



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MECÁNICA – TERMOFLUIDOS

EMISIONES CONTAMINANTES DE LAS MEZCLAS DE COMBUSTIBLES
CONVENCIONALES CON BIOCOMBUSTIBLES, CRITERIO Y NO REGULADAS

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JOSÉ FERNANDO GARCÍA PUERTOS

TUTOR PRINCIPAL
ROGELIO GONZÁLEZ OROPEZA, FACULTAD DE INGENIERÍA
COMITÉ TUTOR
JAVIER AGUILLÓN MARTÍNEZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA
ARÓN JAZCILEVICH DIAMANT, CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA
FRANCISCO JAVIER SOLORIO ORDAZ, FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. ENERO 2014

JURADO ASIGNADO:

Presidente: ARON JAZCILEVICH DIAMANT
Secretario: JAVIER EDUARDO AGUILLÓN MARTÍNEZ
Vocal: ROGELIO GONZÁLEZ OROPEZA
1 er. Suplente: FRANCISCO JAVIER SOLORIO ORDAZ
2 do. Suplente: ALEJANDRA CASTRO GONZÁLEZ

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Ciudad Universitaria, UNAM. D.F.

TUTOR DE TESIS:

ROGELIO GONZÁLEZ OROPEZA

FIRMA

(Segunda hoja)

EMISIONES CONTAMINANTES DE LAS MEZCLAS DE COMBUSTIBLES CONVENCIONALES CON BIOCOMBUSTIBLES, CRITERIO Y NO REGULADAS

INTRODUCCIÓN

HIPÓTESIS Y OBJETIVO

1. BIOCOMBUSTIBLES

- 1.1 Desarrollados para motores de combustión interna alternativos MCI A.**
- 1.2 Clasificación (Generaciones).**
- 1.3 Modelos exitosos de producción (Brasil, EU y Alemania).**

2. BIOETANOL Y BIODIESEL

- 2.1 Composición y estructura.**
- 2.2 Proceso de fabricación de 1ª Generación.**
- 2.3 Normatividad Internacional.**
- 2.4 Emisiones no reguladas (Aldehídos y HAP's)**

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

- 3.1 Preparación de mezclas E6, B5, B10 y B16.**
- 3.2 Planeación de pruebas (campo y laboratorio).**
- 3.3 Equipos utilizados (PEMS, FTIR, dinamómetro de banco y de chasis).**

4. SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS (ADVISOR)

- 4.1 Mapas 3D (régimen de giro, par y emisión) de Gasolina y la mezcla E6.**
- 4.2 Mapas 3D (régimen de giro, par y emisión) de Diesel, así como de las mezclas B5, B10 y B16.**
- 4.3 Estimación de emisiones contaminantes (E6, B5, B10 y B16).**

5. RESULTADOS

- 5.1 Prestaciones del MCI A al utilizar mezclas E6, B5, B10 y B16**
- 5.2 Emisiones contaminantes (LCE y ADVISOR)**
- 5.3 Especiación más detallada de dichas emisiones.**

CONCLUSIONES

REFERENCIAS

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

INTRODUCCIÓN

La invención del vehículo automotor a finales del siglo XIX, fue precedida por la creación, años antes, del motor de combustión interna alternativo. Este último ha sido desarrollado y se ha mantenido como la fuente de propulsión más exitosa, siendo adaptado para utilizar diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos (gasolina, diésel, gas natural comprimido, bioetanol, biodiésel e hidrógeno entre otros).

El petróleo pudo dar abasto durante varias décadas para la producción de la gasolina y el diésel sin ningún problema, inclusive ante una demanda cada vez mayor. Sin embargo, la crisis petrolera de 1973 demostró que la dependencia en un solo recurso es peligrosa para la estabilidad económica mundial.

En aquellos años los países de Oriente Medio habían logrado arrebatarse a las grandes industrias petroleras mundiales el control en la explotación y oferta del petróleo. Entonces cuando varias naciones del mundo occidental dieron su apoyo a Israel en un conflicto con tales naciones, sufrieron un corte en su suministro del vital recurso.

Tal medida produjo un aumento desmedido del precio del barril de petróleo para compensar una menor oferta y una reducción de la actividad económica de los países afectados. La escasez artificial de gasolina provocada, causó que la recarga de combustible llegara a restringirse. Por ejemplo en Estados Unidos, esto llegó a estar en función del día del mes y la terminación de la placa del vehículo (par o impar).

A partir de tales acontecimientos el petróleo ya no se consideró inagotable, debía cuidarse y aprovecharse al máximo. Algunos de los países afectados, buscaron alternativas que redujeran su dependencia energética y poder reducir su consumo de petróleo, tal es el caso de Brasil cuyo programa para la producción nacional de bioetanol dio inicio en el año de 1973.

Las empresas automotrices optaron por el diseño de modelos más pequeños, se preocuparon por lograr la mejor combustión posible en el motor y no sólo de mejorar las prestaciones del vehículo. Asimismo cualquier mejora en el confort de los ocupantes no debía traducirse en un aumento desmedido de energía.

Las emisiones contaminantes pasaron a tener suma importancia, no sólo porque los niveles de emisión de contaminantes son función de una combustión incompleta (p.e. el

monóxido de carbono), sino porque dependen también de las características del combustible. Entonces al conocer los diversos productos emitidos (p.e. el dióxido de azufre), fue posible estimar el grado de exposición de la población y las consecuencias negativas en su salud.

Actualmente los biocombustibles se consideran como una opción atractiva ante un futuro agotamiento de las reservas de petróleo, porque podrían producirse a partir de un recurso renovable (biomasa), y lograr asimismo una disminución en las emisiones contaminantes. Estudios han mostrado que el uso de tales combustibles no afecta significativamente las prestaciones (p.e. potencia y par) de los combustibles utilizados en los motores de combustión interna alternativos **MCIA** (p.e. gasolina y diésel).

Sin embargo, para lograr aprovechar los biocombustibles y resolver las desventajas que van surgiendo al plantear un uso a gran escala, se debe realizar mayor investigación al respecto. Este trabajo pretende ser una aportación a tales esfuerzos, enfocándose en las emisiones contaminantes (criterio y no reguladas), así como en las prestaciones vehiculares actuales (par y potencia), por el uso de un biocombustible (etanol o biodiésel) a una altitud crítica (ciudad de México, 2240 msnm).

Se realizaron ensayos con mezclas de biocombustibles **E6**, **B5**, **B10** y **B16**, tanto en campo como en laboratorio. La información sobre las emisiones contaminantes de gases crudos obtenida fue sintetizada para la generación de bases de datos (rad/s, torque y emisión). Estas últimas hacen posible estimar las emisiones contaminantes (criterio y no reguladas) de un vehículo al utilizar una mezcla de biocombustible con combustible convencional, circulando por rutas virtuales mediante el simulador de vehículos **ADVISOR**.

El primer capítulo presenta de manera breve conceptos básicos necesarios sobre los biocombustibles. A partir de una definición de los mismos, se limita el alcance de este trabajo para aquellos que se encuentran en su estado líquido y presenta una clasificación de acuerdo a la complejidad del proceso para extraer la energía la biomasa (generaciones). Para concluir el capítulo, se tratan las características de varios modelos de producción éxitos de biocombustibles en otros países.

El segundo capítulo aborda las propiedades físicas y químicas del bioetanol y el biodiésel, así como su influencia en el desempeño de un **MCI**¹. Después de ello, se explica con mayor detalle su producción mediante procesos de 1ª generación, seleccionados para producirlos en México. Asimismo, brinda la normatividad internacional para su producción y sus emisiones contaminantes. Finalmente, trata sobre las emisiones no reguladas, las características de las mismas y los límites de exposición recomendados..

El tercer capítulo contiene la metodología para los ensayos realizados con mezclas de biocombustibles (**E6**, **B5**, **B10** y **B16**), tanto en campo como en laboratorio. Lo anterior incluye los equipos, técnicas así como las emisiones contaminantes criterio (**CO**, **CO₂**, **HC**, **NO_x**, y **PM**) y no reguladas (**Aldehídos** y **HAP's**) obtenidas.

El cuarto capítulo presenta el proceso de generación de un mapa tridimensional (rad/s, par y emisión). Se presentan los algoritmos utilizados para organizar y sintetizar los datos experimentales, provenientes de las pruebas con mezclas de bioetanol o biodiésel. Finalizando con su aplicación en el simulador de vehículos **ADVISOR** para estimar sus emisiones contaminantes.

El quinto capítulo contiene la información derivada de las pruebas experimentales y la simulación computacional, las cuales con comparadas con los combustibles convencionales (gasolina y diésel). Lo anterior se presenta para las diferentes mezclas de biocombustible utilizadas: **E6**, **B5**, **B10** y **B16**. Finalmente, se brindan un resumen de las diferentes emisiones no reguladas obtenidas para el bioetanol y las mezclas de biocombustible.

Esta tesis incluye dos Anexos con mapas **3D** de emisiones no reguladas, una de las aportaciones de este trabajo. El **Anexo A** con los mapas **3D** de emisiones no reguladas (pe. **Formaldehído - H₂CO**), por el uso de bioetanol en un motor **MECH**. El **Anexo B** con los mapas **3D** de emisiones no reguladas (**NHAP's**), por el uso de biodiésel en un motor **MEC**.

¹ **Motor de Combustión Interna Alternativo**. La palabra Alternativo hace referencia al movimiento del pistón, el cual se transforma a un movimiento rotario del cigüeñal del motor. No se utiliza el término recíprocante, porque éste no es aceptado por el Diccionario de la Real Academia Española.

Hipótesis

De acuerdo con la literatura especializada, el uso de biocombustibles en los motores de combustión interna alternativos (MCIA), reduce los niveles de emisiones contaminantes, ya sea en los motores de encendido por chispa (MECH) o en los de encendido por compresión (MEC). Sin embargo, existen también experiencias que reportan una influencia no muy clara de sus mezclas con combustibles convencionales (bioetanol con gasolina primaria destinada del crudo o biodiesel con diésel), es decir no siempre se observa una reducción de los niveles de partículas o de gases como CO, HC y NOx.

En tales circunstancias se ha estimado que los procedimientos o protocolos seguidos no han sido los mismos y en el equipo utilizado, también existen algunas diferencias, es más, los combustibles y biocombustibles empleados no necesariamente tendrán las mismas formulaciones.

En este contexto, se pensó en seguir un protocolo que abarcara medición en campo, en dinamómetro de chasis, dinamómetro de banco y un simulador de vehículos (software). De tal manera que fuera posible considerar emisiones que dependen de la materia orgánica requerida para producirlos (p.e. Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos y Aldehídos), y que no son consideradas por la legislación vigente de las emisiones provenientes del escape de los vehículos actuales.

El equipo empleado en los ensayos sería el mejor y el más variado que tuviéramos a nuestro alcance: FTIR, PEMS, Cromatografía y Espectrometría, de esta manera se podría tener una visión completa de la influencia de los biocombustibles y aún más, que eran biocombustibles de fabricación nacional.

Objetivo.

El objetivo de este trabajo está fuertemente ligado con la problemática que se presenta hoy en día, con el uso de los combustibles en el transporte. La contaminación ambiental y consecuentemente el calentamiento global, ocupa la atención de gran número de investigadores en el mundo.

Nuestro país no está exento de esta situación y algunos sectores ya inician con la producción de biocombustibles. No se conocen exactamente que tan rentables serán los biocombustibles de 2ª y 3ª generación, pero sí podemos conocer la influencia de aquellos de 1ª generación en la contaminación atmosférica, y conocer detalles de aquellos compuestos que son altamente peligrosos a la salud.

Es un tema muy amplio, en el que hay mucha “tela de donde cortar” o “mucho camino por recorrer”, pero que sin embargo, este trabajo puede ser el inicio de otros muchos que permitan calcular los riesgos y adoptar las mejores estrategias para el control de las emisiones contaminantes provocadas por fuentes móviles en nuestro país, y orientar a los sectores que inician la producción de los biocombustibles.

Capítulo 1.

BIOCOMBUSTIBLES

Capítulo 1. Biocombustibles

Los biocombustibles son combustibles sólidos, líquidos o gaseosos derivados de la biomasa, esta última es definida de acuerdo al diccionario de la Real Academia Española como:

1. f. Biol. Materia total de los seres que viven en un lugar determinado, expresada en peso por unidad de área o de volumen.
2. f. Biol. Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía.

La primera es utilizada en ecología para comparar diferentes ecosistemas, mientras la segunda hace énfasis en el carácter renovable de la biomasa, materia prima para producir un biocombustible. Entonces al agregarse el prefijo bio- a la palabra combustible, esto significa que se obtienen a partir de un recurso orgánico renovable.

Un biocombustible se define como ***un combustible que se obtiene a partir del tratamiento físico o químico de biomasa***, no debe confundirse esta última con la materia orgánica, la cual incluye a la materia muerta y a la materia viva. Tampoco se trata de la energía útil obtenida del tratamiento de la biomasa, por ejemplo: cuando se quema la madera (biomasa) se produce luz y calor (energía útil).

El hombre ha utilizado biocombustibles desde hace varios siglos, pero el motor de combustión interna alternativo (**MCIA**) sólo tiene poco más de cien años, durante los cuales los combustibles fósiles (p. e. la gasolina y el diésel) han proporcionado la energía a ser convertida en movimiento. El problema actual es la disminución observada en la extracción del petróleo, dando como resultado la búsqueda de fuentes alternas de energía.

Una respuesta inmediata a dicha problemática son los biocombustibles, a continuación se delimita su aplicación al **MCIA**, cómo cambian sus prestaciones y emisiones al utilizarlos en lugar de los combustibles convencionales (gasolina y diésel), así como sus propiedades físicas y químicas.

Capítulo 1. Biocombustibles

1.1 Desarrollados para el MCIA

Hasta ahora no existe algún biocombustible en estado sólido que pueda ser utilizado en los **MCIA**. Se mencionan varios biocombustibles en diferentes niveles de desarrollo, creados con el propósito de reemplazar a la gasolina y el diésel (combustibles fósiles), en el motor de encendido por chispa (**MECH**) y en el de encendido por compresión (**MEC**) respectivamente.

Para la gasolina se tienen tres alternativas: el butanol, el etanol y el metano en estado líquido. Cuando tales combustibles se producen a partir de la biomasa a su nombre se agrega el prefijo bio-, con el cual se diferencian de aquellos obtenidos a partir de petróleo.

Tanto el biobutanol y el bioetanol son combustibles alcoholes que se producen mediante la fermentación de la biomasa, utilizando especies de levadura o bacterias respectivamente. Después de dichos procesos, se realiza una destilación para obtener el biocombustible y otros co-productos.

En cambio, el biometanol es producido por la fermentación anaeróbica de desechos orgánicos, incluyendo el excremento animal. Los gases resultantes de tal proceso son limpiados y purificados para obtener un combustible de alta calidad rico en metano, similar al gas natural comercial.

Al ser el biobutanol un compuesto químico con una cadena larga de hidrocarburos no polar (**Fig. 1**), haciéndolo más similar a la gasolina, puede utilizarse directamente en los automóviles de gasolina sin necesidad de modificarlos.



Fig. 1 Molécula del biobutanol, del bioetanol y del biometanol.

Capítulo 1. Biocombustibles

En cambio, el bioetanol necesita mezclarse con la gasolina en diferentes porcentajes para evitar realizar modificación alguna al motor, siempre y cuando dicho biocombustible no exceda el 10% en volumen de la mezcla (**E10**).

El biometanol puede usarse mezclado con gasolina o directamente “puro”, aunque se requieren modificaciones sustanciales en el sistema de combustible, ya que es más corrosivo que el bioetanol.

De estos tres biocombustibles, sólo el bioetanol se produce a escala comercial en varias regiones del mundo (**Fig. 2**).

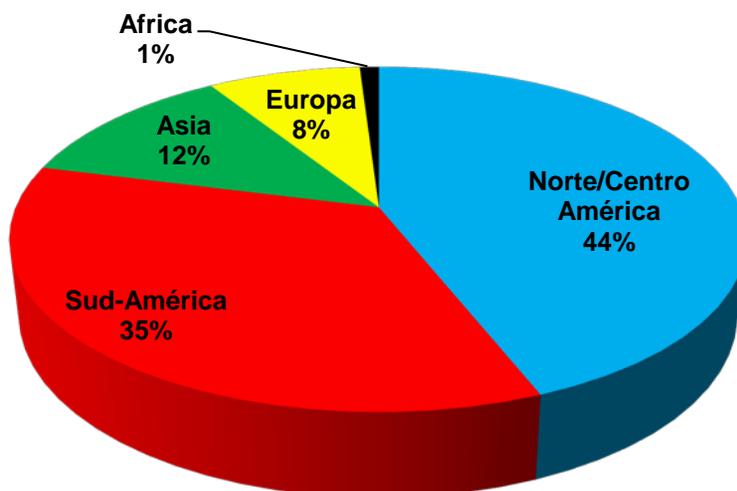


Fig. 2 Producción mundial de bioetanol (2007). Total global = 62.2 billones de lts. [1]

La alternativa desarrollada para el diésel es el biodiésel, el cual puede ser obtenido a partir de aceites vegetales o grasas animales. Dicha materia prima es hecha reaccionar químicamente con un alcohol de cadena corta (metanol), en presencia de un catalizador para producir biodiésel y glicerina como un co-producto.

Capítulo 1. Biocombustibles

El biodiésel puede ser usado solo (**B100**) o mezclado con diésel fósil en cualquier proporción. Cuando esta última es igual o menor al 20% en volumen (p.e. **B20, B10, B5**), el motor diésel puede operar con una pequeña o ninguna modificación.

La producción de dicho biocombustible ha recibido el mayor impulso por parte del continente europeo, encabezada por países como Alemania, Francia e Italia.

