estos ensayos se aplicó el voltaje con el reóstato al dinamómetro de corrientes parásitas y a su vez se aceleró el motor hasta llegar a los parámetros seleccionados que se monitorearon con el equipo, para corroborar que hayan sido constantes con una tolerancia de ± 5 unidades de torque y rpm (figura 3.19). El muestreo del AXION se inició con las “bolsas de datos” (figura 3.20).

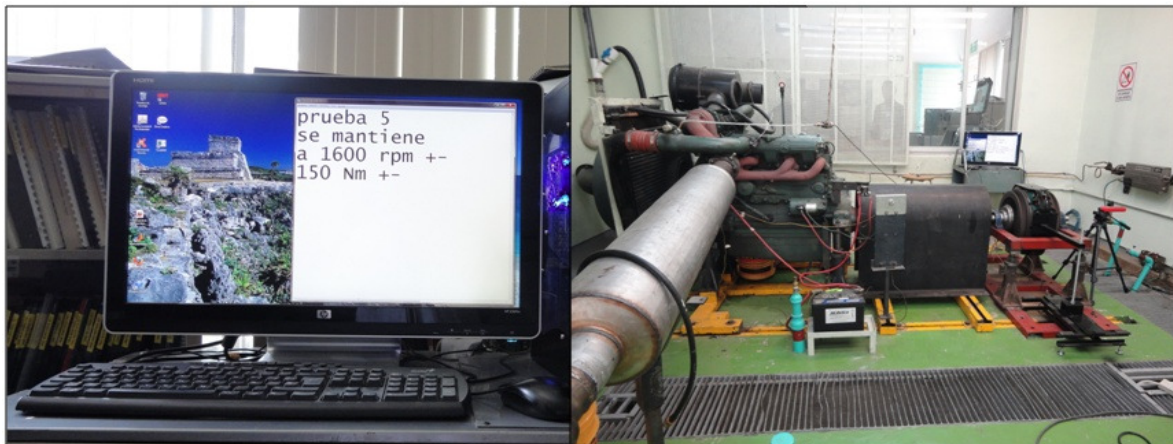


Figura 3.19. Ejecución de ensayo.

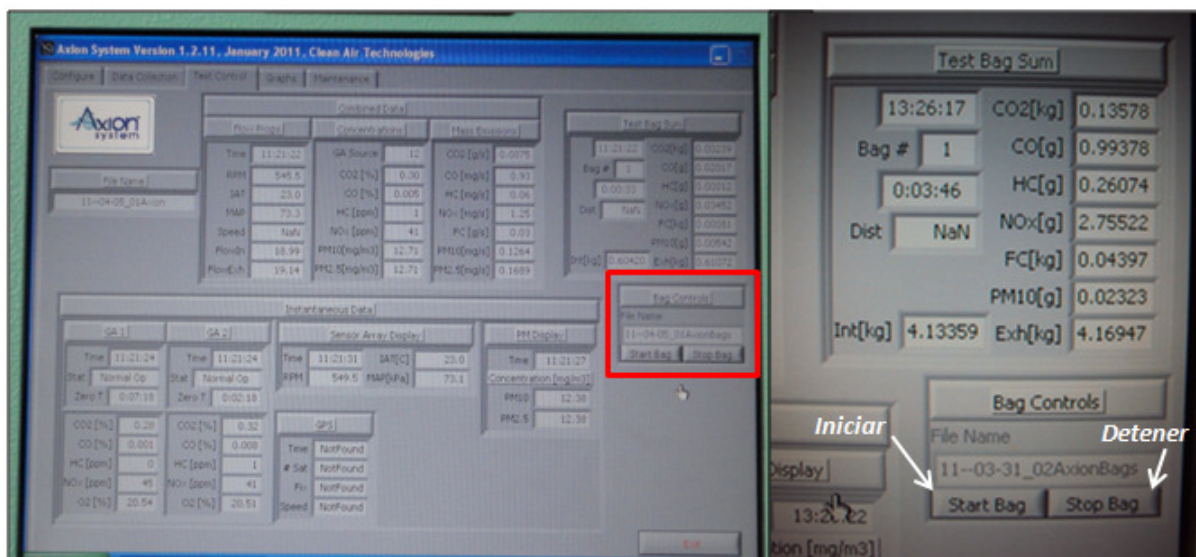


Figura 3.20. Inicio del muestreo.

El tiempo de ejecución del ensayo fue de 600 ± 60 segundos durante el cual se realizó el muestreo con el equipo y automáticamente recopiló la información.

d) Almacenamiento de datos

Finalizado el tiempo de ensayo se interrumpió la medición de datos, una vez detenido el muestreo se guardaron los datos obtenidos durante la prueba en archivos (extensión definida por el equipo por ejemplo *.txt, *.xls, etc.) que se almacenaron en la memoria de la computadora con un nombre que identificó el tipo de combustible, número de prueba y fecha de realización.

Mientras se realizó el almacenamiento de datos, el motor siguió operando en ralentí para tratar de mantener las condiciones estables de operación.

El almacenamiento de datos en el AXION se realizó mediante la interrupción de las *bolsas de datos* y guardados en archivos con una extensión *.txt.

e) Repetición del procedimiento para otro punto de operación o para corroborar datos

Se verificó que el combustible fuera suficiente y que el equipo fuese nuevamente calibrado para repetir las mismas características en el ensayo siguiente.

Para los puntos de operación restantes del mismo combustible se repitió el procedimiento *Ejecución, monitoreo y muestreo del ensayo seleccionado* y *Almacenamiento de datos* hasta cubrir cada uno de los puntos de operación del motor.

En el caso particular de estos ensayos se repitió el procedimiento de prueba para cada uno de los puntos de operación garantizando la tolerancia de operación de torque y rpm para evitar la repetición del ensayo, no obstante la repetición del ensayo da una mayor certeza a los resultados.

f) Análisis de resultados

Si bien este punto entra en la metodología del protocolo, se consideró en otros apartados para un mejor desarrollo. Estos apartados son la sistematización de los resultados (3.4), que es la manera en como se presentan los datos y el análisis de resultados (capítulo 4) donde se muestran los modelos matemáticos, cálculos y resultados de acuerdo a las variables (torque, rpm y emisiones).

3.4. Sistematización de resultados

La sistematización de los resultados simplifica la información que nos proporcionan los datos experimentales, en este caso mediante gráficas de barras para la comparación y análisis de emisiones contaminantes por cada uno de los combustibles empleados en los ensayos, de tal manera que se pueda determinar tentativamente qué combustible puede ser una mejor opción para disminuir las emisiones contaminantes.

Para esta comparación primero se añaden los puntos de operación de los ensayos a la gráfica 3.1 con el objetivo de identificar la aproximación a los puntos de operación propuestos, donde se buscó que incidieran los cinco combustibles. Identificados los puntos se realizó la discriminación de datos y la determinación de los factores de ponderación:

- **Discriminación de datos:** Los datos se discriminaron, ya que existieron errores de medición causados por la sensibilidad de los equipos y el modo de operación, se tomaron 60 segundos de muestra estables en cada prueba y se obtuvo el promedio de éstos.
- **Factores de ponderación:** Con base en los puntos de operación más coincidentes para los cinco combustibles, se establecieron factores de ponderación para determinar el equilibrio de operación del motor (estos factores son constantes y corrigen los valores de emisiones contaminantes). Para esto, se trazaron áreas del mismo tamaño en una gráfica torque vs rpm, localizando los puntos de operación de los cinco combustibles y los de referencia, se cuantificaron y determinaron el total de puntos en cada área trazada. Posteriormente se sumaron todos los puntos localizados y se obtuvo el cociente de cada área entre el total de puntos, el valor obtenido se encontró entre [0-1] y éste es el factor de ponderación.

Realizados los pasos anteriores se sumaron todos los puntos de cada combustible para graficarlos. La figura 3.24 es un ejemplo donde se mostrará la comparación de los niveles contaminantes por cada combustible.