Propiedades de un biocombustible

Los biocombustibles mencionados anteriormente poseen características cuyas diferencias se traducen en ventajas y limitantes para su aplicación en el **MCIA**. A continuación se presenta una comparación entre las propiedades que poseen diferentes tipos de combustibles (**Tabla 1**).

Peso molecular. Es la suma de los pesos atómicos que entran en la fórmula molecular de un combustible, un mayor peso molecular significa una molécula más grande.

Gravedad específica o densidad relativa. Es una comparación entre la densidad de un combustible con la densidad del agua bidestilada a 4° C, la cual es igual a 1000 kg/m³.

Densidad. Es la relación que existe entre la masa de un combustible y el volumen que ocupa. Los biocombustibles poseen una mayor densidad, por lo que se requiere más espacio para transportar la misma cantidad de combustible, en comparación con la gasolina y el diésel

Punto de ebullición. Es la temperatura a la cual un combustible cambia del estado líquido al gaseoso.

Poder Calorífico Inferior. Es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de una unidad de volumen de combustible, sin contar la parte correspondiente al

Capítulo 1. Biocombustibles

calor latente del vapor de agua generado en la combustión, porque no se produce cambio de fase.

Número de Octano. Es la medida de la cualidad antidetonante de la gasolina, es decir su tendencia a su autoencendido. Para los números de octano 100 o menores, se basa en una comparación de los combustibles de la referencia: el iso octano (al cual se le asigna un valor de 100) y el n-heptano (al cual se le asigna un valor de 0). Sobre 100, el número de octano de un combustible se basa en el grado del motor, en términos de mililitros de tetraetilo en el iso octano que empareja el del combustible desconocido. Un combustible con un número de octano más alto, se traduce en un motor menos propenso al fenómeno de cavitación (una combustión extremadamente rápida y espontánea debida a la compresión del combustible).

Existen dos métodos para la determinación experimental del número de octano

RON (Research Octane Number). Establece la resistencia a la autoinflamación de un combustible en condiciones poco severas: bajo régimen con numerosas aceleraciones. Representa de manera aproximada el comportamiento en ciudad.

MON (Motor Octane Number). Establece la resistencia a la autoinflamación de un combustible en condiciones más severas. Esta mayor severidad es simulada por medio del precalentamiento de la mezcla, mayor régimen de giro (en comparación con el método Research) y el incremento en el avance al encendido a medida que aumenta la relación de compresión. Intenta reproducir la situación en carretera, alto régimen y conducción regular.

Número de Cetano. Es una medida de la facilidad de la ignición de los combustibles utilizados en el motor Diésel. Un combustible con una óptima facilidad de inflamación se le asigna convencionalmente el número 100, si por el contrario posee una muy escasa facilidad de inflamación se le asigna el número 0. Altos números de cetano ayudan a asegurar buenas propiedades de arranque en frío y minimizar la formación de humo blanco.

Capítulo 1. Biocombustibles

Punto de congelamiento. Es la temperatura a la cual un combustible líquido se solidifica debido a una reducción de temperatura. La temperatura de congelamiento del biodiésel puede ser mayor a los 0°C, por lo cual se vuelve necesario calentar las líneas de combustible (inclusive en climas moderados) durante el invierno.

Viscosidad Cinemática. La viscosidad dinámica (absoluta) es una propiedad de los fluidos para ofrecer resistencia al esfuerzo tangencial o cortante, es decir, resistencia a deformarse. La viscosidad cinemática es la relación entre la viscosidad dinámica y la densidad del fluido, lo que significa que desecha las fuerzas que generan el movimiento, con lo cual se obtiene una unidad simple de movimiento (p.e. cm^2/s - stoke). Es un parámetro importante pues su valor debe ser suficientemente bajo como para poder circular por el sistema de combustible sin excesivas pérdidas de presión.

Tabla 1. Propiedades de diferentes combustibles

Propiedad	Gasolina	Diésel	Biobutanol	Bioetanol	Biometano	Biodiésel
Formula Química	C_4 a C_{12}	C_8 a C_{25}	$\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	CH_3OH	C_{12} - C_{22}
Peso molecular	100 – 105	~200	74.11	46.07	32.04	~292
Gravedad específica	0.72 – 0.78	0.85	0.81	0.79	0.79	0.88
Densidad @ 15°C, kg/m^3	718.95 – 778.87	848.25	813	792.05	794.44	878.08

Capítulo 1. Biocombustibles

Punto de ebullición, °C	26.6 – 225	180 – 340	117	77.7	65	315 – 350
Poder calorífico inferior, MJ/kg	43.44	42.7	32	26.9	20	37.5
Número de Octano						
RON	91 – 99	–	96	107	106	–
MON	81 – 89	–	78	89	92	–
Número de Cetano	–	40 – 55	–	–	–	48 - 65
Punto de congelamiento, °C	-40	-40 – -1.1	-89.4	-114	-97.5	-3.3 – 18.3
Viscosidad Cinemática [mm ² /s] > @ 20	0.5 – 0.6	2.8 – 5.0	3.7	3.435	1.345	1.9 - 6.0
Punto de inflamabilidad, °C	-42.7	60 – 80	35	12.7	11.1	100 – 170

Capítulo 1. Biocombustibles

Calor de vaporización, MJ/kg	~0.348	~0.232	0.474	0.921	1.176	—
Relación aire combustible estequiométrica	14.7	14.7	11.1	9.0	6.45	13.8

Punto de inflamabilidad. Es la temperatura más baja a la cual un combustible puede evaporarse para formar una mezcla inflamable en contacto con el aire. Un mínimo punto de inflamación para el combustible es requerido para tener seguridad contra incendio. El biodiésel puro requiere tener al menos 93°C para asegurar estar clasificado como no peligroso bajo el código de la **NASF** (Asociación de Nacional de Protección contra Incendio).

Calor de vaporización. Es la cantidad de energía requerida por una cantidad de combustible para cambiar de fase. Los biocombustibles requieren una mayor cantidad de energía para vaporizarse (en comparación con los combustible fósiles) antes de ser quemados en el motor, al ser insuficiente se presenta un problema conocido de los combustibles alcoholes durante su arranque en frío.

Relación aire combustible. Es el número que expresa la cantidad en masa, de aire aspirado por un motor de combustión para una cantidad unitaria de combustible. Dicha relación es función del combustible, del tipo de motor, de su regulación y de la carburación.

El dosado (F) es el inverso de la relación aire combustible. Cuando todo el oxígeno y todo el combustible reaccionan sin que quede nada de reactivos, se tiene el dosado

Capítulo 1. Biocombustibles

estequiométrico F_e , o químicamente correcto. Dividiendo por él, se obtiene el dosado relativo.

$$F = \frac{F}{F_e} \left\{ \begin{array}{l} Fr < 1, \text{ dosado pobre} \\ Fr = 1, \text{ dosado estequiométrico} \\ Fr > 1, \text{ dosado rico.} \end{array} \right.$$

El nombre de dosado pobre o rico es debido a que se considere que exista falta o exceso de combustible para la combustión estequiométrica.

1.2 Clasificación (Generaciones)

Si bien existen varias clasificaciones de biocombustibles (p.e. por su origen o su apariencia), éstas se definen de modo que dos biocombustibles pueden pertenecer a un mismo grupo de acuerdo a una clasificación o a dos grupos diferentes de acuerdo a otra, lo cual complica habituarse al manejo de cualquiera de ellas.

Otro problema consiste en el desconocimiento del criterio que define los tipos de biocombustibles para una clasificación determinada. En el caso de la clasificación de acuerdo a la generación a la que pertenecen, un error común consiste en considerar a la biomasa utilizada para su producción como dicho criterio.

Para subsanar esto, es necesario tener una definición clara y precisa como punto de partida. ***Una generación es simplemente la complejidad del proceso para extraer la energía almacenada en la biomasa.*** Para explicar dicho criterio, se mencionan las generaciones de bioetanol de acuerdo a esta clasificación.

En general, el bioetanol puede ser extraído de materiales carbohidratos que tienen la fórmula típica de $(CH_2O)_N$. Entonces, el proceso requerido para ello es la fermentación, el cual requiere como materia prima de "azúcares". Si estos últimos se obtienen de ***manera inmediata*** de la biomasa, se trata de un biocombustible de **primera generación**. Por ejemplo, es posible extraerlos de la sacarosa del jugo de la caña de azúcar, o como resultado de la hidrólisis del almidón extraído de los granos de maíz.

Los cultivos destinados al consumo humano permiten extraer la energía almacenada fácilmente, sin hacer nada antes de ingerirlos. Aunado a esto, los procesos para la obtención del bioetanol han sido desarrollados ampliamente, por tanto no presenta ninguna dificultad realizarlos.

Sin embargo, existe la controversia de dedicar los recursos necesarios para nuestra subsistencia a la producción de más bioetanol. Esto resulta sumamente preocupante, si se considera que para el año 2002 más del 99.7% de la comida para el ser humano

Capítulo 1. Biocombustibles

provenía del ambiente terrestre. Desde 1980 la producción de maíz se ha incrementado aproximadamente solo un 1% anual, mientras la población mundial ha crecido un 1.1%. [2]. Tal situación explica perfectamente la búsqueda de otros tipos de biomasa como materia prima, dando lugar a la producción de biocombustibles de **segunda generación**.

La biomasa escogida fueron recursos no comestibles, como la lignocelulosa que almacena la energía de manera inaccesible a nuestros organismos. Dicha biomasa está compuesta de celulosa $C_6H_{10}O_5$, hemicelulosa $C_5H_8O_4$ (ambas pueden ser hidrolizadas a azúcares fermentables) y lignina $C_6H_{11}O_2$ (que no puede ser convertida a azúcares fermentables). Entonces, para extraer la energía se ideó un proceso: romper la celulosa (estructura externa) para poder atacarla con enzimas y liberar los azúcares fermentables.

Actualmente, la producción de biocombustibles de primera generación, es la única que permite obtenerlos a una escala comercial. Si bien es posible producir biocombustibles de segunda generación, los costos son muy altos. En el caso del bioetanol de segunda generación, se considera que podría ser competitivo respecto al de primera generación en el año 2020 [3].

Sin embargo, el potencial de la biomasa, como materia prima, es todavía más grande, existen otras investigaciones para la creación de nuevos métodos y procesos, que permitan generar nuevas rutas de producción biológicas, termoquímicas, etc. Esto desemboca en los biocombustibles de **tercera generación**.

A este respecto, algunos países cuentan con proyectos para el desarrollo de biocombustibles de tercera generación [4] [5], aprovechando un abundante recurso: algas marinas, así como de agua dulce. Tales recursos para los biocombustibles son muy atractivos por el hecho de que las algas tienen tasas de crecimiento y de producción mayores a las de las plantas terrestres.

A diferencia de la lignocelulosa, las algas tienen menores niveles de lignina y su celulosa es más susceptible para su bioconversión a combustibles (en comparación con la de las

Capítulo 1. Biocombustibles

plantas terrestres). Los retos existentes son no sólo extraer la energía, también incluyen el cultivo de dicha biomasa, con características únicas prácticamente desconocidas.

Ahora, se presenta esta clasificación para el bioetanol y el biodiésel, brindando una explicación más detallada de los procesos que intervienen en su obtención.

Bioetanol

La elaboración de bioetanol de **primera generación** requiere de varios procesos (**Fig. 3**).

i. Pretratamiento. dependiendo de la biomasa seleccionada se presiona mecánicamente:

a. Extracción → para obtener la sucrosa $C_{12}H_{22}O_{11}$ disponible, un disacárido cristalino de fructosa y glucosa.

La caña de azúcar, la remolacha y el sorgo dulce son ejemplos de este tipo de biomasa.

b. Molido → para transformar en jugo los granos que contienen almidón, un carbohidrato natural descrito como un polisacárido que contiene monómeros de glucosa.

El maíz, el trigo y la cebada son ejemplos de este tipo de biomasa.

ii. Hidrolisis (si se trata de almidón) → por medio de enzimas el producto del paso anterior es convertido en glucosa.

iii. Fermentación de las fuentes de azúcar obtenidas sin o con hidrolización previa por medio de levadura o bacterias,

Capítulo 1. Biocombustibles

- iv. Separación de productos → la mezcla fermentada es separada en bioetanol y co-productos por destilación.

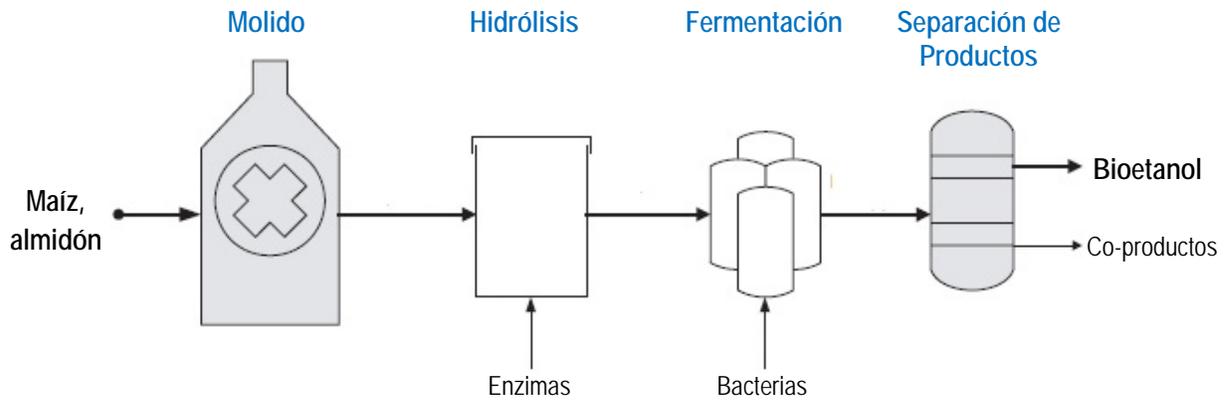


Fig. 3. Diagrama de flujo de la producción del bioetanol a partir del almidón.

Otra fuente de azúcar es la lignocelulosa de la madera, la cual requiere un proceso previo a los enumerados anteriormente, dando origen a un bioetanol de **segunda generación** (Fig. 4).

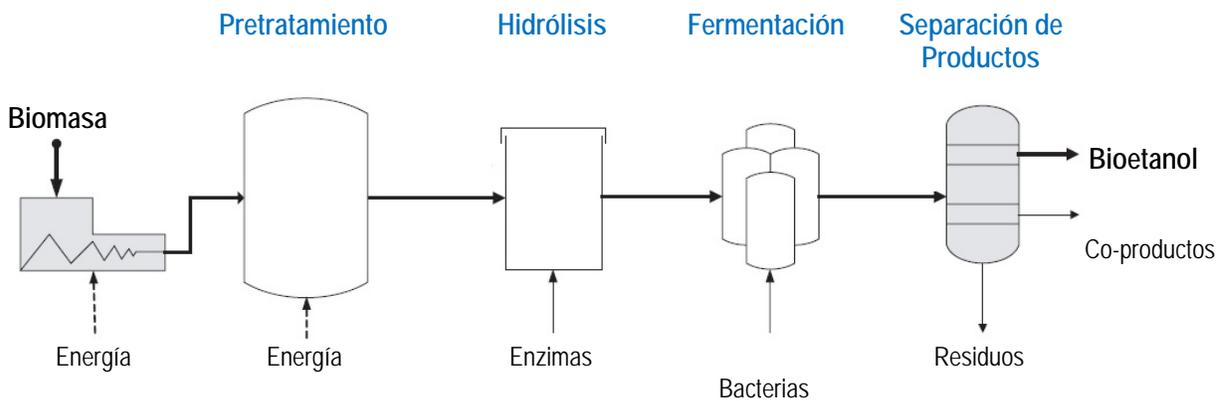


Fig. 4. Diagrama de flujo de la producción del bioetanol a partir de la lignocelulosa.

Capítulo 1. Biocombustibles

La celulosa es descrita como un polisacárido de glucosa y la hemicelulosa como un polímero complejo con diferentes azúcares. La lignina en cambio es una material muy fuerte compuesto de una red tridimensional de compuestos orgánicos (**Fig. 5**).