Emisiones Contaminantes

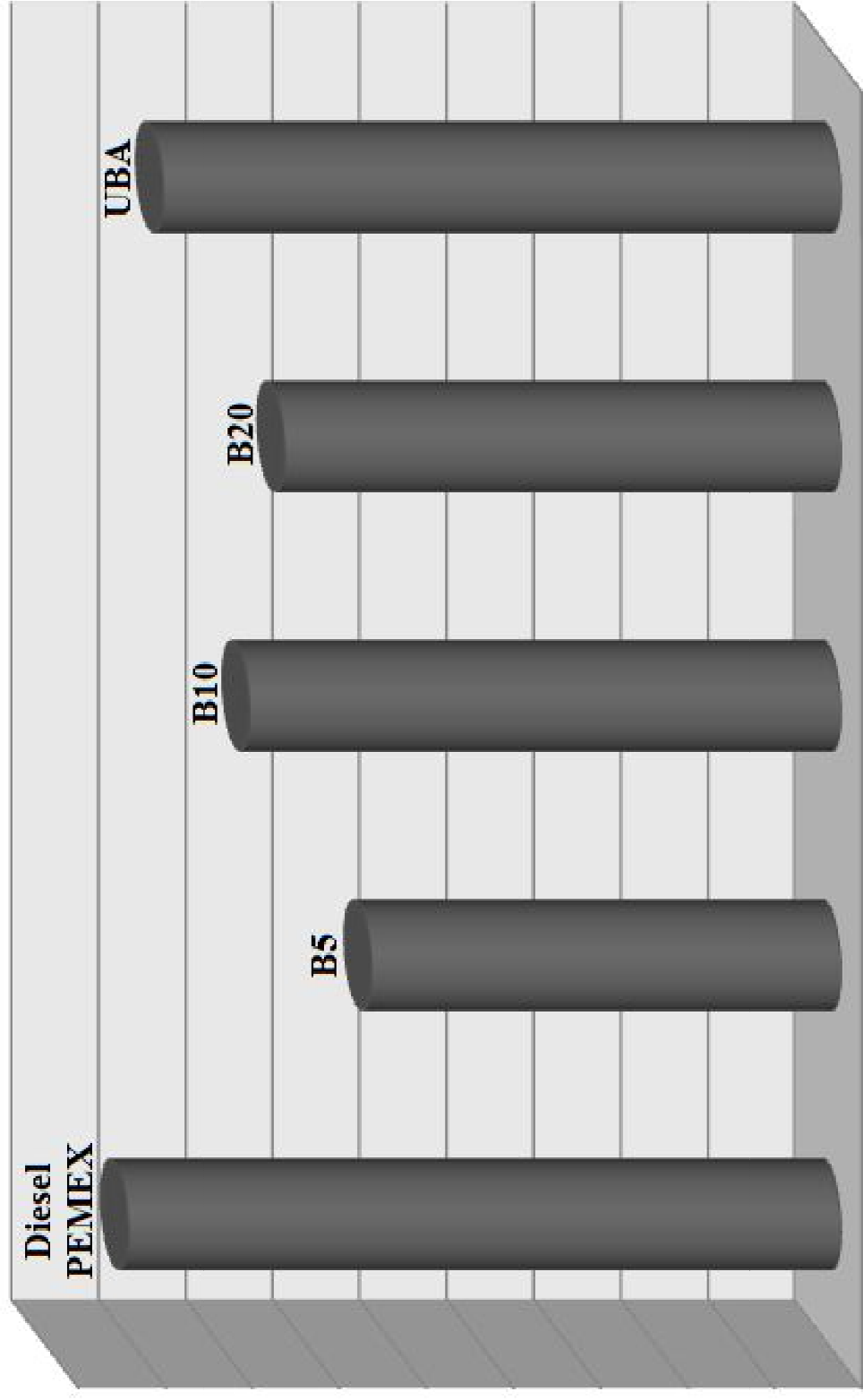


Figura 3.24. Gráfica de barras para la comparación de emisiones contaminantes.

CAPÍTULO 4

Análisis de resultados

Como se estableció en el protocolo de ensayos la duración de cada prueba fue de 10 minutos donde se midió: CO₂ [g/s], CO [mg/s], HC [mg/s], NO_x [mg/s], PM10 [mg/s] y PM2.5 [mg/s].

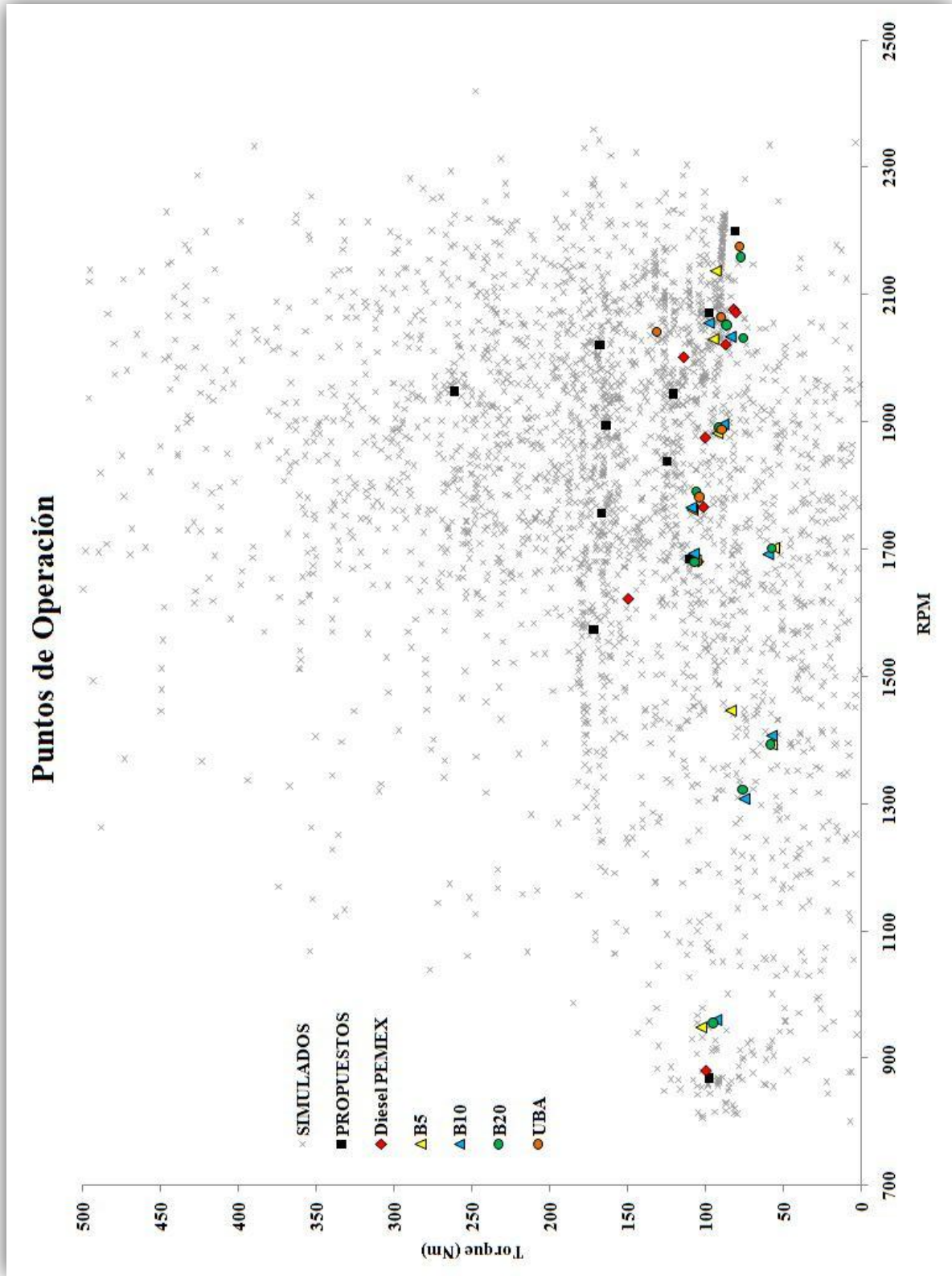
Cabe señalar que al realizar las pruebas no todos los puntos de operación con los que se trabajaron coincidieron con los propuestos (tabla 4.1 y gráfica 4.1), anteriormente mencionados tabla 3.1, por esta razón sólo se consideraron tres puntos de operación donde concordaron los valores de los cinco combustibles (tabla 4.2).