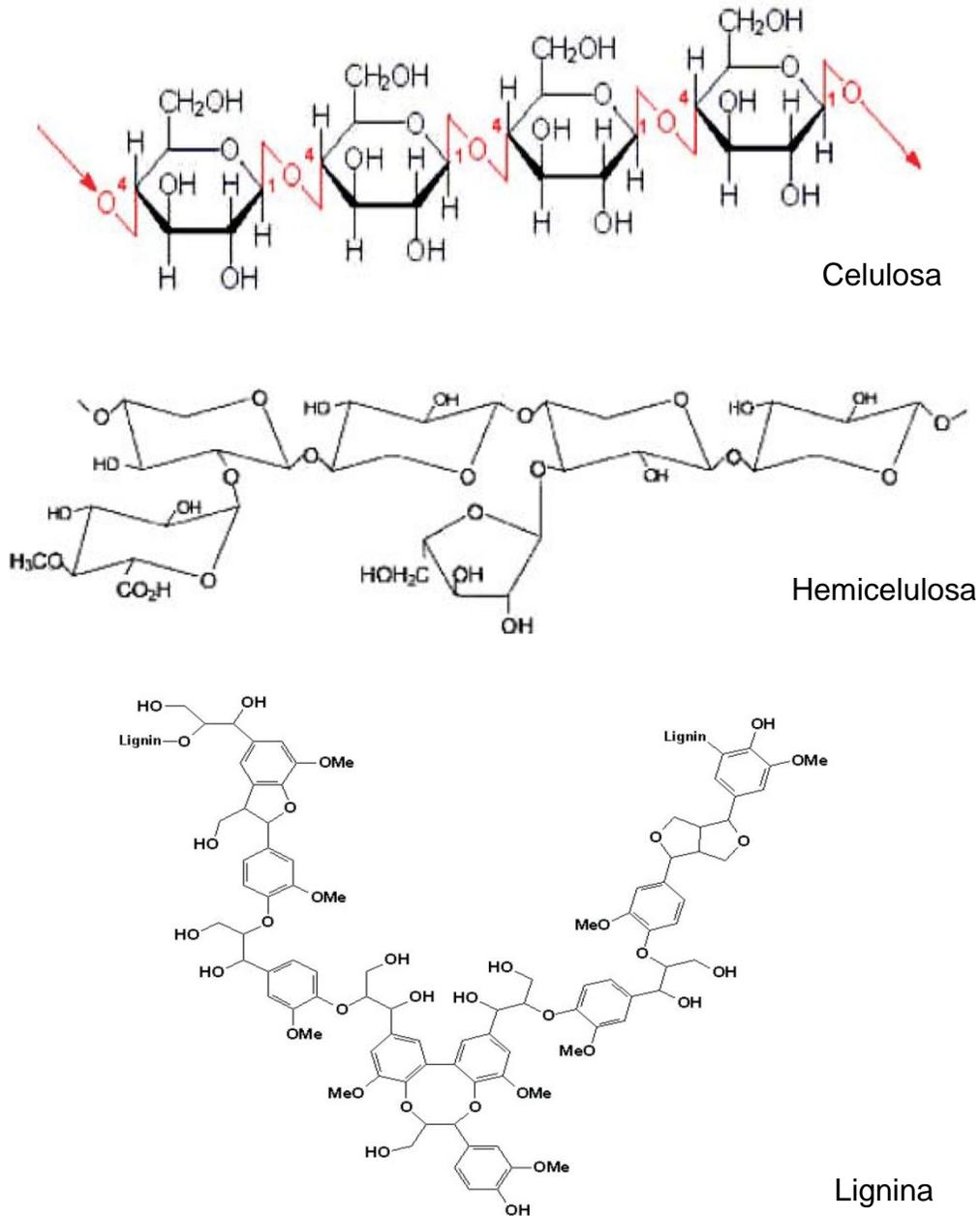


Fig. 5. Estructuras básicas de los componentes de la lignocelulosa.

Capítulo 1. Biocombustibles

Los pretratamientos empleados pueden ser divididos en métodos físicos, químicos y biológicos, aunque hay una fuerte interdependencia entre ellos. Fundamentalmente, el objetivo de todos es volver a la celulosa más susceptible al ataque de las enzimas empleadas para la hidrólisis rompiendo su estructura cristalina, para ello el sello de lignina debe ser roto (**Fig. 6**)

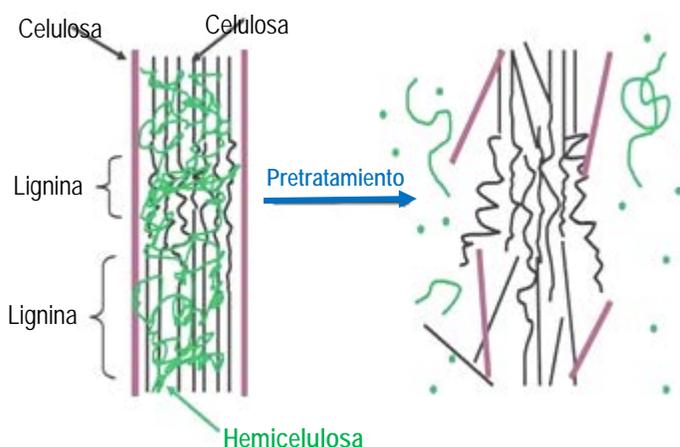


Fig. 6. Efecto del pretratamiento en el material lignocelulósico.

Tercera generación.

Las algas marinas son un ejemplo de la materia prima para la producción de bioetanol de tercera generación. Las algas caféas (Phaeophyta) en particular almacenan polisacáridos los cuales son sustratos para la degradación microbiana. Ellas contienen altas cantidades de carbohidratos que pueden ser fermentados para producir bioetanol.

Otra sustancia presente en grandes cantidades en el mar es la quitina, la cual es un polisacárido que consiste en monómeros de glucosamina. Dicha sustancia es muy dura, semitransparente y se encuentra naturalmente en los exoesqueletos de los crustáceos. Sus características le han dado el nombre de **la celulosa del mar** y tiene potencial para su bioconversión en bioetanol.

Biodiésel

La obtención del biodiésel de **primera generación** requiere de varios procesos (**Fig. 7**):

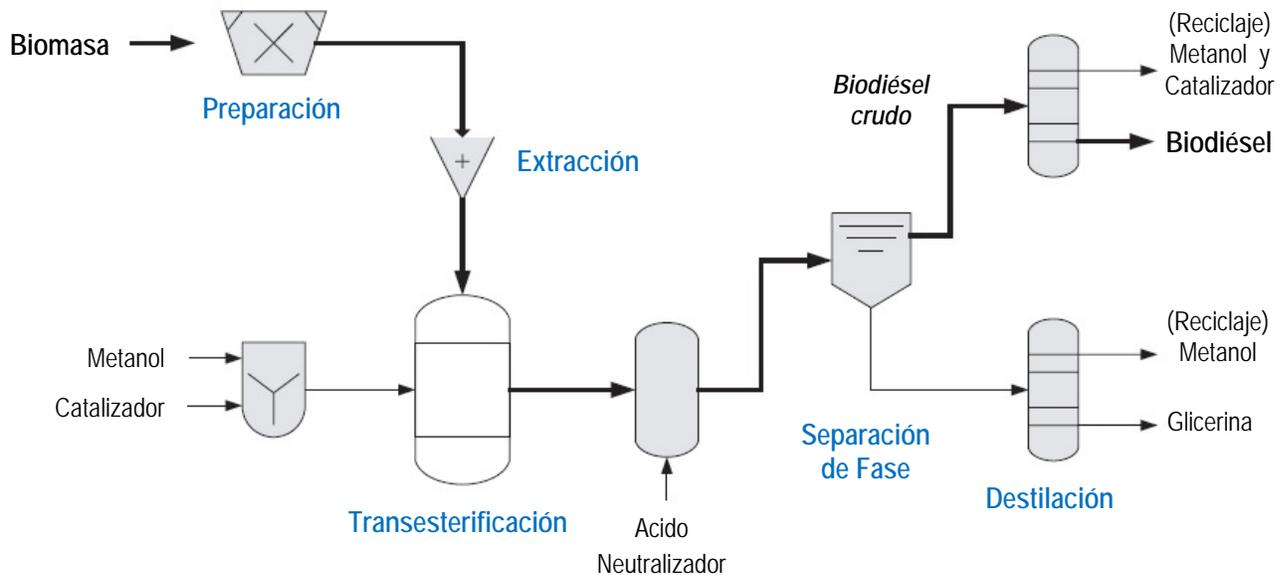


Fig. 7. Diagrama de flujo de la producción de biodiésel de 1ª generación.

- i. Preparación. La semilla de la que se extraerá el aceite debe ser limpiada, secada y descascarada.
- ii. Extracción. El aceite puede ser extraído por presión (semillas) o mediante un solvente (grasa animal).
- iii. Transesterificación. Los triglicéridos en el aceite extraído se hacen reaccionar químicamente en un reactor con un alcohol de cadena corta (como el metanol) en presencia de un catalizador. El biodiésel es producido cuando los triglicéridos son transformados de la estructura molecular de cadenas largas del aceite, en estructuras más pequeñas de cadenas lineales similares a los hidrocarburos del diésel fósil.

Capítulo 1. Biocombustibles

- iv. Separación en fase. Los productos del reactor, el biodiésel y la glicerina son neutralizados, y la fase de biodiésel crudo puede separarse de la fase de glicerina debido a su gran diferencia de densidad.
- v. Destilación. Después de la separación, el exceso de alcohol puede ser removido del biodiésel y la glicerina por destilación.

El metanol es reciclado para usarse nuevamente, mientras la glicerina puede ser purificada y vendida como un producto para otros propósitos industriales.

Segunda generación.

La lignocelulosa de la madera también puede producir un combustible similar al diésel. Esto requiere producir gas de síntesis (CO , H_2 y CO_2) con un subsecuente tratamiento vía el proceso Fischer-Tropsch (FT) [6]. Si los componentes gaseosos son derivados de la biomasa en lugar del carbón, al producto resultante se le agrega el prefijo bio.

Los pasos básicos de la producción de biodiésel de síntesis FT (**Fig. 8**) son:

- i. Pretratamiento → incluye el secado y reducción de tamaño de la biomasa.
- ii. Gasificación → la biomasa pretratada es gasificada mediante oxígeno puro o vapor.

Los compuestos orgánicos (alquitrán), son moléculas pesadas de hidrocarburos que se desarrollan durante esta etapa.

- iii. Limpieza → el gas de síntesis producido contiene impurezas (volátiles, compuestos orgánicos e inorgánicos), los cuales deben ser removidos
- iv. Acondicionamiento → una opción es el craqueo del alquitrán en hidrocarburos más pequeños.

Capítulo 1. Biocombustibles

- v. Síntesis FT → para formar largas cadenas de hidrocarburos de la combinación catalítica de CO y H₂.

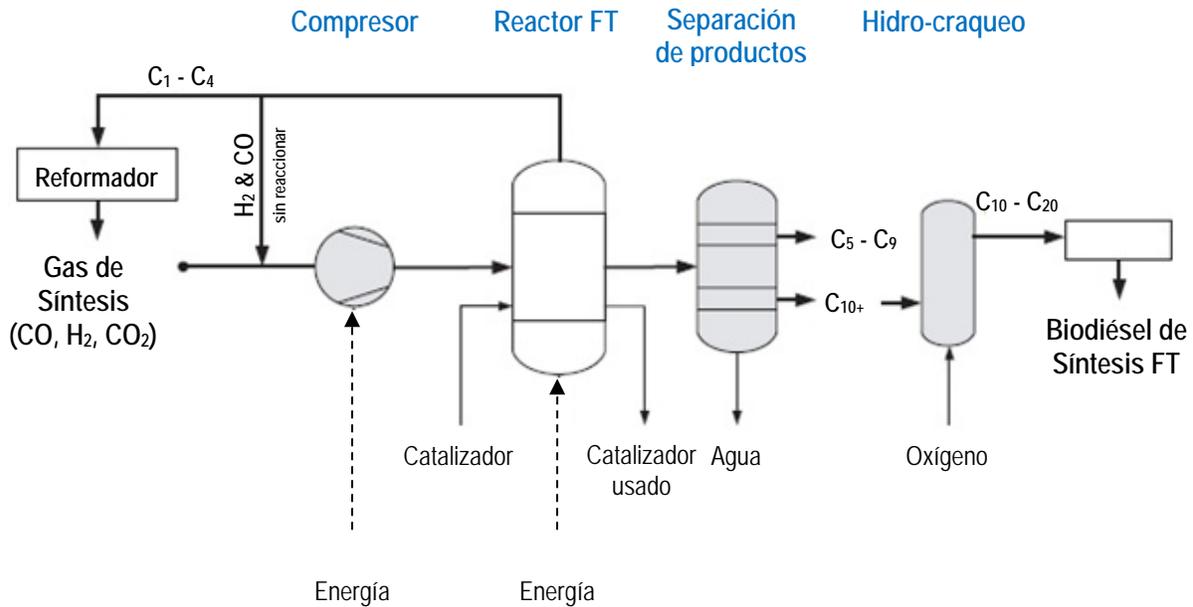


Fig. 8 Diagrama de flujo de la producción del biodiésel de síntesis Fisher-Tropsch.

- i. Mejoramiento → el biodiésel obtenido es mejorado para cumplir los requerimientos del mercado.

Tercera generación

Usar algas como fuente de triglicéridos para el biodiésel tiene la ventaja de una alta producción por hectárea. De acuerdo a HR BioPetroleum, el cultivo del alga produce 15 veces más aceite por hectárea que la palma y la soja (materia prima del biodiésel de 1^a generación) [7].

Un fotoreactor puede producir algas continuamente, pero la concentración de aceite es baja y el costo de producción muy alto. En cambio, la producción de algas en estanques

Capítulo 1. Biocombustibles

abiertos ha resultado en altas tasas de crecimiento con gran contenido de aceite. Sin embargo, el crecimiento del alga está limitado debido a la contaminación del cultivo deseado por otros organismos.

1.3 Modelos exitosos de Producción (Brasil, Estados Unidos y Alemania)

Brasil - Bioetanol

Hace más de tres décadas, la primera crisis petrolera mundial provocó que varios países optaran por reducir su dependencia energética de tal recurso. Por ejemplo, el gobierno de Brasil implementó en 1975 el programa *PRÓ-ALCOOL* para producir etanol a partir de la caña de azúcar.

Bajo el plan del gobierno brasileño, la compañía de petróleo propiedad del estado compraba una determinada cantidad de bioetanol a los productores. Mientras las compañías agroindustriales que producían etanol, recibían incentivos en la forma de bajas tasas de interés.

Además, al fijar el precio del bioetanol para estar por debajo de la gasolina, el gobierno fomentó el crecimiento del mercado. A su vez la industria automovilística brasileña desarrolló vehículos que operan con flexibilidad en el tipo de combustible, ya que el motor funciona con cualquier proporción de gasolina (mezcla **E20 - E25**) y bioetanol (**E100**).

La caña de azúcar contiene ~15% de sucrosa una vez que las cañas son presionadas, cortadas y desfibradas El jugo puede ser procesado en azúcar cristalina o fermentado directamente a bioetanol, como lo hacen muchas plantas industriales en Brasil (**Fig. 9**).

Capítulo 1. Biocombustibles

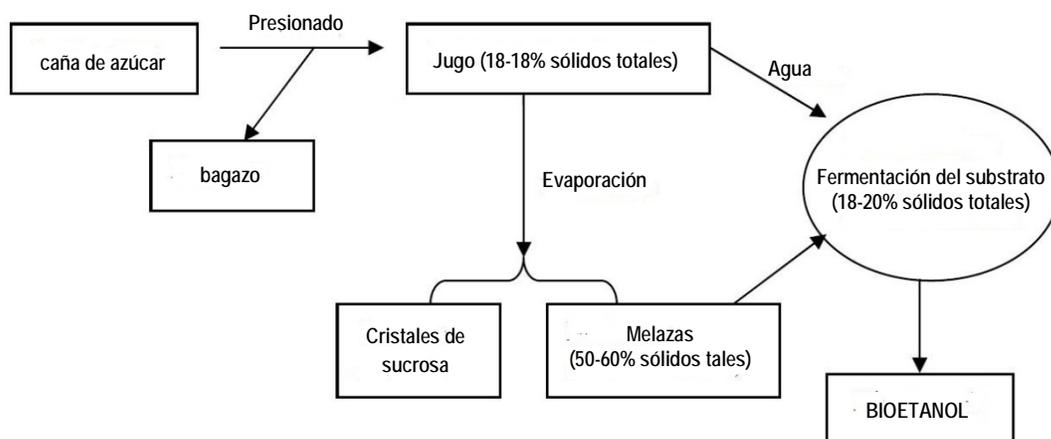


Fig. 9 Procesamiento del jugo de caña para la fermentación de Bioetanol en Brasil.

Para la producción de azúcar, el jugo es clarificado y evaporado para formar cristales que son centrifugados dejando un co-producto líquido espeso como jarabe conocido como melaza. Esta última representa una fermentación media casi completa que comprende azúcares (sucrosa, glucosa, fructosa), minerales, vitaminas, ácidos grasos, etc.

La mayor parte de la sucrosa que tiene la caña de azúcar es removida para la producción del azúcar. Para las fermentaciones de bioetanol la melaza es diluida a 20-25% del total de azúcar, tratada con ácido sulfúrico y calentada a 90 °C para remover las impurezas antes del enfriamiento, centrifugación, ajuste del PH y adición de la levadura.

El jugo de la caña de azúcar puede ser directamente fermentado, seguido por un tratamiento de clarificado por calor (105 °C) o mezclado con melaza en diferentes proporciones.

La industria brasileña de bioetanol tiene más de 30 años, emplea modernos equipos, ha desarrollado su propia tecnología, y los residuos de la caña son utilizados para producir energía en el proceso de destilación, por lo cual el precio del bioetanol brasileño es muy competitivo logrando un alto balance energético (razón energía generada / energía usada en el proceso).

Capítulo 1. Biocombustibles

Estados Unidos - Bioetanol

En Estados Unidos el cultivo seleccionado para la producción de bioetanol ha sido el maíz. Actualmente son el primer productor mundial de bioetanol, lo cual fue criticado y considerado como un factor que influyó en la crisis alimentaria mundial de 2007 a 2008 [8].

Como en el país sudamericano, E.U. implementó desde la década de los 70's incentivos fiscales para lograr el desarrollo económico del bioetanol como combustible. La más reciente aprobada en abril de 2004 fue denominada VEETC (*Volumetric Ethanol Tax Credit*), un subsidio para compañías que mezclaban bioethanol con gasolina, y que expiró el 31 de diciembre de 2011 [9].

Otros programas y regulaciones federales han contribuido también al desarrollo comercial del bioetanol en aquel país. Por ejemplo, el programa ciudades limpias, cuyo objetivo es aumentar el uso de vehículos y combustibles alternativos que disminuyan las emisiones contaminantes en las grandes ciudades.

Estados Unidos utiliza dos procesos de maíz bien diferenciados para producir bioetanol: la molienda seca y la molienda húmeda (**Fig. 10**). En la molienda húmeda, el grano es remojado en agua para separar el cereal en almidón, gluten, proteína, aceite y fibra antes de la conversión del almidón en bioetanol. En la molienda seca, de la cual la mayoría del bioetanol es hecho en aquel país, los granos de maíz son finamente molidos y procesados sin su fraccionación en componentes.

Las principales etapas de la molienda seca para la producción de bioetanol abarcan:

1. Molido. Los granos de maíz son molidos a un polvo fino o jugo.
2. Licuefacción. Este proceso consiste en añadir agua al jugo de maíz e incrementar la temperatura en la mezcla para solubilizar el almidón.
3. Sacarificación. La hidrolisis enzimática del almidón libera azúcares simples, principalmente glucosa.

Capítulo 1. Biocombustibles

4. Fermentación. el almidón hidrolizado es fermentado por levadura a bioetanol, CO₂ y metabolitos secundarios.
5. Destilación. El bioetanol obtenido es destilado a un 96% retirándose con ello residuos sólidos, los cuales pueden ser procesados después en alimento para animales.
6. Dehidratación. El agua remanente de la destilación es removida por un colador molecular para producir alcohol anhidrido.

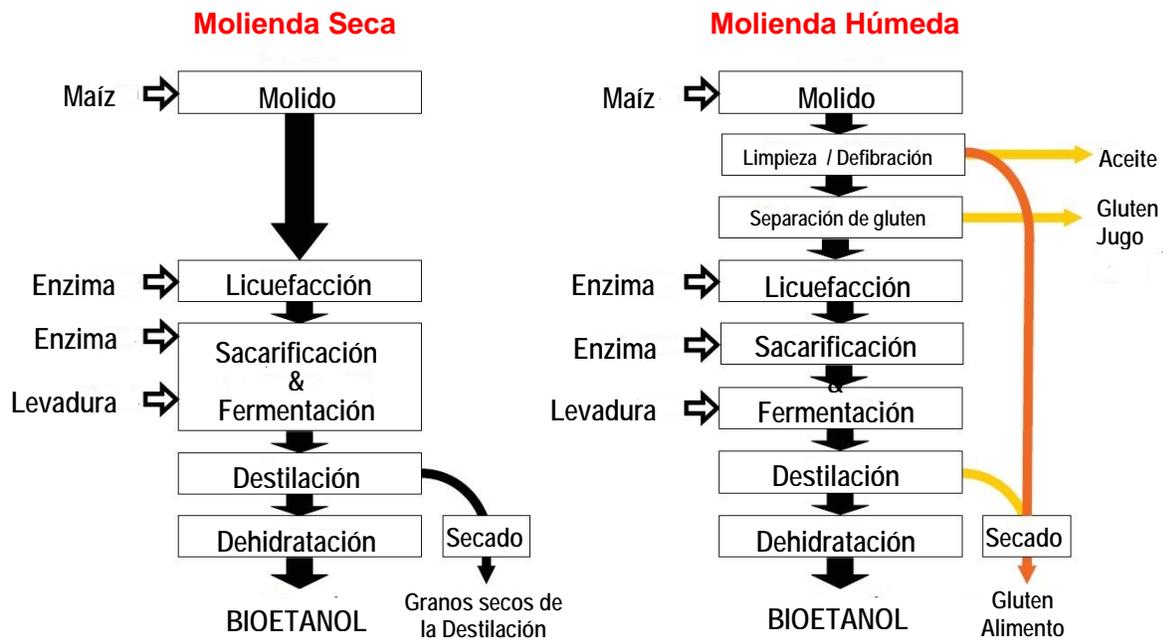


Fig. 10 Procesos de molienda seca y húmeda de maíz para la producción de Bioetanol.

Los avances en tecnología aplicada a tal proceso, permiten que la conversión de maíz en bioetanol sea mucho más eficaz y productiva que en la década de los 80's. Por ejemplo, la disminución de costo de las enzimas utilizadas, así como el incremento en su poder de conversión, ha provocado menores tiempos de procesamiento.

Capítulo 1. Biocombustibles

Alemania - Biodiésel

La industria nacional de biodiésel está bien establecida en el dominio público gracias a un alto nivel de transparencia de los niveles de producción de la materia prima y del biodiésel. Esto también aplica a una multitud de pequeñas compañías - incluyendo la agricultura -, las cuales están involucradas en la comercialización de los combustibles puros.

Alemania ha implementado privilegios de impuestos para los biocombustibles y adoptado directivas de la Unión Europea, como la Promoción de uso de Biocombustibles (2003/30/EC), la cual estipulaba que los países miembros de la Unión Europea debían asegurar que un mínimo del 5.75% de todos los combustibles fósiles usados para el transporte (gasolina y diésel) debían ser reemplazados con biocombustibles para el 2010 [10].

Además, es mandatorio que los productores de biodiésel cumplan con lo concerniente a la calidad del diésel fósil y la mejora en las tecnologías del motor y los tratamientos de los gases de escape.

Aparte del aceite de canela (biomasa principal), se puede utilizar otra materia prima a un grado limitado si los requerimientos de acuerdo al estándar son totalmente cumplidos. Alemania logra tener una alta competitividad gracias a la localización de la materia prima y un efectivo acceso de infraestructura, especialmente a través de ríos navegables y canales.

Dicho país no sólo es líder en la producción mundial de biodiésel, sino también va a la vanguardia del desarrollo de la tecnología en su producción.

Todos estos casos reflejan la necesidad del fuerte apoyo gubernamental necesario para la producción de cualquier biocombustible en el país, logrando crecer y mantenerse únicamente si cuenta con el respaldo de políticas bien elaboradas.

En principio, sustentadas por subsidios que subsanen el mayor costo de producción en comparación con el del combustible fósil, así como permitiendo la reinversión continua en la parte productiva sin olvidar incentivar el consumo del biocombustible.

Capítulo 2.

BIOETANOL Y BIODIESEL

Capítulo 2. Bioetanol y Biodiésel

Este capítulo aborda el bioetanol y el biodiésel, considerados como posibles opciones para el parque vehicular de la capital del país. Aunque no se tiene pensado usarlos en estado puro, un mayor conocimiento de sus características químicas y físicas, permite comprender las ventajas y desventajas de las mezclas con combustibles convencionales.

Los procesos de primera generación mencionados en el capítulo anterior son explicados con mayor detalle, dando un repaso a la normativa internacional desarrollada para su producción y sus emisiones contaminantes. Finalmente, se abordan las emisiones no reguladas, considerando sus características así como los estándares existentes que establecen los límites de exposición recomendados.

2.1 Composición y estructura

El bioetanol es un alcohol de cadena lineal, cuya molécula está compuesta por dos átomos de carbono, un átomo de oxígeno y seis átomos de hidrógeno. La fórmula química corta de dicho compuesto es C_2H_6O . Una notación alternativa es CH_3-CH_2-OH , la cual indica la unión mediante un carbono entre el grupo metílico (CH_3) y el grupo metileno ($-CH_2-$), mientras este último está unido al oxígeno del grupo hidróxilo ($-OH$). Las características de la molécula de bioetanol son representadas mediante su fórmula estructural (**Fig. 11**), y pueden observarse fácilmente mediante un modelo tridimensional (**Fig. 12**).

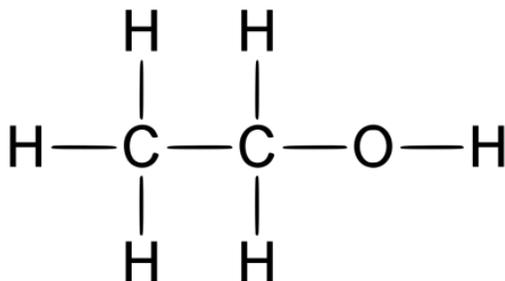


Fig. 11 Fórmula estructural del bioetanol

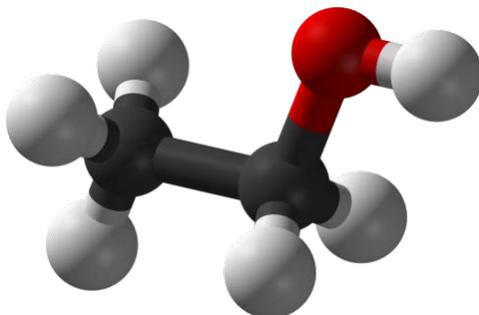


Fig. 12 Modelo tridimensional de la molécula de bioetanol.

El bioetanol es un tetraedro alrededor de un átomo central de oxígeno. Si la molécula fuera perfectamente simétrica, el ángulo del enlace C-O-H debería ser de 109.5 grados [11]. Sin embargo, los enlaces químicos son empujados más cerca entre ellos debido a dos pares solitarios de electrones en el átomo de oxígeno. De esta forma, los ángulos de enlace de la molécula del bioetanol son de aproximadamente 104 grados.

Las características físicas del bioetanol provienen sobre todo de la presencia del grupo hidroxilo y de lo corto de su cadena de carbono. El primero de ellos, hace posible la formación del enlace de hidrógeno, provocando que sea más viscoso y menos volátil que compuestos orgánicos del mismo peso molecular. Además, dicho enlace provoca que el bioetanol puro sea higroscópico, lo cual significa que absorbe fácilmente el agua del aire.

El bioetanol a temperatura y presión ambiental, es un líquido incoloro y volátil. La miscibilidad de dicho biocombustible con agua contrasta con la que poseen los alcoholes de cadena larga (5 o más átomos de carbono), la cual disminuye agudamente conforme el número de carbonos aumenta. Por otra parte, la miscibilidad del bioetanol con los alcanos esta limitada hasta el undecano ($\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_9\text{-CH}_3$ o $\text{C}_{11}\text{H}_{24}$)

Capítulo 2. Bioetanol y Biodiésel

Las mezclas de agua y bioetanol forman un azeotropo alrededor de 89% moles de bioetanol por 11% moles de agua, una relación tal que su composición no puede modificarse por simple destilación. Esto ocurre porque cuando un azeotropo es llevado a su punto de ebullición, el vapor resultante tiene la misma relación de constituyentes que la mezcla original.

Una molécula típica de biodiésel tiene una estructura compuesta por una larga cadena de carbonos con hidrógenos enlazados, y en un extremo posee un éster (**Fig. 13**), el cual es cualquier clase de compuesto orgánico formado de un ácido orgánico y un alcohol.

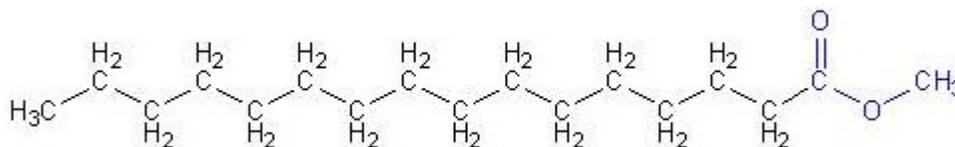


Fig. 13 Fórmula estructural del biodiésel.

La fórmula química corta de este biocombustible depende si está compuesto de ácidos grasos con ésteres metílicos, propílicos o etílicos (**Fig. 14**), aunque sin importar cuales sean su fórmula química será C_nH_mO₂, algunos ejemplos de ello son:

Linoleic acid methyl ester	Linoleato de Metílo
Methyl Linoleate	C ₁₉ H ₃₄ O ₂

Stearic acid ethyl ester	Estereato de Etílico
Ethyl Stearate	C ₂₀ H ₄₀ O ₂

Capítulo 2. Bioetanol y Biodiésel

A temperatura ambiente el biodiésel es un líquido, su color varía entre dorado y marrón oscuro según el tipo de materia prima utilizada para producirlo. Esta última, influye también en la variación de su poder calorífico con respecto al del diésel mineral

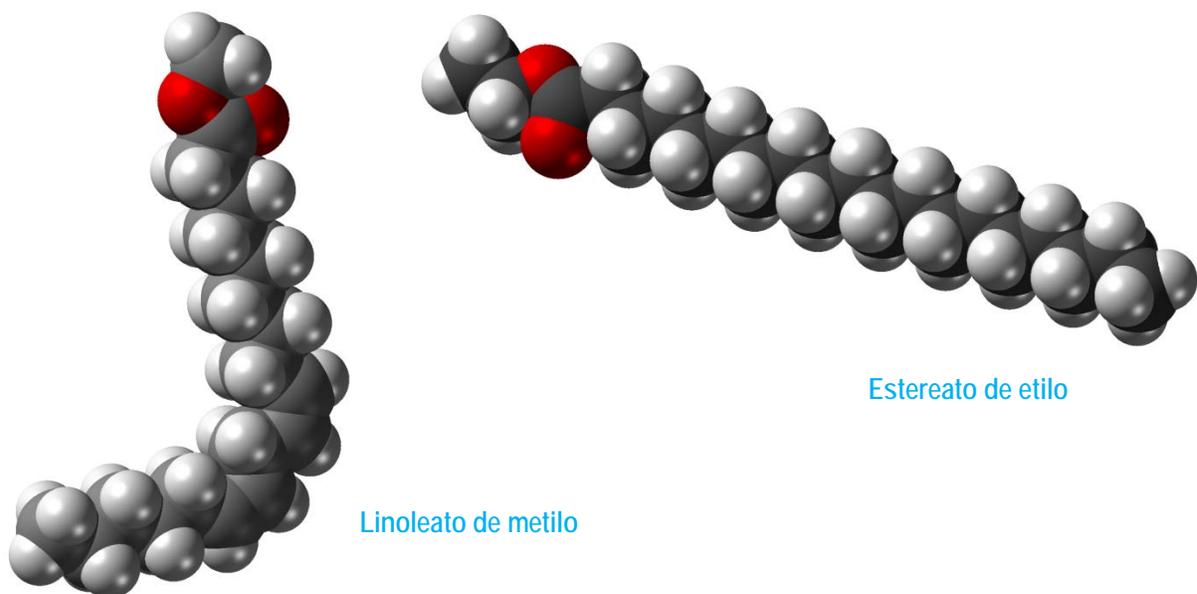


Fig. 14 Modelo tridimensional de la moléculas de biodiésel.

Los tamaños de las moléculas en el biodiésel y el diésel mineral son casi las mismas, pero difieren en su estructura química. Las moléculas de biodiésel consisten casi enteramente de químicos llamados esteres metílicos de ácidos grasos (**FAME** por sus siglas en inglés), los cuales contienen componentes olefínicos no saturados.

Tales diferencias resultan en varias notables diferencias en las propiedades físicas de los dos combustibles, las más significativas son:

1. El biodiésel tiene una mayor lubricidad que el diésel mineral, por lo cual se puede esperar reduzca el desgaste del motor.

Capítulo 2. Bioetanol y Biodiésel

2. El biodiésel prácticamente no contiene azufre, lo cual resulta en una reducción de la contaminación de los motores que usan este biocombustible.
3. El biodiésel tiene un mayor contenido de oxígeno (usualmente 10 a 12%) que el diésel mineral [12]. Esto ayuda a disminuir la contaminación, pero también reduce ligeramente la potencia del motor.
4. El biodiésel tiende a congelarse a bajas temperaturas más fácilmente que el diésel mineral, lo cual se traduce en un problema mayor para el arranque del motor a bajas temperaturas.
5. El biodiésel es más químicamente activo como un solvente que el diésel mineral, en consecuencia, es más agresivo con materiales que normalmente son considerados seguros para el diésel mineral.
6. El Biodiésel es mucho menos tóxico que el diésel mineral.

2.2 Proceso de fabricación de 1ª Generación

Bioetanol

Las rutas de conversión biológicas para la producción de bioetanol de primera generación están bien establecidas, dependiendo principalmente del cultivo utilizado para obtenerlo: aquellos ricos en azúcares y los que son ricos en almidón. El proceso para ambos es muy similar, siendo su principal diferencia, que los cultivos ricos en almidón requieren de un proceso adicional al inicio de la producción, llamado hidrólisis.

A partir de los azúcares

Usualmente en los ingenios de azúcar se aplican hasta tres cristalizaciones de las que se va retirando el azúcar. Cada proceso de cristalización es seguido por una separación de los cristales de sacarosa del llamado licor madre o miel, mediante centrifugación.

Se puede obtener bioetanol a partir del jugo de caña o de las melazas obtenidas después de cada cristalización. En el primer caso, todo el jugo de caña se destina a la producción de bioetanol (sin que se genere azúcar), mientras que en los demás, se obtienen azúcar y bioetanol.

Si se trata del jugo de la caña de azúcar solamente, primeramente se requiere un proceso de molienda para extraerlo.

A continuación el jugo se somete a una fraccionación, la cual reduce el tamaño de los azúcares para que tengan 6 carbonos (hexosas). En dicho proceso de separación, la mezcla es dividida en un número de pequeñas cantidades llamadas fracciones, cuya composición cambia de acuerdo a un gradiente.

Así pueden ser metabolizadas por células de levadura o bacterias para fermentarlas, obteniendo bioetanol y otros productos (como la glicerina). Este tipo de fermentación

Capítulo 2. Bioetanol y Biodiésel

trabaja directamente con los azúcares. La ecuación química de este proceso, sintetiza la conversión de la glucosa ($C_6H_{12}O_6$) a bioetanol (C_2H_5OH), que produce también dióxido de carbono (CO_2):



Finalmente, se separan mediante calor, el bioetanol del agua y de los demás componentes líquidos presentes en la mezcla. Aprovechando que el bioetanol tiene un punto de ebullición menor al del agua, al calentarse se evapora y se separa. Este proceso debe obtener bioetanol anhidro, es decir, bioetanol sin agua, lo que equivale a una pureza de entre el 99.5% y el 99.9% mediante una destilación simple.

A partir del almidón

Para obtener bioetanol a partir del almidón, es necesario romper las cadenas de ese polisacárido para obtener jarabe de glucosa, el cual se puede convertir en bioetanol mediante la fermentación.