Prueba	Torque (Nm)	RPM
1	98	869
2	110	1684
3	125	1838
4	121	1944
5	98	2072
6	81	2200
7	172	1573
8	167	1756
9	164	1894
10	168	2021
11	261	1948

Tabla 3.1. *Puntos de operación propuestos.*

Diesel PEMEX		B5		B10		B20		UBA	
Torque (Nm)	RPM	Torque (Nm)	RPM	Torque (Nm)	RPM	Torque (Nm)	RPM	Torque (Nm)	RPM
100	880	103	948	93	960	96	956	104	1781
150	1621	58	1393	75	1308	76	1322	90	1888
105	1680	84	1446	58	1407	59	1393	132	2041
102	1766	106	1683	108	1693	107	1679	90	2064
101	1875	56	1702	60	1692	58	1701	79	2176
114	2002	108	1761	109	1765	106	1791	----	----
88	2021	92	1882	89	1896	92	1890	----	----
82	2077	95	2029	84	2034	76	2032	----	----
81	2072	94	2137	98	2055	87	2052	----	----
----	----	----	----	----	----	77	2159	----	----

Tabla 4.1. *Puntos de operación realizados.*

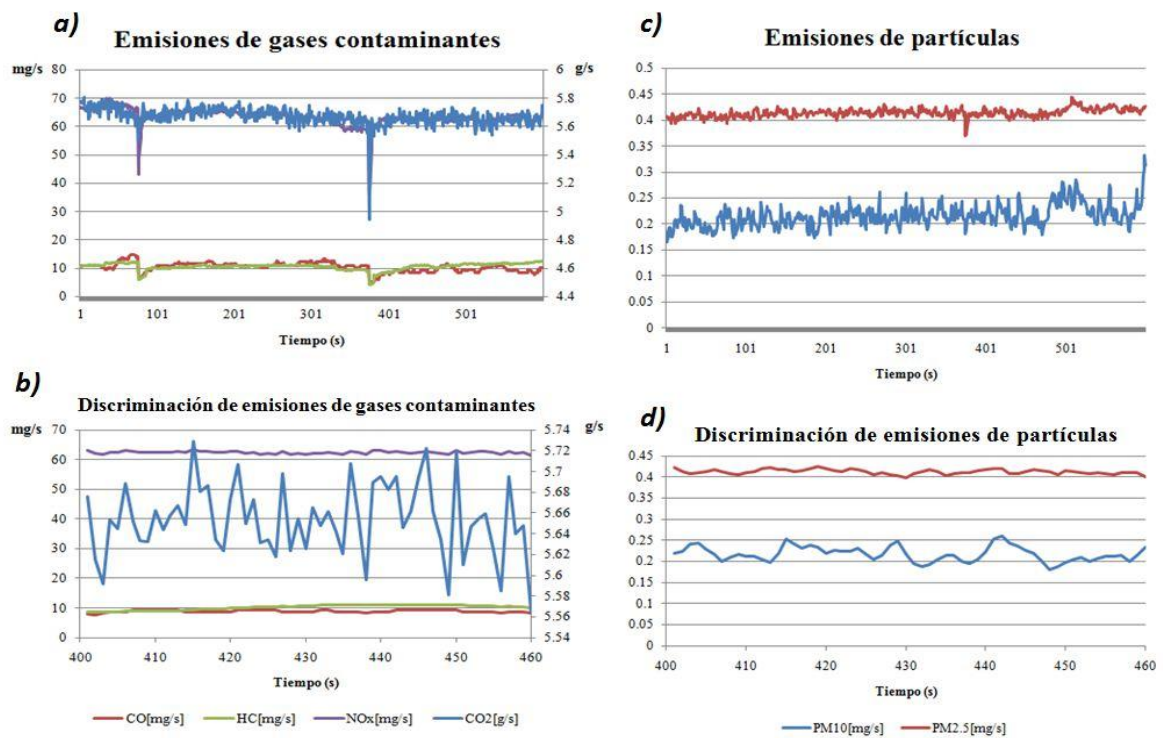


Gráfica 4.1. Puntos de operación de los ensayos.

ÁREA	COMBUSTIBLE	Torque (Nm)	RPM
1	Diesel PEMEX	101	1875
	B5	92	1882
	B10	89	1896
	B20	92	1890
	UBA	90	1888
2	Diesel PEMEX	102	1766
	B5	108	1761
	B10	109	1765
	B20	106	1791
	UBA	104	1781
3	Diesel PEMEX	88	2021
	B5	95	2029
	B10	98	2055
	B20	87	2052
	UBA	90	2064

Tabla 4.2. Puntos de operación concordantes.

Identificados los puntos mostrados en la tabla 4.2, se realizó la discriminación y el promedio de estos datos. A continuación se muestra el ejemplo para gases criterio (CO₂, CO, HC y NO_x) y material particulado del combustible UBA en el punto 90[Nm] @ 2064[rpm] (gráficas 4.2, tabla 4.3), este procedimiento se realizó con los demás puntos de operación de cada combustible.



Gráficas 4.2. *Discriminación de emisiones contaminantes.*

COMBUSTIBLE	Torque (Nm)	RPM	CO ₂ [g/s]	CO [mg/s]	HC [mg/s]	NO _x [mg/s]	PM10 [mg/s]	PM2.5 [mg/s]
UBA	90	1888	4.79	10.09	8.97	56.99	0.17	0.35

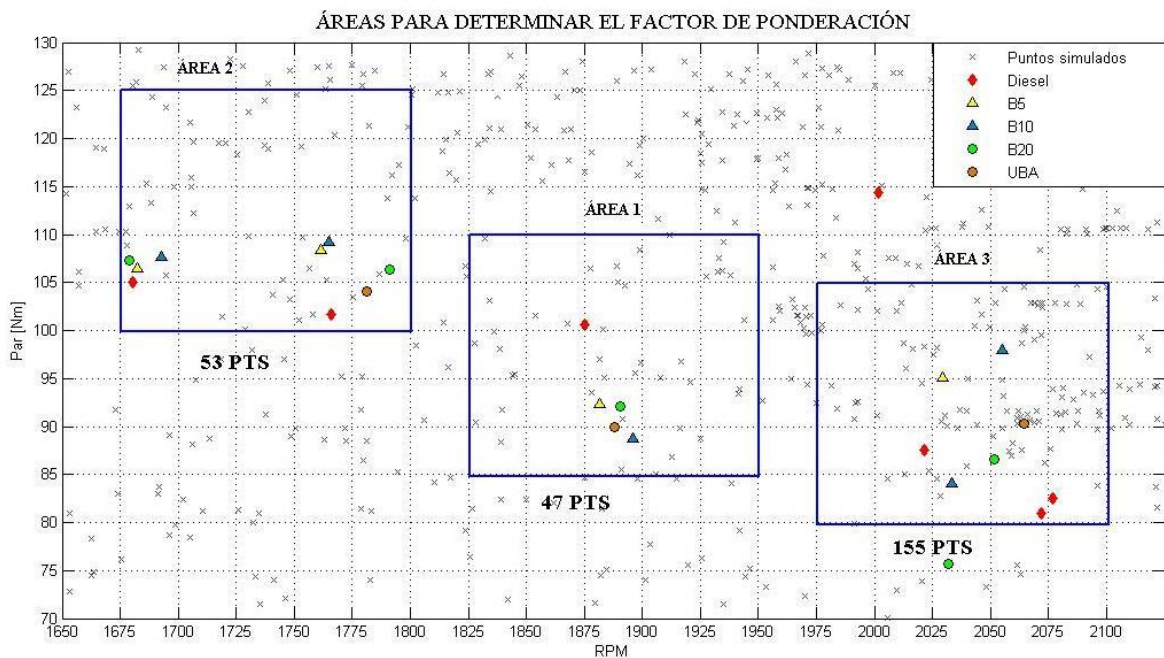
Tabla 4.3. *Datos discriminados y promediados de un punto particular de operación.*

Como resultado del filtrado y promedio para los demás puntos de cada combustible se tiene la siguiente matriz (tabla 4.4).