La ruta de conversión empieza con la molienda del maíz hasta reducirlo a una partícula fina, de la cual extraer el almidón de los granos de maíz. A esto le sigue un proceso de licuefacción, cuyo producto es una solución de almidón que contiene dextrinas (oligosacáridos compuestos por varias unidades de glucosa), y pequeñas cantidades de glucosa. El almidón licuado se somete entonces a una sacarificación a menores temperaturas, la cual hidroliza las dextrinas en glucosa, como lo presenta la siguiente ecuación.



A partir de esa glucosa, se realiza la fermentación por medio de la adición de levadura para obtener bioetanol (ver **Fig. 15**).

Capítulo 2. Bioetanol y Biodiésel

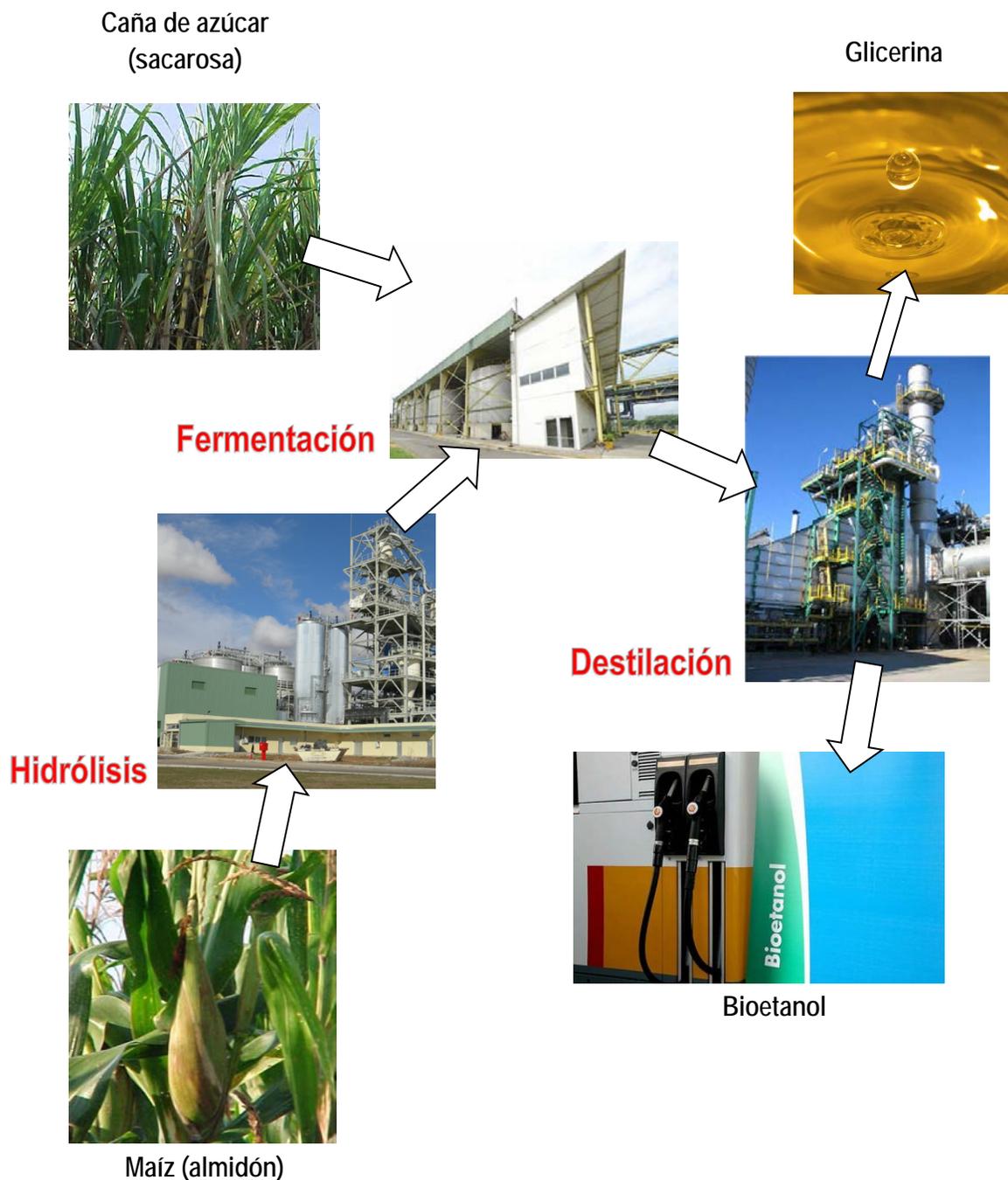


Fig. 15 *Rutas de conversión de la sacarosa (caña de azúcar) y el almidón (maíz) en bioetanol y co-productos.*

Capítulo 2. Bioetanol y Biodiésel

Biodiésel

La ruta de conversión biológica para el biodiésel de primera generación puede ser reproducida fácilmente, aunque la calidad del combustible resultante varía de acuerdo al equipo e instalaciones utilizadas. Las características variables de dicho biocombustible son el contenido energético por litro, la viscosidad y las propiedades lubricantes.

Existen dos rutas de conversión dependiendo si se trata de aceite vegetal o grasa animal (ver **Fig. 16**).

La semilla vegetal es limpiada, secada y descamada para poder extraer el aceite mediante presión mecánica o de manera química mediante un solvente. Esta última es más eficiente, pero requiere de equipos más caros y por ello es más apropiada para procesos de alto volumen. El prensado mecánico, aunque extrae menos aceite primario, es más barato y se puede hacer de manera manual usando instrumentos de bajo costo.

Si se trata de sebo animal, la grasa se extrae mediante el molido y cocción de la materia prima. Hay dos tipos de grasa que pueden emplearse: la primera es el sebo directamente retirado de la carne de los animales; el otro incluye, además de lo anterior, cartílagos y huesos. Una vez obtenido el caldo con la grasa, ésta debe separarse por técnicas como el filtrado, el prensado, la centrifugación o la extracción usando solventes. El resultado final es la grasa sin agua ni partículas.

En el caso del aceite de cocina usado, se filtra primero para eliminar las impurezas y restos de alimento, y quitar el agua que pueda contener mediante calentamiento.

Generalmente, los aceites que provienen de plantas tienen menos de 5% de ácidos grasos libres, mientras que los aceites de cocina usados o las grasas animales tienen más de 5%. En este último caso, se requiere de un proceso previo llamado esterificación para bajar los ácidos grasos libres a menos de 5%

Capítulo 2. Bioetanol y Biodiésel

Este proceso es especialmente importante para el caso del biodiésel proveniente de grasas animales o aceites de reuso, puesto que el nivel de ácidos grasos libres presentes en la materia prima varía de lote en lote. Si dicho nivel es alto, el biodiésel resultante se hará sólido ante temperaturas bajas.

Una vez que se tiene el aceite base limpio, se le somete al proceso principal, conocido como transesterificación, en el que se separan sus componentes para obtener biodiésel y glicerina. Este proceso se realiza en un reactor mezclando el aceite con una pequeña parte de metanol en presencia de algún catalizador base (como el hidróxido de sodio – NaOH–).

Los productos del reactor, biodiésel y glicerina son neutralizados, de manera que la fase de biodiésel crudo puede separarse fácilmente de la glicerina, debido a la gran diferencia entre sus densidades.

Después de la separación, el exceso de alcohol es removido del biodiésel y se dirige a una fase de lavado, mientras que la glicerina es sometida a un proceso de refinación. A esta última, se le retira la mayor parte del metanol empleado en la transesterificación, reciclándola después al comienzo del proceso.

El lavado se hace mediante agua y consiste en retirar del biodiésel cualquier sustancia soluble, aprovechando que los aceites como el biodiésel no son solubles en agua. Entre otras cosas, de esta fase se retira más glicerina, que puede enviarse al proceso de refinación de la misma. Finalmente, el agua que pudo quedarse del proceso de lavado, se quita del biodiésel calentándolo.

Capítulo 2. Bioetanol y Biodiésel



Fig. 16 Rutas de conversión del aceite vegetal y la grasa animal en biodiésel y co-productos.

2.3 Normatividad Internacional

La producción de bioetanol ha impulsado el desarrollo de estándares en los países productores del mismo. Brasil al ser el primero de ellos, también encabezó dichos esfuerzos y eso mismo provocó que su especificación sirviera de base para los demás. Las diferencias regionales existen como resultado de los desarrollos del mercado, las condiciones climáticas en cada región y la biomasa empleada.

Actualmente no hay una especificación técnica que constituya un impedimento para un posible intercambio comercial. Sin embargo, si Brasil y Estados Unidos desearan exportar a Europa sería necesario agregar un secado adicional a sus procesos y ello podría traducirse en una pérdida de productividad.

A continuación se enlistan las especificaciones que son muy similares, por lo que fácilmente podría establecerse un estándar internacional de bioetanol entre los países

Tabla 2. Especificaciones viables para crear un estándar internacional [13]

Parámetro	Valor recomendado
<i>Color</i>	No usar para exportar
<i>Apariencia</i>	Clara y brillante, visible libre de contaminantes suspendidos o precipitados
<i>Densidad</i>	Medir y reportar la densidad y la temperatura
<i>Sulfatos</i>	4 mg/kg máximo
<i>Contenido de azufre</i>	10 mg/kg máximo
<i>Cobre</i>	0.1 mg/kg máximo
<i>Hierro</i>	No necesita especificación si se adopta la conductividad
<i>Sodio</i>	No necesita especificación si se adopta la conductividad
<i>Conductividad eléctrica</i>	500 uS/m máximo

Capítulo 2. Bioetanol y Biodiésel

Otro grupo de especificaciones presentan diferencias en sus valores, pero pueden ser consideradas para lograr un acuerdo.

Tabla 3. Especificaciones que pueden ser consideradas para crear un acuerdo internacional [13]

Parámetro	Valor recomendado
Contenido de bioetanol	No hay consenso (96.8 a 8 % vol.) mínimo
Acidez	0.0038 a 0.007 % masa máximo
Fósforo	0.5 mg/kg máximo
pHe	6.5 - 9.0
Cloro	1 mg/kg máximo

El único parámetro que es muy diferente es el contenido de agua, el cual está establecido a diferentes niveles debido a la variación de concentraciones de bioetanol permitidas en la gasolina, así como las diferencias en su distribución.

Durante el proceso de conversión de los aceites vegetales y las grasas animales en biodiésel, muchas reacciones no deseadas y sustancias químicas pueden desarrollarse y contaminar el combustible. Por lo tanto, diversos países productores de dicho biodiésel han desarrollado una normativa propia para asegurar la calidad de su producto.

El estándar europeo para los ésteres metílicos de ácidos grasos (**FAME**) usados como combustible automotriz, establecido en el 2003 por el Comité Europeo de Normalización (**CEN**) es conocido como **EN 14214** [14]. Este último establece los límites y los métodos de medición para los **FAME**, generalmente conocidos como biodiésel, que puede ser usado en su estado puro o en mezclas con el diésel europeo. El estándar del **CEN** para el combustible diésel **EN 590**, requiere que toda mezcla con biodiésel debe cumplir el estándar **EN 14214**.

Capítulo 2. Bioetanol y Biodiésel

Los Estados Unidos de América (**EUA**) han escogido usar las especificaciones desarrolladas por la *ASTM International*, tanto para el diésel como para el biodiésel. Los esfuerzos para desarrollar una especificación del biodiésel en aquel país iniciaron en 1993, en el Comité D02 sobre Productos y Lubricantes del Petróleo.

Una especificación provisional para el biodiésel puro fue aprobada por la **ASTM** en 1999, y en el 2001 la versión final conocida como **ASTM D6751- Estándar de Especificación para el Biodiésel B100 para Combustibles Medianamente Destilados**.

La especificación **ASTM D7467** es para mezclas diésel que contienen entre 6 y 20% de biodiésel, con ésta los fabricantes de motores diésel pueden probar diésel B20 en los motores para asegurar su óptimo rendimiento.

Una comparación entre las especificaciones de biodiésel mencionadas anteriormente, se presenta en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Comparación entre las especificaciones de biodiésel

Propiedad	EN14214	ASTM D6751*	ASTM D7467*
Contenido de éster	✓		
Densidad a 15°C	✓		
Viscosidad a 40°C	✓	✓	
Punto de inflamación	✓	✓	✓
Contenido de azufre	✓	Grado S15 y S500	Grado S15 y S500
Residuo carbonoso	✓	✓	✓
Número de Cetano	✓	✓	✓
Cenizas sulfatadas	✓	✓	
Contenido de agua	✓	✓	✓
Contaminación total	✓		

Capítulo 2. Bioetanol y Biodiésel

Corrosión en lamina de Cu	√	√	√
Estabilidad a la oxidación, 110 °C	√		
Valor ácido	√	√	√
Índice de yodo	√		
Metiléster linoleico	√		
Metiléster polinsaturado	√		
Contenido en metanol	√		
Contenido en monoglicéridos	√		
Contenido en diglicéridos	√		
Contenido en triglicéridos	√		
Glicerina Libre	√	√	
Glicerina Total	√	√	
Metales grupo I (Na + K)	√		
Metales grupo II (Ca+Mg)	√		
Contenido en fósforo	√	√	

A continuación, se brinda una breve descripción de algunos de los parámetros incluidos por las especificaciones para el biodiésel.

El **residuo carbonoso** indica la presencia de impurezas y depósitos en la cámara de combustión del motor, y también es un indicador de la cantidad de glicéridos, ácidos grasos libres y residuos del catalizador de la reacción de transesterificación.

Las **cenizas sulfatadas** son una medida de la ceniza formada de compuestos metálicos inorgánicos. Después de la combustión del biodiésel, en adición al CO₂ y el H₂O se forma una cantidad de ceniza de hidrocarburos no quemados e impurezas inorgánicas (p.e. impurezas metálicas).

Capítulo 2. Bioetanol y Biodiésel

El **contenido de agua** es un indicador de la pureza del biodiésel, este último debe ser secado después de su lavado con agua para obtener una concentración debajo de 500 ppm.

La **corrosión de lámina de cobre** es un indicador de la corrosividad del biodiésel, así como de la presencia de ácidos grasos, derivados de materiales que no entran en la reacción durante el proceso de producción.

El **valor ácido**, también llamado número de neutralización, es la masa de hidróxido de potasio (KOH) en miligramos requerida para neutralizar los constituyentes ácidos en una muestra de un gramo de biodiésel.

El **índice de yodo** es una medida de la total insaturación de los ácidos grasos, medida en gramos de yodo por cada 100 gramos de muestra de biodiésel.

La **glicerina libre** es nivel de glicerina no enlazada presente en el biodiésel. Su presencia se debe a un proceso de separación insuficiente de la etapa de lavado del biodiésel.

La **glicerina total** corresponde al nivel de glicerina enlazada y no enlazada presente en el combustible. Niveles bajos significan que se ha producido un alto grado de conversión en aceite o grasa, por lo tanto se han formado gran cantidad de monoésteres.

En cuanto a las emisiones contaminantes de bioetanol y biodiésel, estas se derivan de las normas existentes para emisiones criterio desarrolladas para los combustibles de origen fósil, gasolina y diésel. [15] [16] [17]

2.4 Emisiones no reguladas

Aldehídos

Los **aldehídos** son compuestos orgánicos caracterizados por poseer el grupo funcional **-CHO**. Están presentes en numerosos productos naturales, un ejemplo de ello es la glucosa, que existe en una forma abierta que presenta un grupo aldehído. Por eso, dichos compuestos resultan de la combustión del bioetanol.

Nomenclatura

Se nombran sustituyendo la terminación **-ol** del nombre del hidrocarburo por **-al**. Los aldehídos más simples (metanal y etanal), tienen otros nombres que no siguen el estándar de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (**IUPAC**), aunque son más utilizados y conocidos (**Tabla 5**) [18].

Tabla 5. Nomenclatura, fórmula química y punto de ebullición de los aldehídos más simples.

Número de carbonos	Nomenclatura IUPAC	Nomenclatura trivial	Fórmula	P.Ebull. °C
1	Metanal	Formaldehído	HCHO	-21
2	Etanal	Acetaldehído	CH ₃ CHO	20.2
3	Propanal	Propionaldehído	C ₂ H ₅ CHO	48.8
4	Butanal	n-Butiraldehído	C ₃ H ₇ CHO	75.7
5	Pentanal	n-Pentaldehído	C ₄ H ₉ CHO	103
6	Hexanal	n-Hexaldehído	C ₅ H ₁₁ CHO	
7	Heptanal	n-Heptaldehído	C ₆ H ₁₃ CHO	
8	Octanal	n-Octaldehído	C ₇ H ₁₅ CHO	
9	Nonanal	n-Nonialdehído	C ₈ H ₁₇ CHO	
10	Decanal	n-Decialdehído	C ₉ H ₁₉ CHO	

Formula general: **C_nH_{2n+1}CHO** (*n* = 0, 1, 2, 3, 4, ...)

Capítulo 2. Bioetanol y Biodiésel

La presencia de los aldehídos más simples puede apreciarse en cosas de la vida cotidiana. Por ejemplo, el acetaldehído se cree responsable en gran medida de los síntomas de la resaca tras la ingesta de bebidas alcohólicas. En cambio, el formaldehído es un conservante que se encuentra en algunas composiciones de productos cosméticos.

Este último, ha demostrado poseer un poder cancerígeno en los experimentos hechos con animales. Además, se utiliza en la fabricación de numerosos compuestos químicos como: la baquelita, la melamina etc.

Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos

Los **HAP's** son un grupo de sustancias químicas que se forman durante la combustión incompleta de un biocombustible, debido a la materia orgánica empleada para producirlo. Estas sustancias se encuentran de forma natural en el medio ambiente, pero también pueden ser producidas como compuestos individuales para efectos de investigación. Sin embargo, las mezclas encontradas en los productos de combustión no pueden ser producidas en forma sintética.

Como sustancias químicas puras, los **HAP's** existen generalmente como sólidos incoloros, blancos o verdes amarillosos pálidos con un olor leve y agradable. Mientras que como mezclas complejas pueden ser parte de productos de la combustión, p.e. el hollín.

Los **HAP's** se encuentran en todo el medio ambiente: el aire, el agua y el suelo. Pueden encontrarse en el aire bien sea adheridos a partículas de polvo, como sólidos en el suelo o en los sedimentos.

La aplicación de los **HAP's** incluye la producción de diferentes artículos: tintas, plásticos y pesticidas; la construcción de carreteras (asfalto) y el recubrimiento de techos (alquitrán).

Capítulo 2. Bioetanol y Biodiésel

Existen más de 100 clases diferentes de **HAP's** con efectos en la salud, aunque no son exactamente los mismos. En la **Tabla 6** se indican las propiedades físico-químicas de 17 **HAP's**, considerados los más nocivos y con la mayor información.

Tabla 5. Propiedades físico-químicas de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos [19].

HAP	CAS	PM (g/mol)	Pf (°C)	Pe (°C)	Pv (mm Hg)
Acenafteno	83-29-9	154,21	95	96,2	$4,47 \cdot 10^{-3}$
Acenaftileno	208-96-8	152,20	92	270	0,029 (20°C)
Antraceno	120-12-7	178,2	218	342	$1,7 \cdot 10^{-5}$ (25 °C)
Benzo(a)antraceno	56-55-3	228,29	159	400	$2,2 \cdot 10^{-8}$ (20 °C)
Benzo(a)pireno	50-32-8	252,3	179	311	$5,6 \cdot 10^{-9}$
Benzo(e)pireno	192-97-2	252,3	179	311	$5,7 \cdot 10^{-9}$ (25 °C)
Benzo(b)fluoranteno	205-99-2	252,3	168,3	-	$5 \cdot 10^{-7}$ (20-25 °C)
Benzo(j)fluoranteno	205-82-3	252,3	166	-	$1,5 \cdot 10^{-8}$
Benzo(k)fluoranteno	207-08-9	252,3	215,7	480	$9,59 \cdot 10^{-11}$ (25 °C)
Benzo(g,h,i)perileno	191-24-2	276,34	273	550	$1,03 \cdot 10^{-10}$ (25 °C)
Criseno	218-01-9	228,3	256	448	$6,3 \cdot 10^{-7}$ (25 °C)
Dibenzo(a,h)antraceno	53-70-3	278,35	262	-	$1 \cdot 10^{-10}$ (20 °C)
Fenantreno	85-01-8	178,2	100	340	$6,8 \cdot 10^{-4}$ (25 °C)
Fluoranteno	206-44-0	202,26	11	375	$5 \cdot 10^{-6}$ (25 °C)
Fluoreno	86-73-7	166,2	117	295	$3,2 \cdot 10^{-4}$ (20 °C)
Indeno(1,2,3-c,d)pireno	193-39-5	276,3	163,6	530	$1 \cdot 10^{-6}$ (20 °C)
Pireno	129-00-00	202,3	156	404	$2,5 \cdot 10^{-6}$ (25 °C)

Capítulo 2. Bioetanol y Biodiésel

CAS: identificación numérica asignada por el Chemical Abstract Service, que pertenece a la Sociedad Química Americana, que recoge más de 23 millones de compuestos químicos diferentes.

PM: peso molecular (g/mol).

Pf: punto de fusión (°C).

Pe: punto de ebullición (°C).

Pv: presión de vapor. Presión que ejercen las moléculas en estado vapor que han sido proyectadas fuera de la masa de la disolución en la que se encuentre la sustancia. Se mide en unidades de presión, siendo la conversión de milímetros de mercurio a pascales: presión (Pa) = 133,28 · presión (mmHg). En general, los hidrocarburos aromáticos policíclicos presentan una presión de vapor baja, lo que posibilita que puedan viajar largas distancias en la atmósfera antes de regresar a la tierra en forma de agua de lluvias o por asentamiento de partículas.

La diferencia de los **HAP's** mencionados con los **NHAP's** considerados para este trabajo, es la adición de nitrógeno a la molécula respectiva, por eso al nombre de cada compuesto se antepone el prefijo **nitro-**.

Actualmente, no existen estándares límites para las concentraciones de **HAP** ni en el aire, ni en el escape de los motores. Sin embargo, algunos países europeos contemplan valores máximos no obligatorios, de exposición: p.e. al benzo(a)pireno. La directiva de la Unión Europea **2004/107/CE [20]** propone una concentración máxima de dicho compuesto de **1ng/m³**, promediado a lo largo de un año, en el material particulado de diámetro menor o igual a 10 micras , **PM 10**.

Además, la preocupación creciente por el peligro que supone el contacto con los **HAP's**, se ve reflejada en la sugerencia de la Directiva Europea que cada estado miembro supervise la concentración en el aire de benzo(a)antraceno, benzo(a)fluorantreno, benzo(k)fluroranteno, dibenzo(ah)antraceno e indeno(123-cd)pireno, como posibles compuestos perjudiciales, además del benzo(a)pireno.

Capítulo 3.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Capítulo 3. Desarrollo Experimental

La parte experimental estuvo conformada por pruebas en campo y en laboratorio. La planeación y desarrollo de las primeras ha sido explicada ampliamente en trabajos previos, pero la información obtenida solo fue utilizada para estimar las emisiones criterio. Este trabajo propone una nueva metodología, la cual amplía la aplicación mencionada a las emisiones no reguladas. Por eso, se requirió primeramente la identificación y estimación de los niveles de emisión no regulados, Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos y Aldehídos.

A diferencia de las emisiones reguladas, no es posible efectuar ensayos a bordo de un vehículo, ni tampoco obtener emisiones no reguladas en tiempo real. De tal manera, que se debieron realizar pruebas en laboratorio, efectuando un muestreo de las partículas emitidas por la combustión del biodiésel o la aplicación de la espectrometría en infrarrojo a las emisiones producto de la combustión del bioetanol.

Este capítulo describe en primer término, los pasos seguidos en la preparación de las mezclas de combustibles convencionales con biocombustibles. A continuación, aborda el proceso de planeación y el desarrollo de los ensayos realizados con dinamómetros de chasis y de banco. Finalmente, los principios de funcionamiento y operación de los equipos utilizados en la parte experimental son descritos brevemente.

3.1 Preparación de mezclas E6, B5, B10 y B20

Se utilizaron dos biocombustibles de fabricación nacional: bioetanol obtenido a partir de **¿caña de azúcar?**, por el Instituto de Biotecnología de la **UNAM** (Cuernavaca, Morelos), así como biodiésel producido a partir principalmente de sebo de res, por la empresa **Grupo Energéticos** (Cadereyta, Nuevo León). Los combustibles fósiles utilizados fueron provistos por **PEMEX**: gasolina y diésel, mientras que para las mezcla de bioetanol **E6**: gasolina primaria, la cual diferente a la vendida en las estaciones de servicio porque no contiene aditivos.

Capítulo 3. Desarrollo Experimental

Las mezclas de biocombustible son nombradas con una letra y un número. La primera indica el biocombustible usado para la mezcla (**E** - si es Bioetanol y **B** - si es Biodiésel), mientras el segundo, corresponde al porcentaje en volumen de biocombustible del total de la mezcla.

Mezcla de Bioetanol

La mezcla **E6** requiere tener 6% bioetanol y 94% de gasolina en volumen del total. Para mezclar dichos combustibles se utilizó un depósito de 20 litros, vertiendo primero el volumen de gasolina primaria y a continuación el de bioetanol (**Foto 1**). La mezcla resultante fue agitada finalmente, para homogeneizarla.

Para preparar 20 litros de la mezcla **E6**, los volúmenes de 1.2 litros de bioetanol y 18.8 litros de gasolina primaria fueron medidos con recipientes de grado A. Asimismo, empleando los mismos recipientes, el depósito mencionado fue graduado cada litro

Mezclas de Biodiésel B5, B10 y B20

El procedimiento fue similar a lo hecho con la mezcla **E6**, aunque se prepararon en un depósito de 50 litros. En este caso, se prepararon tres mezclas: **B5** con 5% de biodiésel y 95% de diésel **PEMEX**, **B10** con 10% de biodiésel y 90% de diésel **PEMEX**, así como **B16** con 16% de biodiésel y 84% de diésel **PEMEX**.

Entonces, los volúmenes fueron: 2.5 lts con 47.5 lts (**B5**), 5 lts con 45 lts (**B10**) y 8 lts con 42 lts (**B16**). No importando la mezcla, se vertió primero el diésel **PEMEX** y a continuación el biodiésel (**Foto 2**), agitando la mezcla resultante para homogeneizarla.

Capítulo 3. Desarrollo Experimental



Foto 1. Preparación de la mezcla de bioetanol E6.



Foto 2. Preparación de las mezclas de biodiésel.

Capítulo 3. Desarrollo Experimental

3.2 Planeación y desarrollo de las pruebas.

Planeación de las pruebas

En campo

Los ensayos en campo se realizaron con un camión repartidor de refrescos (**Fig. 17**), vacío y totalmente cargado. Dicho vehículo contaba con un motor diésel, de manera que se utilizaron mezclas de biodiésel **B5**, **B10** y **B20**, así como diésel **PEMEX** para establecer una línea base.



Fig. 17. Camión repartidor de refrescos utilizado para las pruebas en campo con biodiésel.

El recorrido escogido para probar los combustibles mencionados estuvo localizado dentro de C.U. (**Fig. 18**). La distancia recorrida fue de 7.3 km, siguiendo un perfil de tiempo vs velocidad variable (**Fig. 19**), ya que el camión circuló siguiendo tramos rectos, curvas y cambios de nivel para lograr diferentes condiciones de operación del motor.

Capítulo 3. Desarrollo Experimental

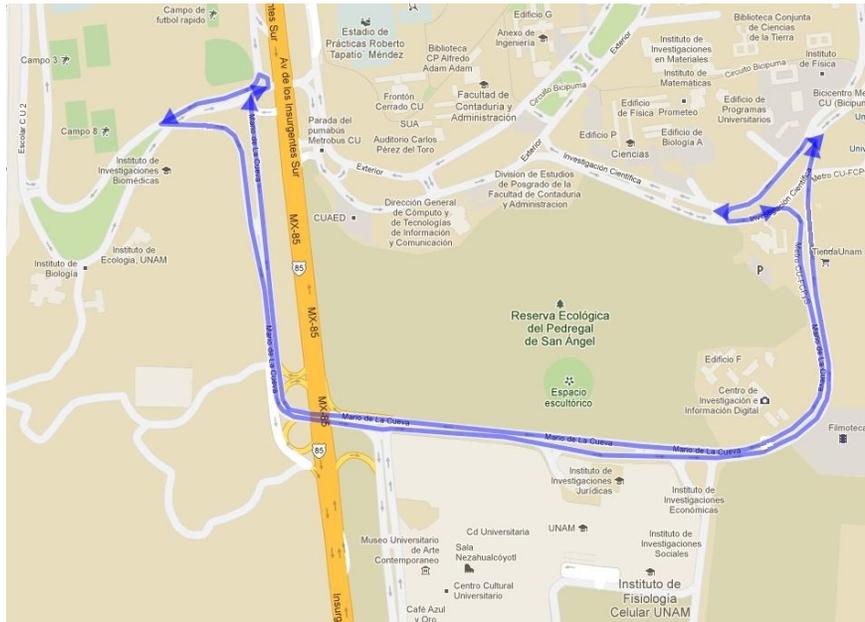


Fig. 18. Recorrido dentro de CU, UNAM utilizado para las pruebas en campo con biodiésel.

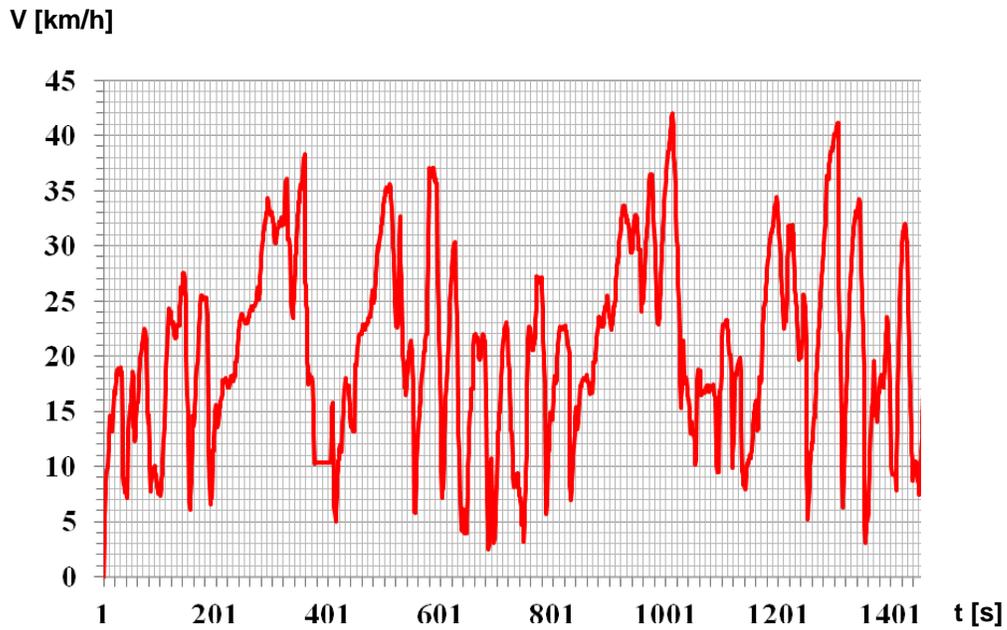


Fig. 19. Ciclo de manejo seguido en las pruebas en campo con el camión repartidor de refrescos utilizando biodiésel.

Capítulo 3. Desarrollo Experimental

También, se realizaron ensayos en campo se realizaron con un vehículo estaquitas con motor a gasolina. En ambos casos, los datos registrados fueron sintetizados para suministrarse al simulador de vehículos **ADVISOR**.

Dicha información fue utilizada para la planeación de las pruebas en laboratorio, como se describe a continuación:

En laboratorio

Sin importar si se trató de pruebas con diésel o con gasolina, los pasos seguidos para la planeación de las pruebas en laboratorio son los mismos, por ello se describirán ambos al mismo tiempo, señalando las diferencias de los ensayos con biodiésel o bioetanol.

- i. La síntesis de los datos registrados en campo, para generar bases de datos que relacionan régimen de giro, par y nivel de emisión (mapas **3D - Fig. 20**)
- ii. La simulación en **ADVISOR** del vehículo utilizado en campo, suministrando los mapas 3D obtenidos en i.
- iii. Todos los puntos de operación del motor fueron obtenidos para identificar las zonas de mayor incidencia (**Fig. 21 y 22**).
- iv. La planeación de los ensayos en laboratorio, con el propósito de reproducir las condiciones de operación del motor más frecuentes, identificadas en iii.
 - a. Si se trató de biodiésel, entonces con un dinamómetro de banco se reprodujeron las condiciones mencionadas en un ambiente controlado. Un muestreo de partículas fue realizado para identificar y cuantificar, los **Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos** emitidos por el motor diésel.
 - b. Si se trató del bioetanol, entonces con un dinamómetro de chasis se reprodujeron las condiciones mencionadas en un ambiente controlado, Un equipo **FTIR** fue utilizado para identificar y cuantificar, las concentraciones de los **aldehídos** emitidos por el motor de gasolina.

En ambos casos, un **PEMS** fue utilizado para obtener el flujo de los gases de escape del motor, así como sus emisiones criterio.

Capítulo 3. Desarrollo Experimental

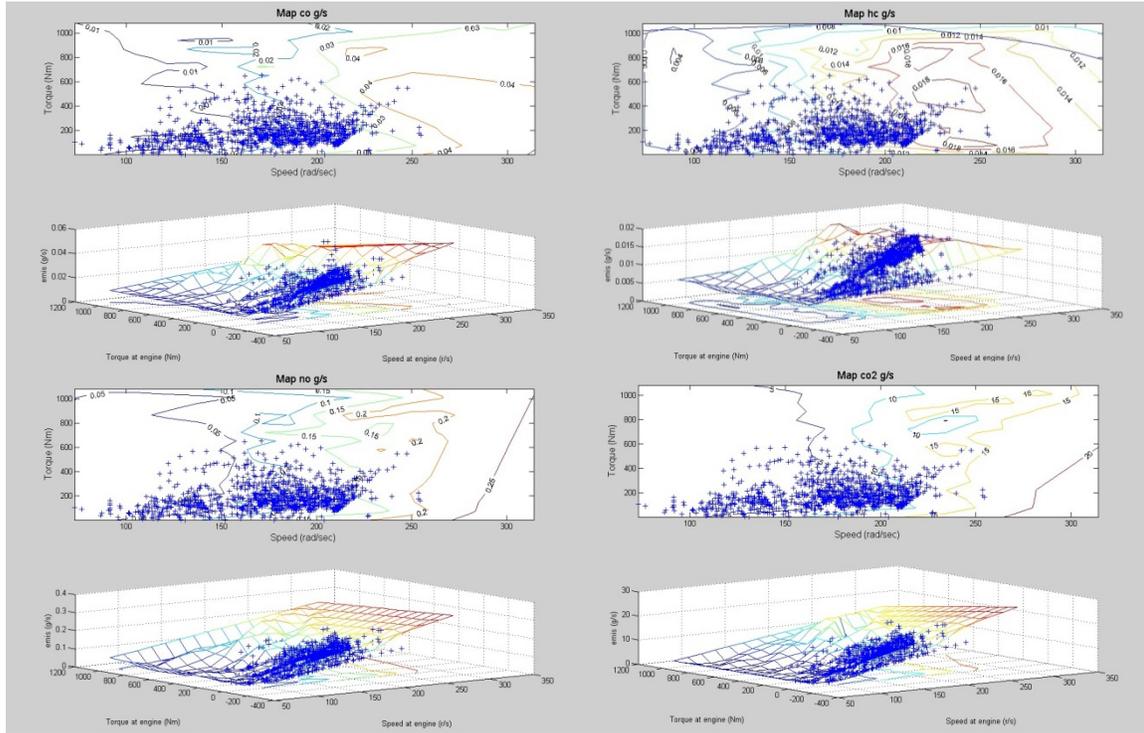


Fig. 20. Mapas 3D de un camión repartidor de refrescos por el uso de diésel PEMEX. (pruebas en campo).