ÁREA	COMBUSTIBLE	Torque (Nm)	RPM	CO ₂ [g/s]	CO [mg/s]	HC [mg/s]	NO _x [mg/s]	PM10 [mg/s]	PM2.5 [mg/s]
1	Diesel PEMEX	101	1875	4.97	9.94	6.84	67.08	0.15	0.34
1	B5	92	1882	3.55	6.41	7.22	51.87	0.24	0.24
1	B10	89	1896	5.06	8.49	8.79	65.45	0.20	0.39
1	B20	92	1890	4.82	7.21	8.85	64.60	0.23	0.23
1	UBA	90	1888	4.79	10.09	8.97	56.99	0.17	0.35
2	Diesel PEMEX	102	1766	4.57	4.98	6.12	68.79	0.12	0.31
2	B5	108	1761	3.11	10.39	6.03	46.42	0.07	0.07
2	B10	109	1765	4.89	9.13	7.80	68.86	0.28	0.45
2	B20	106	1791	4.77	8.72	8.02	68.98	0.28	0.37
2	UBA	104	1781	4.78	10.60	8.26	64.07	0.28	0.38
3	Diesel PEMEX	88	2021	5.62	11.16	8.16	72.40	0.24	0.41
3	B5	95	2029	4.60	6.29	5.98	53.73	0.27	0.27
3	B10	98	2055	6.08	6.97	10.06	74.85	0.32	0.50
3	B20	87	2052	4.41	7.49	8.61	51.93	0.24	0.24
3	UBA	90	2064	5.65	8.86	10.24	62.45	0.22	0.41

Tabla 4.4. Datos filtrados y promediados de los puntos de operación seleccionados por cada combustible.

Para determinar los factores de ponderación, con ayuda del software “Matlab”, se trazaron áreas del mismo tamaño de acuerdo a los puntos de la tabla 4.2 delimitando una cierta cantidad de puntos (gráfica 4.3).



Gráfica 4.3. Áreas de los puntos de operación concordantes.

Contados los puntos de las áreas trazadas, se dividieron entre el total de puntos y dio como resultado los siguientes valores de ponderación:

$$FP_i = \frac{N_i}{PT}$$

Donde:

FP: Factor de ponderación.

i: Número de área.

N: Número de puntos del área

PT: Puntos totales de las áreas

$$FP_1 = \frac{N_1}{PT} = \frac{47}{255} \approx 0.18, \quad FP_2 = \frac{N_2}{PT} = \frac{53}{255} \approx 0.21, \quad FP_3 = \frac{N_3}{PT} = \frac{155}{255} \approx 0.61$$

La suma de los factores de ponderación es igual a 1 ya que es la representación general del comportamiento del motor.

Teniendo los valores de emisiones filtrados y promediados, así como los factores de ponderación se efectuó la ponderación de estos valores y se sumaron, resultando la siguientes matrices para gases contaminantes y material particulado (tabla 4.5).

ÁREAS	COMBUSTIBLE	FACTOR DE PONDERACIÓN	CO ₂ [g/s]	CO [mg/s]	HC [mg/s]	NO _x [mg/s]	PM10 [mg/s]	PM2.5 [mg/s]
1	Diesel PEMEX	0.18	0.90	1.79	1.23	12.07	0.03	0.06
2	Diesel PEMEX	0.21	0.96	1.05	1.28	14.45	0.03	0.07
3	Diesel PEMEX	0.61	3.43	6.81	4.98	44.17	0.14	0.25
Emisiones Totales:			5.28	9.64	7.49	70.69	0.20	0.38
1	B5	0.18	0.64	1.15	1.30	9.34	0.04	0.04
2	B5	0.21	0.65	2.18	1.27	9.75	0.01	0.01
3	B5	0.61	2.81	3.83	3.65	32.77	0.17	0.17
Emisiones Totales:			4.10	7.17	6.22	51.86	0.22	0.22
1	B10	0.18	0.91	1.53	1.58	11.78	0.04	0.07
2	B10	0.21	1.03	1.92	1.64	14.46	0.06	0.09
3	B10	0.61	3.71	4.25	6.14	45.66	0.19	0.31
Emisiones Totales:			5.65	7.70	9.36	71.90	0.29	0.47
1	B20	0.18	0.87	1.30	1.59	11.63	0.04	0.04
2	B20	0.21	1.00	1.83	1.69	14.49	0.06	0.08
3	B20	0.61	2.69	4.57	5.25	31.68	0.15	0.15
Emisiones Totales:			4.56	7.70	8.53	57.79	0.25	0.27
1	UBA	0.18	0.86	1.82	1.62	10.26	0.03	0.06
2	UBA	0.21	1.00	2.23	1.74	13.45	0.06	0.08
3	UBA	0.61	3.45	5.40	6.24	38.09	0.13	0.25
Emisiones Totales:			5.31	9.45	9.60	61.81	0.22	0.39

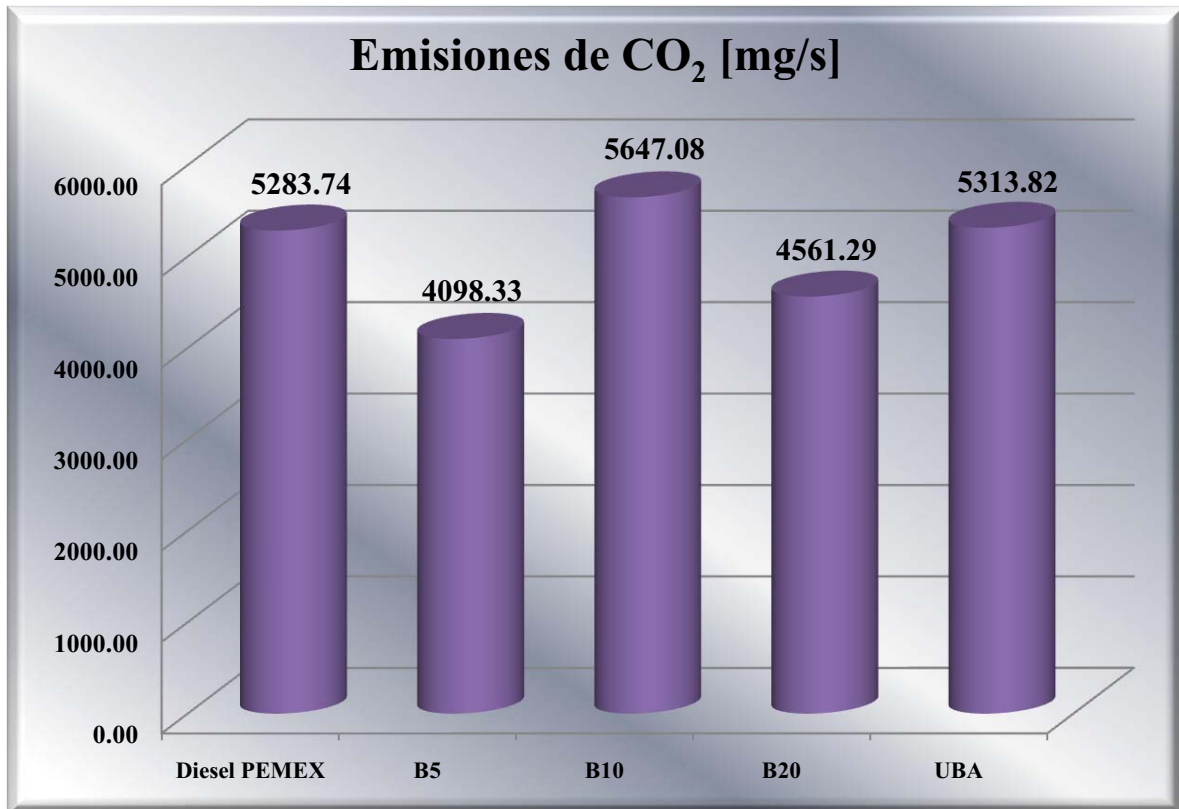
Tabla 4.5. *Datos ponderados y emisiones totales.*

Para poder observar de una mejor manera los resultados de emisiones contaminantes mostrados en la tabla anterior, se comparan los niveles de flujo másico de emisiones por cada combustible.

➤ Emisiones de CO₂

Los valores de CO₂ en [mg/s] se muestran en la gráfica 4.4. Donde se aprecia que el combustible con menor emisión de este contaminante es el B5. El diesel PEMEX y el UBA emiten cantidades similares pero no fueron los valores más altos, el combustible que más CO₂ emanó fue el B10.