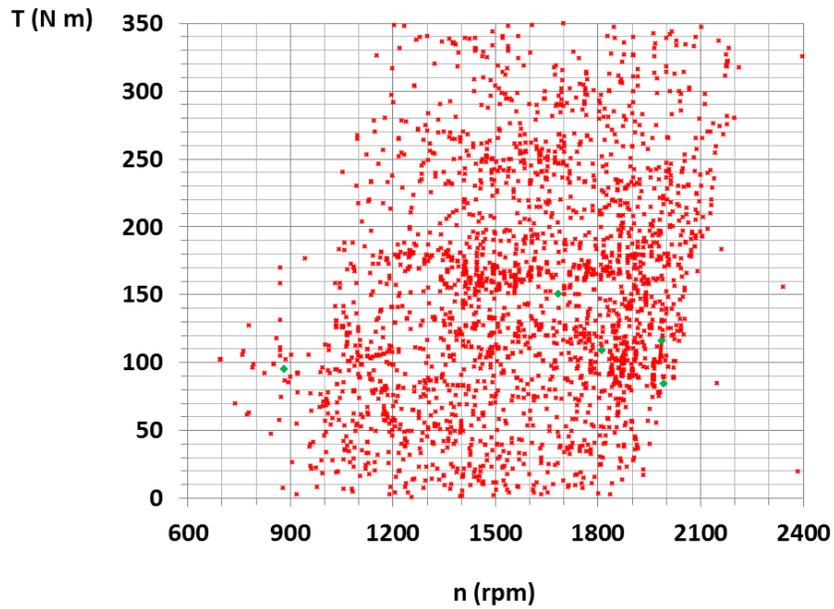


Fig. 21. Puntos de operación del motor diésel de un camión repartidor de refrescos.

Capítulo 3. Desarrollo Experimental

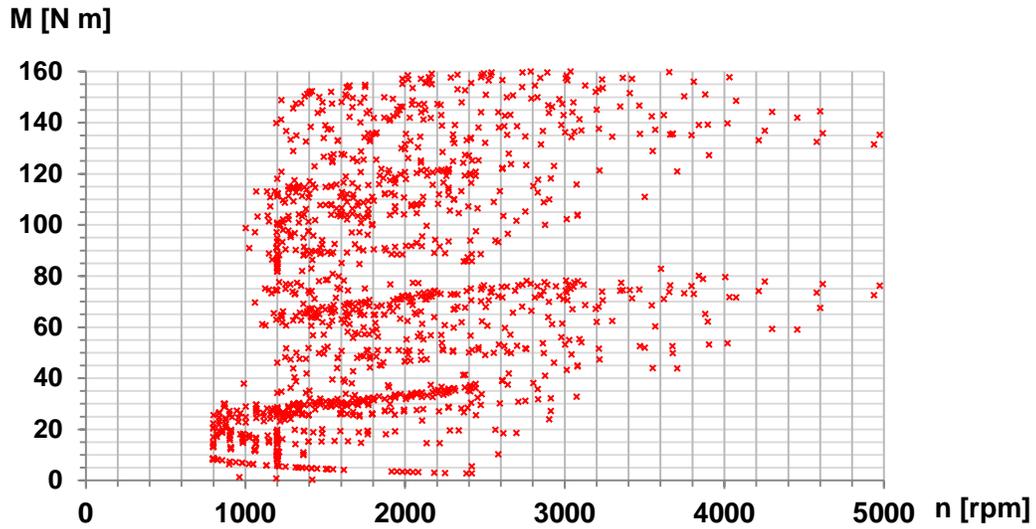


Fig. 22. Puntos de operación del motor de gasolina de una camioneta estaquitas.

El resultado del proceso de planeación por biocombustible, es mostrado en la **Tabla 6**. En ambos casos, el combustible fósil respectivo, gasolina o diésel, sirvió para establecer la línea base.

Tabla 6. Puntos de operación planteados para un motor de combustión interna.

Biodiésel		Bioetanol	
n (rpm)	M (N.m)	n (rpm)	M (N.m)
869	98	ralentí	0
1684	110	880	58.3
1838	125	913	135.58
1944	121	1359	27.11
2072	98	1755	112.53
2200	81	2040	67.79
1573	172	2304	136.93
1756	167	2347	27.11
1894	164	2505	108.46
2021	168	2608	54.23

Desarrollo de las pruebas

Biodiésel

Las condiciones seleccionadas se reprodujeron mediante un dinamómetro de banco, el cual permitió aplicar carga a un motor diésel (similar al del camión repartidor de refrescos) para un determinado nivel de régimen de giro del mismo.

A continuación se enumeran los pasos seguidos para efectuar este tipo de ensayos.

1. El motor diésel fue instrumentado para obtener la información de par y régimen de giro aplicado al mismo. Esto requirió del uso de una celda de carga y un tacómetro, ambos correspondientes al dinamómetro de banco.
2. En el escape del motor diésel, se colocó la sonda del equipo **PEMS** para obtener sus emisiones criterio, así como un arreglo dispuesto para obtener un muestreo de las partículas emitidas. Además, se colocaron otros sensores propios de los equipos empleados.
3. El tipo de combustible para alimentar el motor diésel fue seleccionado. En caso de ser necesario, el sistema de combustible fue purgado antes de suministrarlo.
4. El motor diésel fue calentado hasta alcanzar su temperatura de operación.
5. Una condición de operación del motor fue seleccionada para reproducirla, mediante el dinamómetro de banco.
6. Los filtros para el muestreo de partículas fueron colocados.
7. El motor diésel fue acelerado a un régimen de giro superior al de la condición de operación seleccionada.
8. El nivel de carga correspondiente a la condición de operación seleccionada, fue aplicado al motor diésel.
9. Esta acción provocó una disminución del régimen de giro, el cual fue aumentado nuevamente hasta el nivel logrado en el punto 5. Una vez hecho esto, el par

Capítulo 3. Desarrollo Experimental

aplicado disminuyo. Por eso, este punto fue repetido hasta lograr la condición de operación del motor seleccionada en el punto 4.

10. Una vez que se estabilizó el régimen de giro y el par aplicado al motor, la información de la condición de operación fue registrada, dando inicio al muestreo de partículas.

11. Después de transcurrido el periodo de muestreo de las partículas (aprox. 10 minutos), se retiraron los filtros utilizados para ello. Entonces, se procedió a otra condición de operación (punto 5).

12. Una vez concluidas las pruebas con un tipo de combustible se apagó el motor diésel, para realizar pruebas con otro combustible (punto 3), hasta terminar todos.



Fotos 3, 4, 5 y 6. Pruebas en dinamómetro de banco.

Capítulo 3. Desarrollo Experimental

Bioetanol

Las condiciones seleccionadas se reprodujeron mediante un dinamómetro de chasis, el cual permitió aplicar carga a un determinado nivel de régimen de giro del motor.

1. El eje motriz del vehículo seleccionado para las pruebas, fue colocado sobre los rodillos del dinamómetro de chasis.
2. En el escape del vehículo se colocaron: la sonda del equipo **PEMS**, para medir sus emisiones criterio; y la sonda del equipo **FTIR**, para obtener información sobre sus emisiones no reguladas. Además, se colocaron otros sensores propios del equipo **PEMS** en el motor del vehículo.
3. El tipo de combustible para el motor del vehículo fue seleccionado, y en caso de ser la mezcla **E6** debió suministrarse mediante un tanque y bomba externos.
4. El motor y otros elementos móviles del vehículo (p.e. ruedas, caja de velocidades, diferencial) fueron calentados para lograr la mejor lubricación del aceite.
5. Una condición de operación del motor fue seleccionada para reproducirla, mediante el dinamómetro de banco.
6. El nivel de carga correspondiente fue aplicado, incrementando la intensidad de frenado de la unidad de absorción de potencia del dinamómetro de chasis.
7. El vehículo fue acelerado lentamente al régimen de giro del motor correspondiente a la condición de operación seleccionada en el punto 5.
8. Una vez que se estabilizó el régimen de giro y el par aplicado al motor, la información de la condición de operación fue registrada por los equipos utilizados para este tipo de pruebas.
9. Después de transcurrido un periodo de 5 minutos, se procedió a otra condición de operación (punto 5).
10. Una vez concluidas las pruebas con un tipo de combustible se apagó el motor del vehículo, cambiando el tipo de combustible (punto 3).

Capítulo 3. Desarrollo Experimental



Fotos 7, 8, 9, 10. Pruebas en dinamómetro de chasis.

11. Una vez concluidas las pruebas con un vehículo, se procedió a iniciar todo el proceso desde el punto 1 con otro vehículo, hasta terminar con todos.

Las pruebas efectuadas con las diferentes mezclas de biodiésel (**B5**, **B10** y **B16**) y diésel convencional, así como una muestra de las pruebas hechas en vehículos, con la mezcla de bioetanol **E6** y gasolina convencional en laboratorio se muestran en la **Fig. 23** y en la **Fig. 24**.

Capítulo 3. Desarrollo Experimental

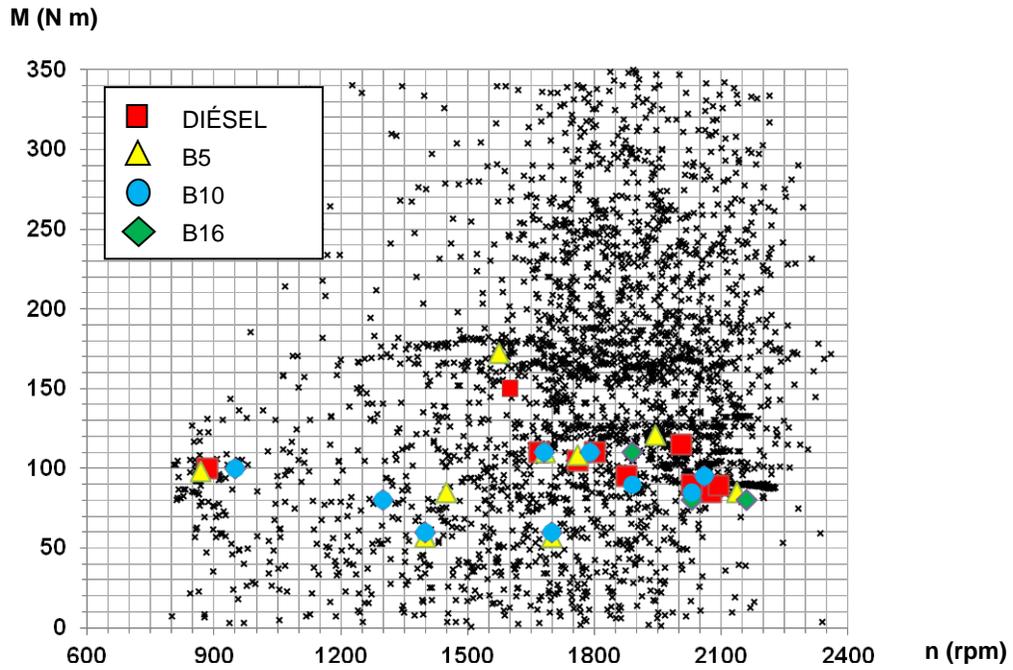


Fig. 23. Pruebas con mezclas de biodiésel realizadas en laboratorio.

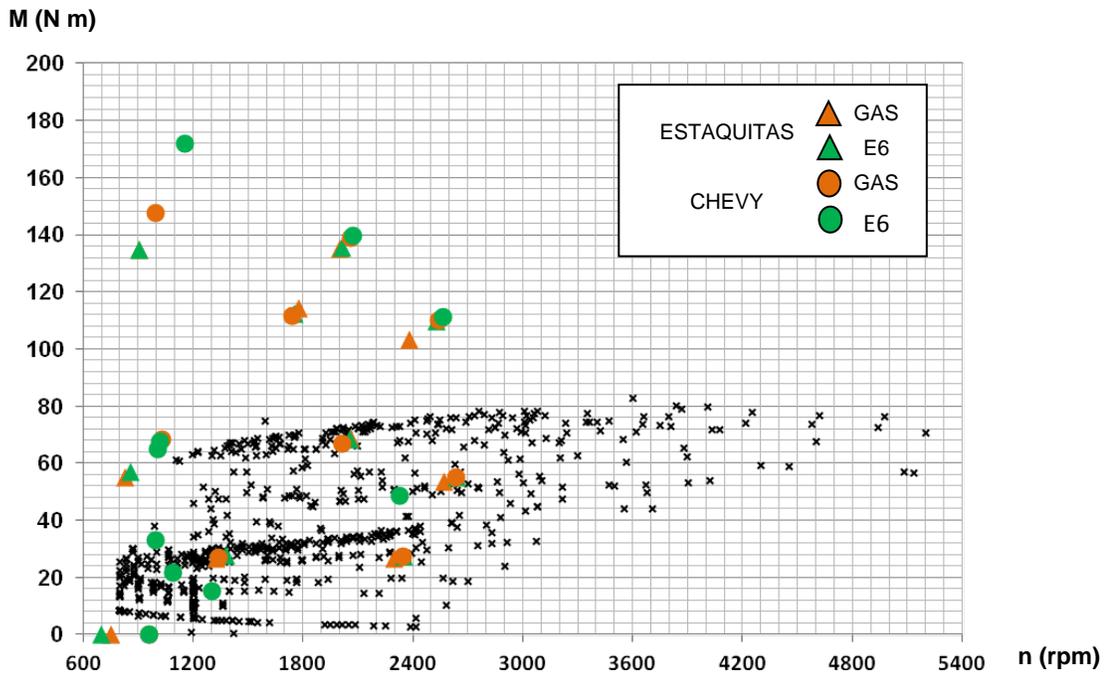


Fig. 24. Pruebas con mezcla de bioetanol E6 realizadas en laboratorio.

3.3 Equipos utilizados

Si bien la instrumentación de un motor de combustión interna alternativo o de un vehículo automotor requirió usar diferentes equipos, solamente se describirán los cuatro más importantes para lograr los objetivos del presente trabajo: un **PEMS (Portable Emission Measurement System)**, un **FTIR (Fourier Transform InfraRed Spectrometer)**, así como dos tipos de dinamómetros: de banco y de chasis.

PEMS

Un Sistema de Medición de Emisiones Portátil (o **PEMS** por sus siglas en inglés) es un equipo usado para probar y/o evaluar las emisiones de una fuente móvil. El equipo utilizado durante las pruebas, tanto en campo como en laboratorio, es de la marca Clean Air, modelo **AXION**.

Su diseño integra un equipo de cómputo para el control de dos bancas analizadoras de cinco gases. Estas últimas utilizan diferentes tipos de sensores para medir las concentraciones en ppm de los compuestos: infrarrojo no dispersivo para el **HC**, **CO** y **CO₂**; una celda electroquímica para los **NO_x**, así como un nefelómetro para las **PM 2.5** y las **PM 10**.

Puede efectuar una prueba por si mismo, a la vez que registra y guarda los datos experimentales conjuntando las lecturas de diferentes elementos: un sensor de temperatura, un sensor de presión, un tacómetro y un gps.

Este **PEMS** calculó el flujo de gases de escape de manera indirecta a partir de las lecturas de los sensores de temperatura y de presión en el múltiple de admisión del motor, el régimen de giro y el valor de la cilindrada del motor. Aunque no posee alguna limitante en cuanto al tipo de combustible del motor que se desea probar, se debe suministrar su composición química para que las emisiones y el consumo de combustible sean calculados correctamente.

Capítulo 3. Desarrollo Experimental



Fotos 11 y 12. Sensores y tacómetro óptico del PEMS.

Ya que un **PEMS** puede ser alimentado por la batería del automóvil, es posible probar todo tipo de vehículos: autos, camionetas, autobuses camiones y tractocamiones. Además, puede usarse también en laboratorio, alimentándose de corriente alterna, lo cual permite hacer pruebas al mismo tiempo con otros equipos que no pueden ser instrumentados a bordo de un vehículo, como un **FTIR**.

Por último, se mencionan las acciones efectuadas habitualmente para el correcto funcionamiento de este equipo.

- El equipo debió calentarse por un periodo de 30 minutos aprox. cada día que fue utilizado.
- Antes de un ensayo, se verificaba que los sensores de sus bancas analizadoras proporcionaran lecturas correctas.
- Durante los ensayos, se debió poner atención especial a las trampas de agua entre las sondas y las bancas analizadoras. Posee dos sondas, una para las emisiones de gases criterio - **CO**, **CO₂**, **NO_x**, **HC** - y otra para la emisión de partículas **PM 10** y **PM 2.5**.

Capítulo 3. Desarrollo Experimental

- Al concluir un día de pruebas el equipo debía dejarse trabajar en vacío, es decir, sin su(s) sonda(s) en el escape del motor para efectuar la limpieza de esta(s) última(s).



Fotos 13 y 14. Trampas de agua y sondas del PEMS.

FTIR

La técnica de Espectroscopia por Transformada de Fourier en Infrarrojo es usada para obtener un espectro infrarrojo de absorción o emisión de un sólido, un líquido o un gas. La meta de cualquier espectroscopia de absorción es medir que tan bien una muestra absorbe luz, en cada longitud de onda.