En otras investigaciones publicadas (González-Oropeza R, Samuel S, SAE International 2010 ^[41]) se menciona que al aumentar el porcentaje de biodiesel en la mezcla se incrementan los niveles de CO₂, sin embargo en nuestros resultados no se muestra un patrón al aumentar la cantidad de biodiesel en la mezcla.

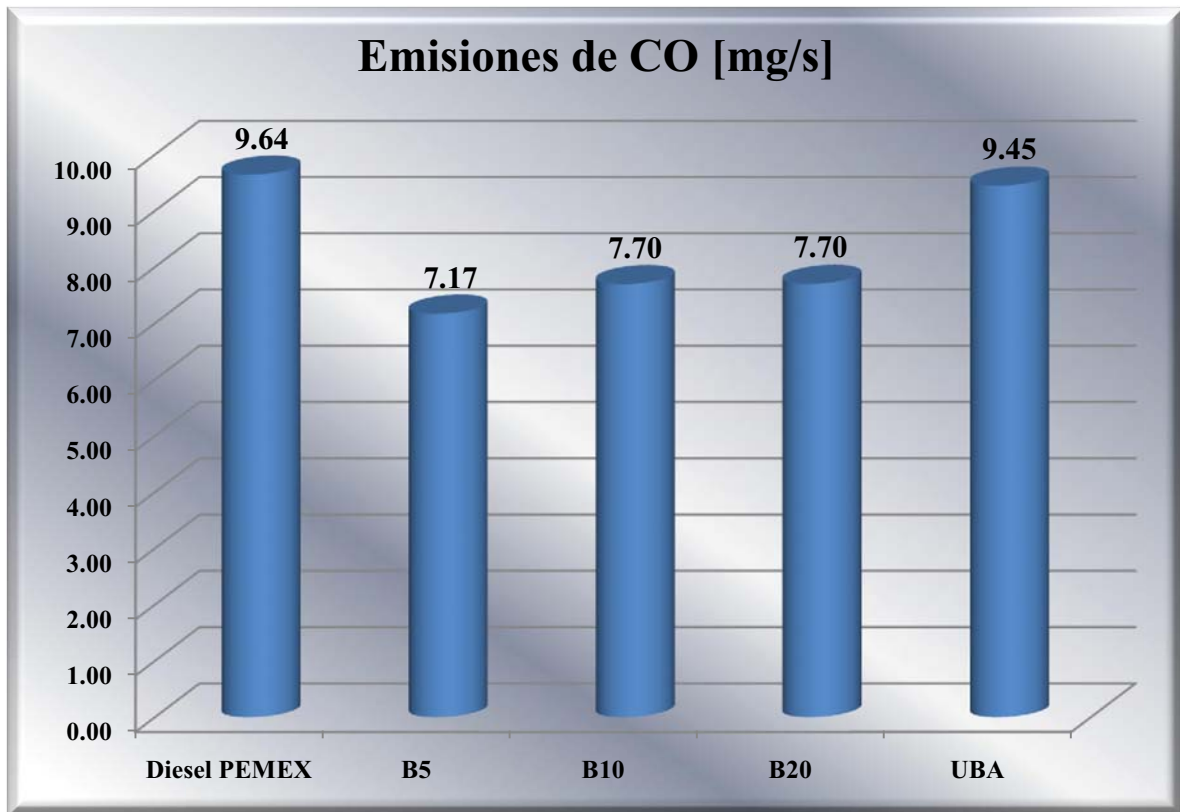


Gráfica 4.4. *Emisiones de CO₂ por combustible.*

➤ Emisiones de CO

El CO en [mg/s] bajo las mismas condiciones de operación se observa que los niveles más bajos de emisión los presenta el B5, no obstante el B10 y B20 tienen valores aproximados a éste. Los combustibles que presentan los niveles más altos de CO son el diesel PEMEX y el UBA (gráfica 4.5).

La literatura ^{[41][42]} muestra que al aumentar la mezcla de biodiesel el CO tiende a disminuir, mientras que los resultados obtenidos tendieron a aumentar.

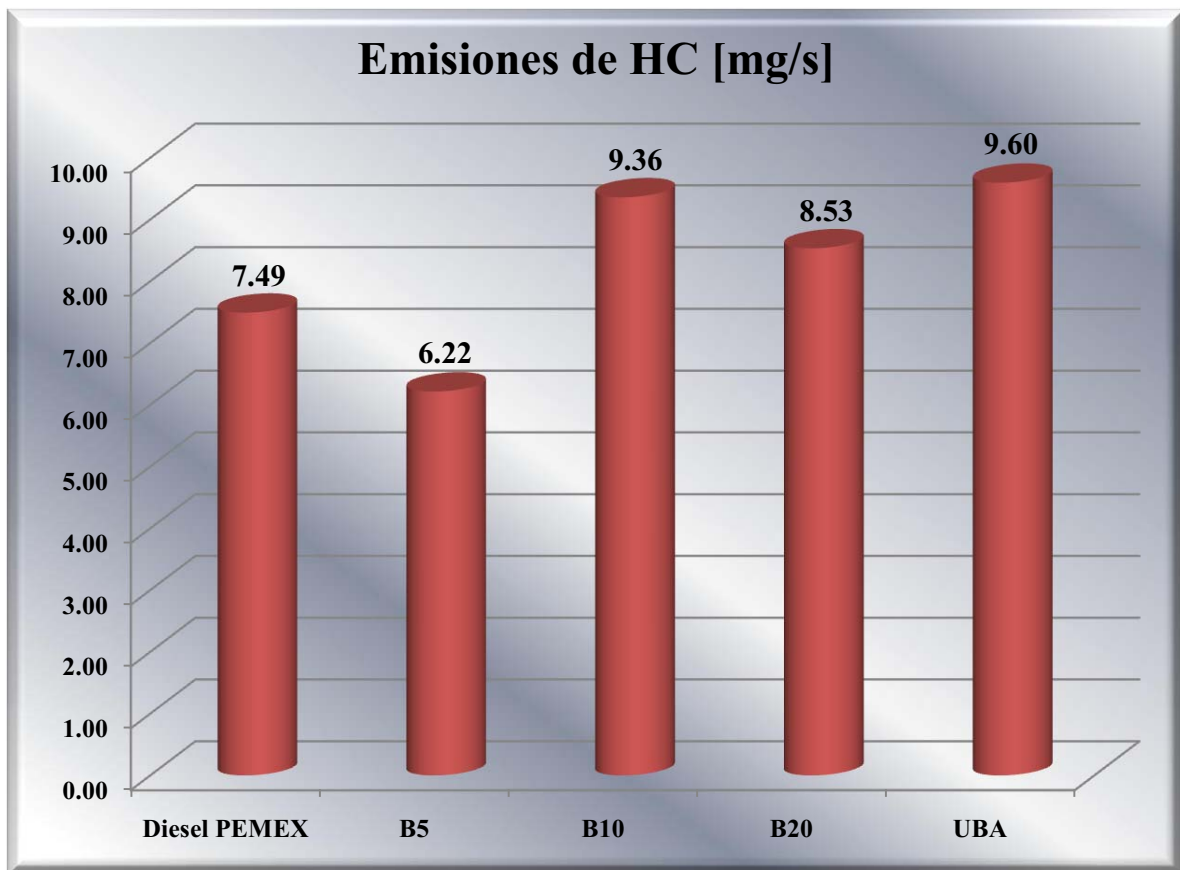


Gráfica 4.5. *Emisiones de CO por combustible.*

➤ Emisiones de HC

Los valores de HC en [mg/s] se observan en la gráfica 4.6. Se visualiza que la mezcla más baja de biodiesel es la que presenta los menores niveles de HC, mientras que el UBA presenta los valores más elevados, y no existe una tendencia de emisión conforme aumenta la mezcla.

La disminución de HC del B5 respecto al diesel PEMEX coincide con los resultados de la EPA ^[42] pero no así con las demás mezclas de biodiesel.

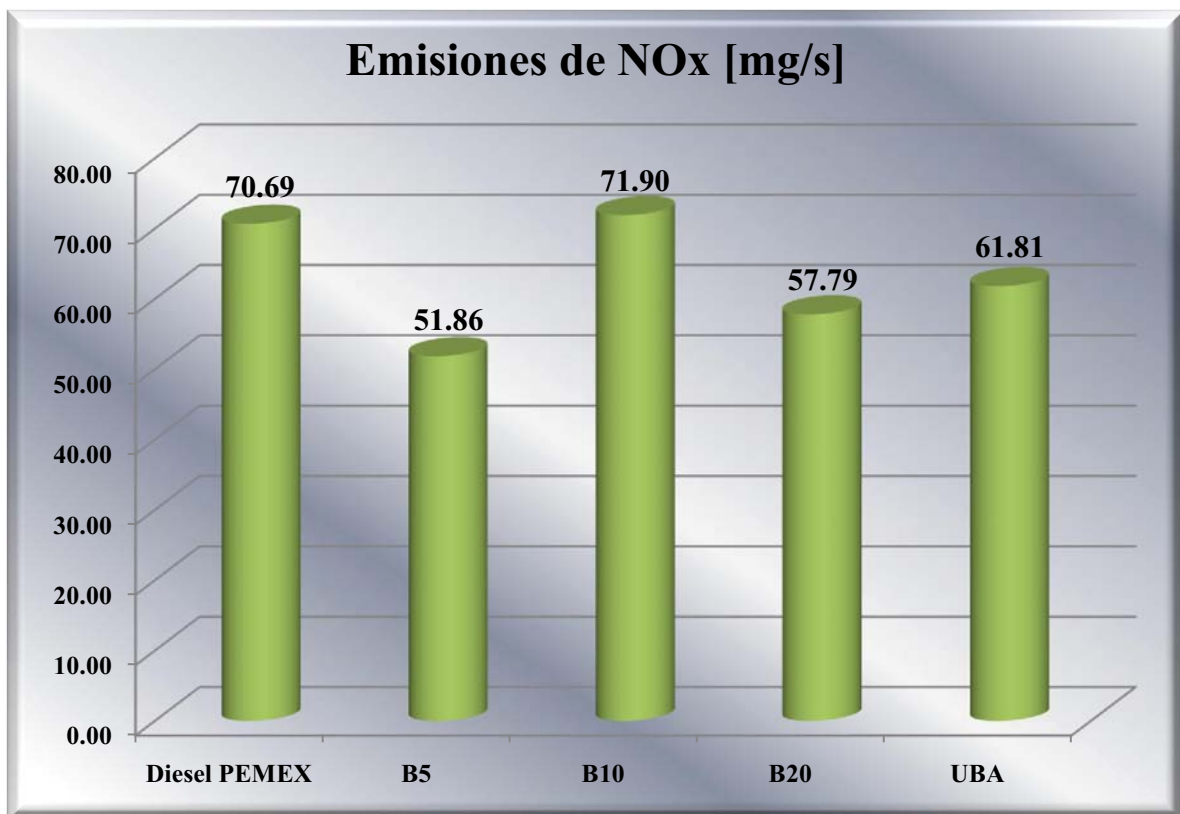


Gráfica 4.6. *Emisiones de HC por combustible.*

➤ Emisiones de NOx

En la gráfica 4.7 muestra los niveles de NOx en [mg/s] usando todos los combustibles. A diferencia de los niveles de CO y HC, mostrados anteriormente, se percibe que la cantidad de flujo emitida de NOx es mucho mayor. Se destaca que el B5 es el combustible de valores más bajos emitidos, contrariamente el B10 emanó los niveles más elevados de este contaminante mientras que el diesel PEMEX se encuentra ligeramente por debajo de éste y los valores de B20 y UBA se encuentran en niveles intermedios de emisión.

Las emisiones obtenidas de NOx en los resultados y comparados con los publicados por la EPA ^[42], solamente coinciden en el aumento de niveles para la mezcla B10, mientras que los otros son opuestos.

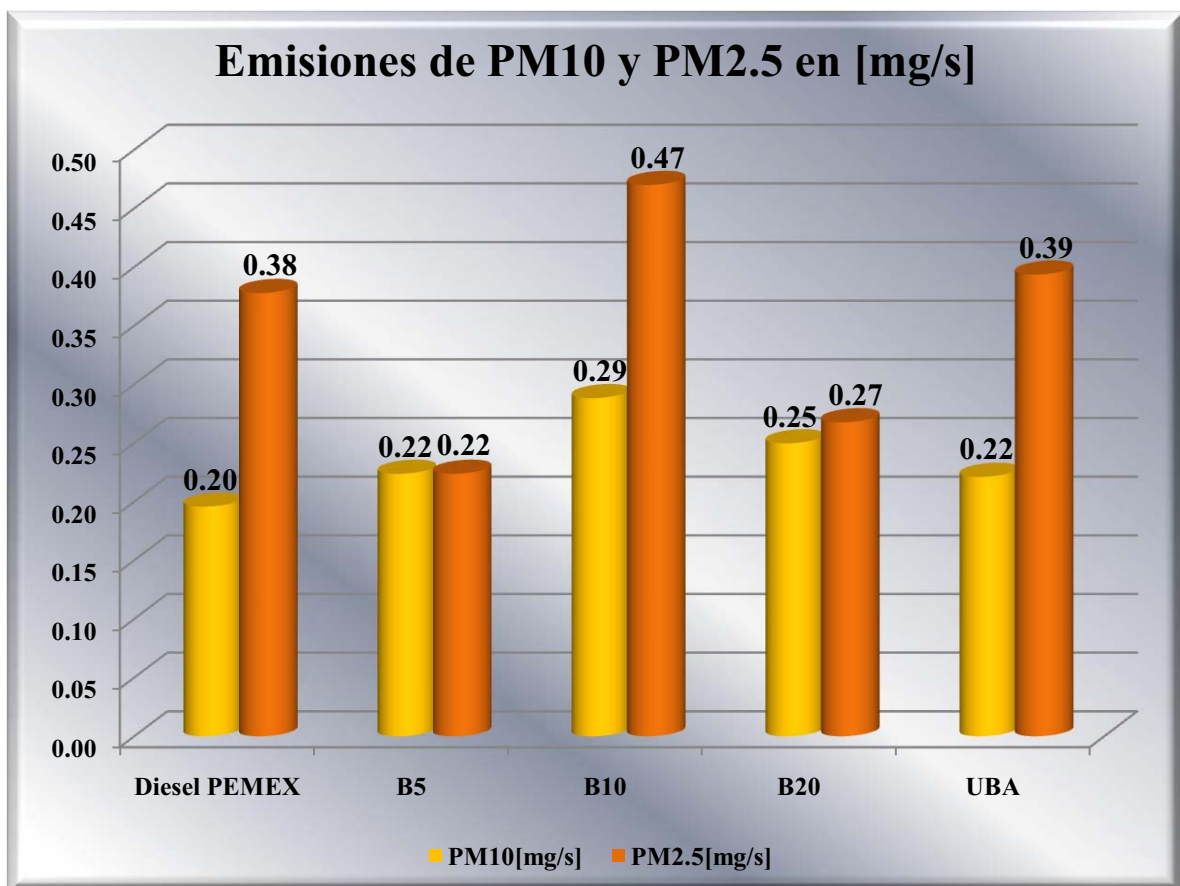


Gráfica 4.7. *Emisiones de NOx por combustible.*

➤ Emisiones de PM10 y PM2.5

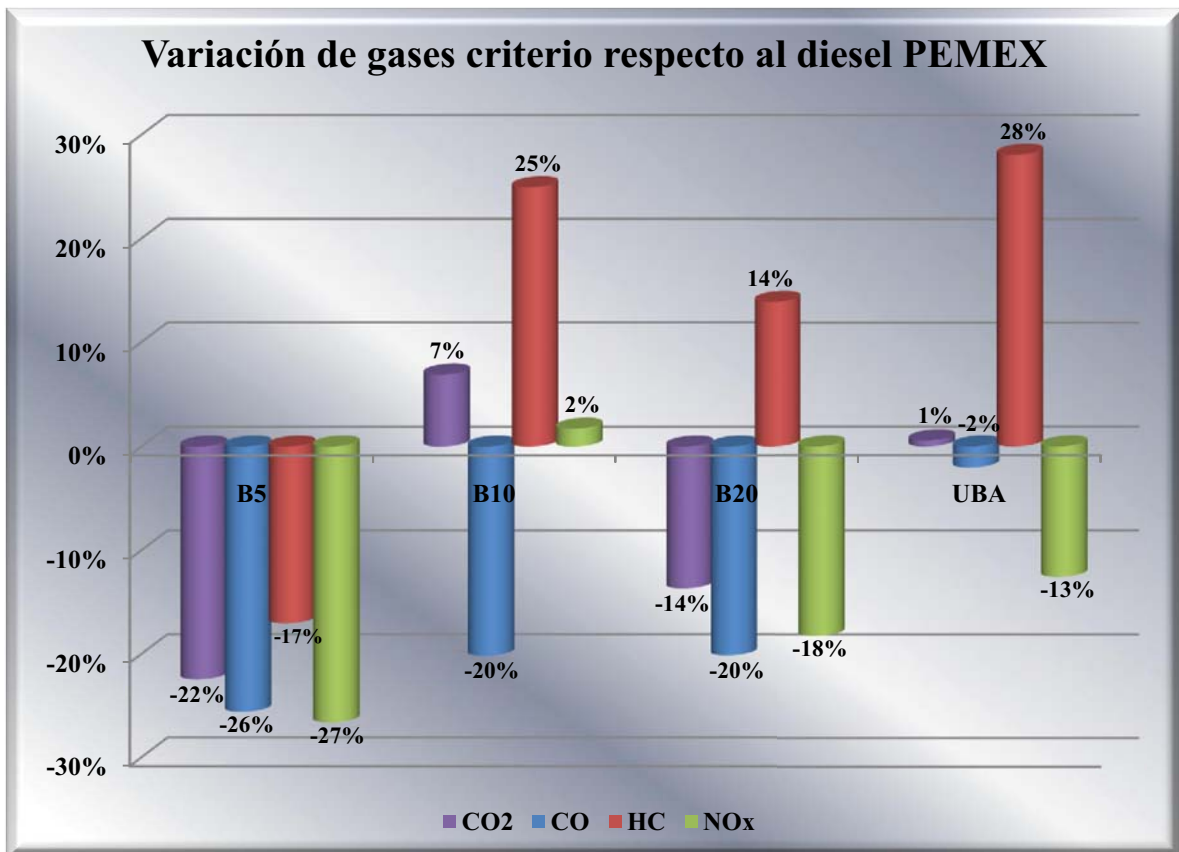
Las emisiones de partículas PM10 medidas en [mg/s] (gráfica 4.8), se muestra que el diesel PEMEX emitió los niveles más bajos y contrariamente la mezcla B10 presenta los niveles más altos, sin embargo la diferencia que existe entre el valor más alto y bajo es de 0.09 [mg/s] por tanto las emisiones de PM10 para todos los combustibles no muestran una gran variabilidad.

En lo que respecta a PM2.5 en [mg/s] gráfica 4.8. Los niveles de B5 son los más bajos y los niveles de B10 (niveles más altos) supera el doble de los valores de B5, la mezcla B20 es la que posee los niveles más cercanos a B5 con tan sólo 0.05 [mg/s] de diferencia, mientras que el diesel PEMEX y UBA se mantienen con niveles intermedios.



Gráfica 4.8. Emisiones de PM10 y PM2.5 por combustible.

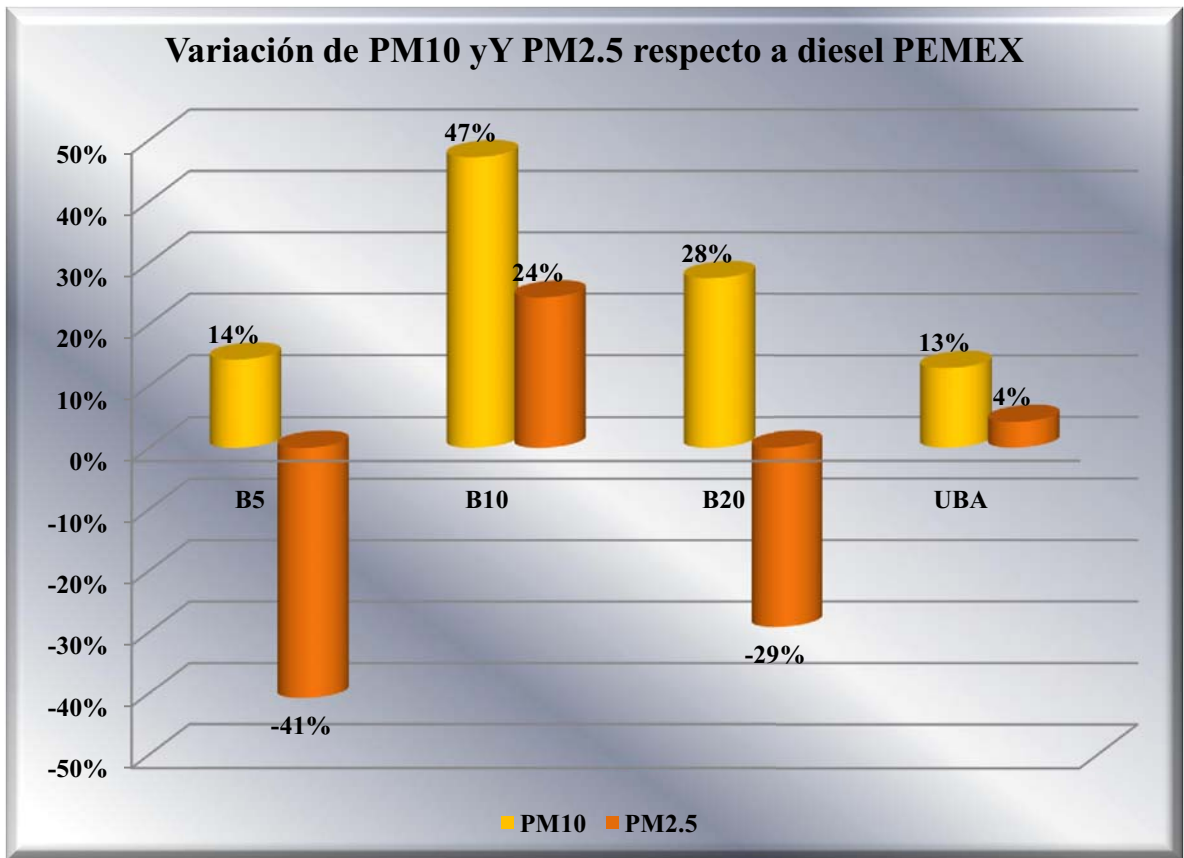
El combustible que más se utiliza en la República Mexicana para los vehículos de encendido por compresión MEC es el diesel PEMEX, si éste se considera como un combustible de referencia y se comparan los combustibles B5, B10, B20 y UBA, se tienen los porcentajes de emisiones en la gráfica 4.9.



Gráfica 4.9. Comparación porcentual de gases criterio de B5, B10, B20 y UBA respecto al diesel PEMEX.

Se aprecia que todos los gases criterio para B5 disminuyen de manera significativa mientras que el resto de los combustibles disminuyen algunos y otros aumentan.

Por otra parte, la gráfica 4.10 muestra de manera similar los porcentajes de PM₁₀ y PM_{2.5} respecto al diesel PEMEX.



Gráfica 4.10. *Comparación porcentual de material particulado de B5, B10, B20 y UBA respecto al diesel PEMEX.*

Se distingue que todos los combustibles tienden a aumentar los niveles de PM10 y PM2.5, aunque éste último tiene una reducción significativa en las mezclas B5 y B20.

CONCLUSIONES

En este trabajo se propuso y se aplicó un nuevo protocolo de prueba para la estimación de emisiones en motores diesel. Con una prueba en estado estable se simularon las condiciones de operación reales de un vehículo diesel usando un dinamómetro de banco. Esto permite estimar las emisiones bajo condiciones representativas de torque y rpm del motor.

Por ser la primera vez que se aplica este protocolo, se recomienda incorporar otros rubros tales como: medición de consumo, opacidad, determinación de curvas de potencia y torque. Esto permitirá balancear las emisiones contaminantes con las prestaciones.

Para los experimentos con los combustibles de prueba se propusieron once puntos de operación. Sin embargo por limitaciones del equipo, se logró usar solamente tres de éstos. Esto no fue impedimento para la estimación de las emisiones contaminantes, ya que se aplicaron factores de ponderación que corrigieron las emisiones producidas por el motor y, de esta manera se representan las emisiones totales de la ruta de trabajo del vehículo simulado.

Gracias al protocolo, se concluye que las emisiones de las mezclas de biodiesel (B5, B10 y B20) utilizadas en esta investigación no siguen un patrón de comportamiento, descrito en otros trabajos de investigación.^{[41][42]} Esto puede ser a diferencias de tecnología del motor y las condiciones de la Ciudad de México. Esto indica que no es tan simple la decisión de elegir un combustible para la reducción de emisiones en la Ciudad de México. De hecho en pruebas realizadas por el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP)^[44] se encontró que las emisiones de mezclas de biodiesel tampoco siguen una tendencia descrita en la literatura.^{[41][42]}

Se encontró que la mezcla B5 presentó los niveles más bajos en las emisiones gaseosas, aunque no así en las partículas PM10. No obstante, este combustible muestra una importante disminución de PM2.5 lo cual se considera de mayor importancia debido a la peligrosidad que tienen éstas en la salud humana (son más fácil de inhalar). La mezcla B10 obtuvo los valores más altos tanto en gases criterio como en material particulado, incluso por arriba de los valores de diesel PEMEX.

El Diesel UBA (15 ppm de azufre) presenta una ligera variación en la disminución de los gases criterio respecto al diesel PEMEX, aunque las emisiones de material particulados del UBA aumentaron considerablemente. Esto indica que no ofrece una ventaja significativa como se han reportado en otras investigaciones. ^[43]

Con base en lo anterior se aprecia que la mezcla B5 bajo las condiciones establecidas puede ser un combustible viable en los motores diesel, en función de la producción de biodiesel, emisiones contaminantes y prestaciones mecánicas.

REFERENCIAS

Capítulo 1

1. Biofuel 2011. <http://biofuel.org.uk/history-of-biofuels.html>
2. <http://usuarios.multimania.es/biodieseltr/hobbies9.html>
3. <http://news.soliclima.com/divulgacion/biomasa/brasil-cuna-del-etanol-como-combustible>
4. http://www.explicame.org/index2.php?option=com_content&do_pdf=1&id=54
5. <http://www.biodisol.com/que-son-los-biocombustibles-historia-produccion-noticias-y-articulos-biodiesel-energias-renovables/>
6. http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/39/html/sec_15.html
7. http://www.miliarium.com/monografias/energia/E_Renovables/Biomasa/Biomasa.asp
8. <http://www.miliarium.com/Bibliografia/Monografias/Biocombustibles/Aplicaciones/Bioetanol.asp>
9. <http://www.best-europe.org/Pages/ContentPage.aspx?id=117>
10. <http://www.aedhe.es/guer/paginas/04.aspx>
11. <http://biodiesel.com.ar/biodiesel-preguntas-frecuentes>
12. García Camús, Juan Manuel, García Labordá, José Ángel; *Informe de vigilancia tecnológica, biocarburantes líquidos: biodiesel y bioetanol*; Madrid, España; Universidad Rey Juan Carlos del Círculo de Innovación en Tecnologías Medioambientales y Energía (CITME); 2006, 125p.
13. González Hernández, Carlos Fernando. *Efecto del biodiesel de origen animal en las emisiones y prestaciones del motor diesel*. México, 2008, 88p. Tesis de licenciatura UNAM Facultad de Ingeniería.

-
-
14. Said Pablo Aburto. *Diseño de un reactor de pequeña escala para la producción de biodiesel con aceite vegetal residual*. México 2011, 116p. Tesis de licenciatura UNAM Facultad de Estudios Superiores Cuautitlan Izcalli.
 15. Cabrera Sastre, Daniel. *Biocombustibles*. México 2009, 85p. Tesis de licenciatura Universidad de Sotavento, A.C. Coatzacoalcos, Veracruz.
 16. <http://www.eve.es/ecomovil/biodiesel/cas/quees.aspx>
 17. http://www.odinpetroleumcorp.com/es/content/venta-de-mezclas-diesel-biodiesel_37.html
 18. http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs158.html
 19. <http://biodiesel.com.ar/3169/segun-un-analisis-de-globaldata-el-mercado-mundial-del-biodiesel-de-aqui-a-2010>
 20. <http://www.infobae.com/notas/556780-La-Argentina-ascendio-al-cuarto-lugar-como-productor-mundial-de-biodiesel.html>
 21. <http://biodieselhoy.blogspot.com/2011/03/brasil-argentina-y-colombia-lideran-la.html>
 22. <http://www.ingeniocarmelita.com/boletines/boletin%20fedebiocombustibles%202002%20de%20febrero%202011.pdf>
 23. <http://energiaadebate.com/Articulos/Julio2008/RocioSarmientoJulio2008.htm>
 24. <http://www.todochiapas.mx/2012/02/inaugura-juan-sabines-la-biodieselera-del-pais/>

Capítulo 2

25. DELPHI, Worldwide Emission Standards/ Heavy Duty & Off-Road Vehicles, USA, 2010.
26. Dieselnet 2011. www.dieselnet.com/standards/cycles
27. Comission of the European communities, Contract Number FIF 20020686, World Harmonised Duty Cycle (WHDC)/ Final Report, May 2004.

-
-
28. González Oropeza, Rogelio. Tesis: *Análisis paramétrico de la emisión de partículas en un motor diesel de inyección directa mediante sonda de muestreo*. Universidad Politécnica de Valencia, 1993.
 29. García Puertos, Fernando. Tesis: *Caracterización de las masas inerciales en un dinamómetro de chasis*. Universidad Nacional Autónoma de México, 2009.
 30. Norma Oficial Mexicana. NOM-044-SEMARNAT-2006
 31. Norma Oficial Mexicana. NOM-045-SEMARNAT-2006
 32. Vigencia NOM-044-SEMARNAT-2006 en el diario oficial de la federación. <http://www.indicadorautomotriz.com.mx/fabricaweb/?p=3755>
 33. González Oropeza, Rogelio. Ingeniería, Investigación y Tecnología. *Los ciclos de manejo, una herramienta útil si es dinámica para evaluar el consumo de combustible y las emisiones contaminantes del auto transporte*. UNAM, México, 2005, pp. 154-156.
 34. Bosch, Robert. *Manual de la técnica del automóvil*. 4° edición, Alemania, 2005, pp. 550-565.
 35. Premium News 2011. <http://www.indicadorautomotriz.com.mx/fabricaweb/?p=3755>

Capítulo 3

36. Carrales Solana, Francisco Javier, *Diseño y construcción de un prototipo de sensor de torque*. Tesis de licenciatura, Cholula, Puebla, México 2009.
37. J.Ney-G. Louis, *Lecciones de electricidad*, Ed. Marcombo 5 edición, Francia, 1977.
38. Montoto San Miguel, Luis. *Fundamentos Físicos de la Informática y las comunicaciones*. Ed. Paraninfo, Madrid, España, 2005, pp. 376.
39. <http://www.ehu.es/acustica/espanol/electricidad/transes/transes.html>
40. Baird, Colín, *Química ambiental*, Editorial Reverté, 2° edición, p. 101, Barcelona, 2001.

Capítulo 4

41. González Oropeza Rogelio et al. *Performance and emission characteristics of a diesel engine fuelled by animal and vegetable derived bio-diesel and ultra low sulphur diesel in Mexico City*, SAE International, 2010, pp. 5-9.
42. Environmental Protection Agency (EPA). *A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions*, U.S. EPA Draft Technical Report – EPA 420-P-2-001, October 2002.
43. Miguel Rico, Samuel Xicotencatl. *Cuantificación de emisiones de biodiesel en un camión de transporte de carga en la ZMVM*. México D.F. 2010. Tesis de licenciatura. UNAM Facultad de Química.
44. López Vidal, Gabriel. *Estudio comparativo de emisiones y desempeño en motores de nueva generación con diesel actual, bajo azufre y biodiesel*. Instituto Mexicano del Petróleo, México D.F., septiembre 2010.