La técnica **FTIR** lanza un rayo que contiene muchas frecuencias diferentes de luz al mismo tiempo, y mide cuanto de ese rayo es absorbido por la muestra. A continuación, el rayo es modificado para contener una diferente combinación de frecuencias, dando un dato cada segundo (ese proceso es repetido muchas veces). Después, una computadora toma todos estos datos y emplea una técnica de procesamiento de datos llamada Transformada de Fourier, convirtiendo los datos brutos en el resultado deseado: el espectro de la muestra

El equipo utilizado para las pruebas con bioetanol funcionó de la siguiente forma: una sonda colocada en el escape del motor, tomó parte de los gases utilizando una bomba de vacío. Para asegurar un flujo constante, la presión fue monitoreada constantemente para ajustarse, en caso de que fuera necesario.

Capítulo 3. Desarrollo Experimental



Fotos 15 y 16. Sonda y bomba de vacío del FTIR.

Entonces, un haz de luz infrarroja fue dirigido hacia un interferómetro y después a la muestra. Un espejo móvil dentro del aparato, alteró la distribución de la luz infrarroja que pasaba por el interferómetro. La señal directamente grabada, llamada un interferograma, representó la luz que salió como función de la posición del espejo.



Fotos 17 y 18. Interferómetro, celda de muestreo y detector del PEMS.

Capítulo 3. Desarrollo Experimental

Por último, se mencionan las acciones efectuadas habitualmente para el correcto funcionamiento de este equipo.

- Los días de prueba debió verterse nitrógeno líquido en el detector del equipo, con el fin de mantenerlo a baja temperatura y obtener lecturas correctas.
- Los días de prueba debió obtenerse un interferograma del ambiente, referencia para la interpretación de todos los espectros obtenidos.
- El equipo debió calentarse por un periodo de 45 minutos aprox., cada día que fue utilizado.
- Durante los ensayos se debió poner atención especial a la presión a la entrada de la cámara de muestreo, haciendo los ajustes necesarios para mantenerla constante.



Fotos 19 y 20. Preparación del FTIR para los ensayos.

Un dinamómetro es un equipo usado para medir la potencia y par producido por un motor. Existen dos tipos de dinamómetros: uno de ellos se acopla directamente al motor (dinamómetro de banco), mientras el otro puede hacer la misma tarea sin remover el motor del vehículo (dinamómetro de chasis).

Capítulo 3. Desarrollo Experimental

Ambos equipos aplican carga al motor mediante un freno, el cual puede ser hidráulico o de corrientes parásitas. A continuación, se presenta una descripción más detallada de los elementos y sistemas que componen los dinamómetros del Laboratorio de Control de Emisiones.

Dinamómetro de banco

Este equipo utilizó una unidad de absorción de potencia (**PAU *Power Absortion Unit***) para aplicar una carga al motor diésel, acoplándose a su volante de inercia mediante una flecha. De esa forma, al incrementar o disminuir el régimen de giro y la carga aplicados al motor mencionado, fue posible obtener diferentes condiciones de operación siguiendo el procedimiento del apartado anterior del capítulo.

La **PAU** (freno de corrientes parásitas) está compuesta de dos partes fundamentales: el rotor y el estator. El estator es un elemento *flotante*, el cual no se encuentra fijo a una referencia estática y se sujeta mediante rodamientos a la flecha del rotor. Para evitar que el estator gire junto con el rotor, éste se recarga en un dispositivo denominado celda de carga, por medio de un brazo que los interconecta.

La celda de carga es un instrumento encargado de resistir la fuerza que el motor ejerce, sobre el freno de corrientes parásitas. Cuando el estator frenaba al rotor, aquél tendía a girar en el mismo sentido que el rotor, porque es una estructura *flotante*. Sin embargo, la celda de carga evitaba que el estator girara libremente con el rotor. A pesar de esto, el estator lograba girar ligeramente sobre el eje del rotor, deformando la celda de carga, comprimiéndola proporcionalmente a la fuerza existente entre el rotor y el estator. La compresión en la celda de carga se midió, para conocer la fuerza que actuaba en el estator.

La variación de intensidad de frenado, se controló variando el campo generado por las bobinas de la PAU, las cuales efectuaban el frenado del rotor.

Capítulo 3. Desarrollo Experimental



Foto 21. Dinamómetro de banco y motor diésel.



Fotos 22 y 23. Equipos de cómputo para registro de las rpm y par aplicado al motor diésel.

Una ventaja de este tipo de dinamómetro es la disminución de las pérdidas debidas a la fricción, existentes entre los componentes móviles del vehículo, tales como su caja de velocidades, su(s) flecha(s) motrices, su diferencial y sus ruedas.

Capítulo 3. Desarrollo Experimental

Dinamómetro de chasis

Este equipo se compone de un par de rodillos y una unidad de absorción de potencia (**PAU *Power Absortion Unit***), la cual sirvió para aplicar una carga al vehículo para simular un trayecto con o sin pendientes. Mediante una **PAU** es posible evaluar el desempeño de un motor, aplicándole diferentes intensidades de freno para observar su comportamiento.

La PAU que posee este equipo es similar a la del dinamómetro de chasis, en consecuencia no se repite la descripción de sus componentes y funcionamiento. En cambio, la celda de carga es diferente porque puede ser sometida a tensión o compresión.

Además de estos elementos, el dinamómetro de chasis cuenta con una unidad de volantes de inercia. Gracias a éstos se pueden simular el efecto de la masa del vehículo cuando este aumenta o disminuye su velocidad, complementando la simulación obtenida por la aplicación de la carga debida al rodamiento de los neumáticos y la resistencia del viento sobre la carrocería del vehículo.



Foto 24. Dinamómetro de chasis y camioneta estaquitas.

Capítulo 3. Desarrollo Experimental

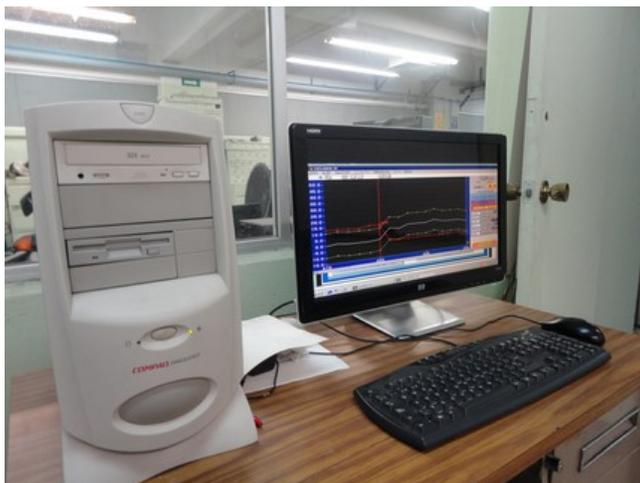


Foto 25. Equipo de computo para el control del dinamómetro de chasis.

Las pruebas con este equipo pueden medir el consumo de combustible (rendimiento), nivel de ruido, potencia, velocidad, temperatura, etc.



Fotos 26 y 27. Medición de consumo de mezcla E6.

La información obtenida durante los ensayos experimentales fue utilizada para generar mapas **3D**, no sólo como los derivados de las pruebas en campo para las emisiones criterio (**CO**, **CO₂**, **NO_x**, **HC** y **PM 10**), sino también de emisiones no reguladas (p.e. **HAP's** y **aldehídos**). Gracias a esto, se obtuvo una herramienta para estimar sus emisiones mediante un software simulador de vehículos. Esa etapa se explica ampliamente, en el siguiente capítulo.

Capítulo 4.

SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS

Capítulo 4. Simulación Computacional

La simulación realizada para este trabajo fue hecha con el software **ADVISOR**, el cual puede modelar el comportamiento de un vehículo al seguir una ruta determinada. Este programa estima la energía requerida por cada uno de sus componentes, desde las ruedas del vehículo, pasando por el diferencial y la transmisión, para terminar en el motor de combustión interna (**Fig. 25**).

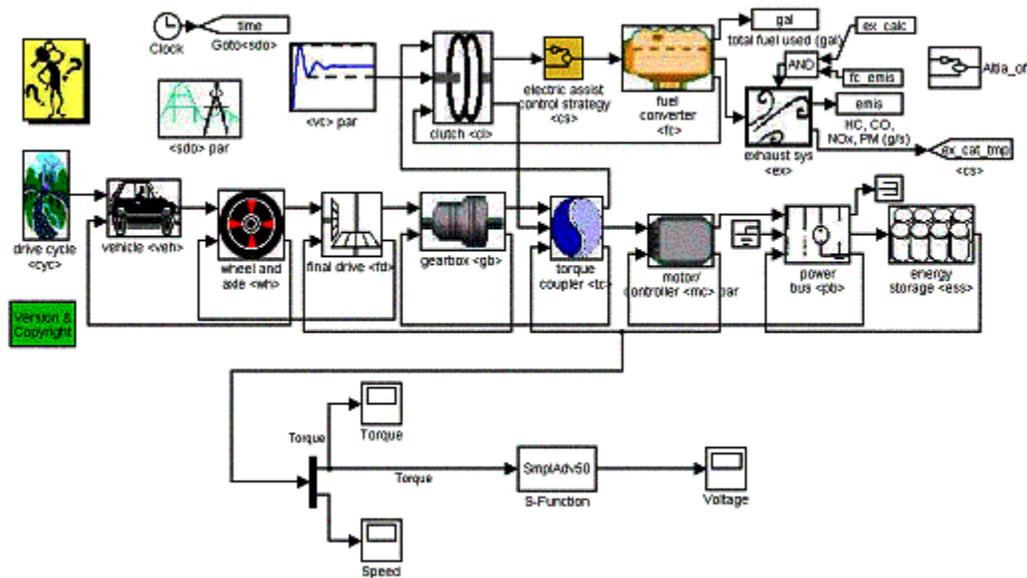


Fig. 25. Condiciones de operación de un motor MECH (gasolina).

Una descripción simplificada del proceso de simulación es la siguiente: la entrada es un perfil de tiempo contra velocidad a seguir por un vehículo, con el cual se puede calcular la velocidad y el par en sus ruedas, utilizando las características físicas y geométricas de este último. Dichos requerimientos son modificados de acuerdo a las relaciones que poseen el diferencial y la caja de velocidades del vehículo, con el propósito de obtener todas las condiciones de operación en su motor (régimen de giro y par).

En el caso del motor, su modelo consiste en arreglos tridimensionales que relacionan cualquier condición de operación del motor, con el nivel de emisión de un contaminante determinado. Entonces, una vez que el simulador ha obtenido las condiciones de

Capítulo 4. Simulación Computacional

operación del motor del vehículo, se refiere a su modelo para estimar sus emisiones a partir de la base de datos que contiene (leyendo o interpolando un valor entre ellos).

Anteriormente, la obtención de los arreglos mencionados (**Mapas 3D**) ha sido contemplada en trabajos previos para poder estimar sus emisiones criterio. Ahora, este trabajo presenta una metodología que extiende su aplicación a las emisiones no reguladas. La importancia de ello radica en la imposibilidad de medir dichas emisiones en campo y en tiempo real. Por eso, la información pertinente sobre este tipo de emisiones fue obtenida a partir de los ensayos realizados en laboratorio, como se describió en el capítulo anterior.

Una vez obtenidos esos datos, la aplicación de las técnicas de Espectrometría de Masas con Cromatografía de Gases (**EM-CG**) y la de Espectrometría en Infrarrojo por Transformada de Fourier (**FTIR**), brindaron una especiación detallada de las emisiones no reguladas, por el uso de mezclas de bioetanol o biodiésel con un combustible fósil (gasolina o diésel respectivamente).

Este capítulo aborda lo realizado para la estimación de las emisiones no reguladas, mediante simulación computacional. El primer apartado del capítulo trata sobre el tratamiento de los datos obtenidos en las pruebas en el dinamómetro de chasis, mientras el segundo se enfoca en las pruebas en el dinamómetro de banco. Finalmente, presenta la aplicación de los mapas **3D** de ambos tipos de biocombustible para estimar sus emisiones no reguladas (p.e. aldehídos e Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos).

4.1 Mapas 3D de mezclas E6 y Gasolina

Las pruebas en dinamómetro de chasis obtuvieron información sobre las emisiones criterio mediante un **PEMS**, mientras las concentraciones de otros contaminantes fueron obtenidas mediante un **FTIR**.

Primeramente, se obtuvieron mapas de las emisiones criterio al utilizar gasolina para ajustar las estimaciones de acuerdo a las registradas durante las pruebas de campo. Ese proceso estuvo integrado por los siguientes pasos.

Emisiones Criterio

1. Los datos de régimen de giro y par aplicado al motor se acoplaron con los niveles de emisiones contaminantes, de acuerdo al tiempo en que fueron registrados.

Primeramente, las condiciones de operación reproducidas con el dinamómetro de chasis fueron ordenadas en orden ascendente, considerando el nivel de régimen de giro en el motor del vehículo. Esto es ejemplificado con una gráfica de los ensayos realizados en el motor de un vehículo Estaquitas, modelo 1999 (**Fig. 26**).

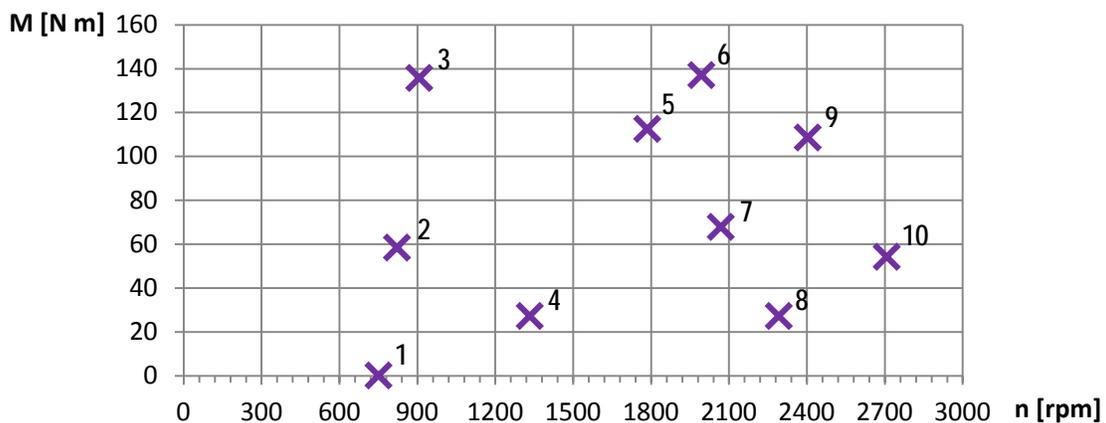


Fig. 26. Condiciones de operación de un motor MECH (Gasolina).

Capítulo 4. Simulación Computacional

Una vez hecho esto, se promediaron los niveles de emisión de los contaminantes de acuerdo a la condición de operación del motor aplicada. La gráfica correspondiente a las emisiones de las pruebas mencionadas previamente, ejemplifica esta parte (**Fig. 27**).

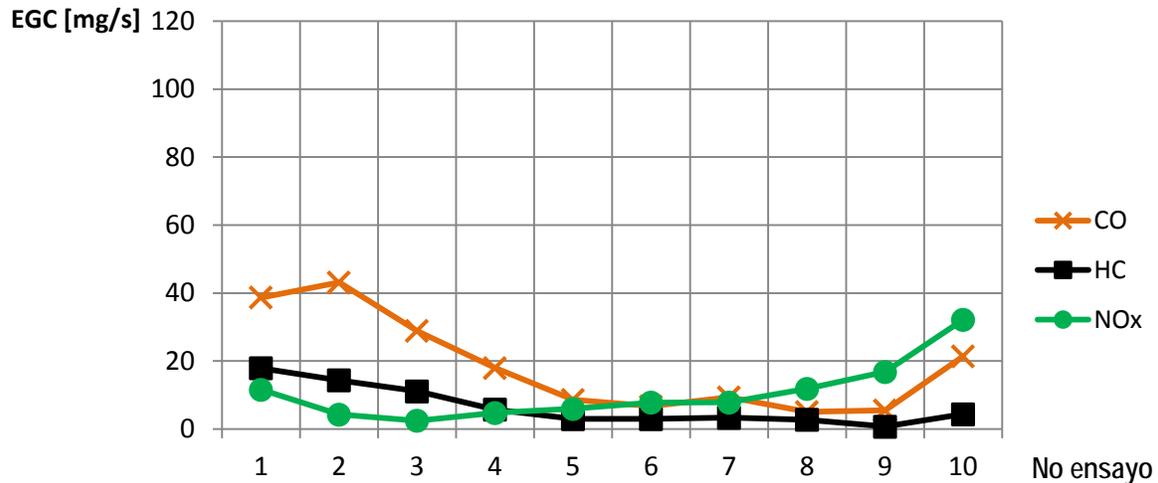


Fig. 27. Emisiones de gases criterio del mismo motor MECH de la Fig. 26.

2. Los datos registrados fueron asignados a un eje coordenado para observar la relación entre las condiciones de operación del motor con el nivel de emisión emitido. El régimen de giro se graficó en el **eje x**, el par en el **eje y**, y el nivel de emisión en el **eje z**.
3. Sin embargo, la base de datos creada de esta forma contenía un número muy grande de puntos para suministrarse al software **ADVISOR**. Por esa razón, se establecieron 16 intervalos iguales para cada uno de los ejes coordenados, promediando los puntos dentro de cada rango y obteniendo arreglos tridimensionales.

Capítulo 4. Simulación Computacional

- Los puntos contenidos por los arreglos mencionados, sirvieron para graficar una superficie. Sin embargo, esta última no abarcó las condiciones extremas de operación del motor, es decir, menor o mayor par contra menor o mayor régimen de giro (**Fig. 28**).

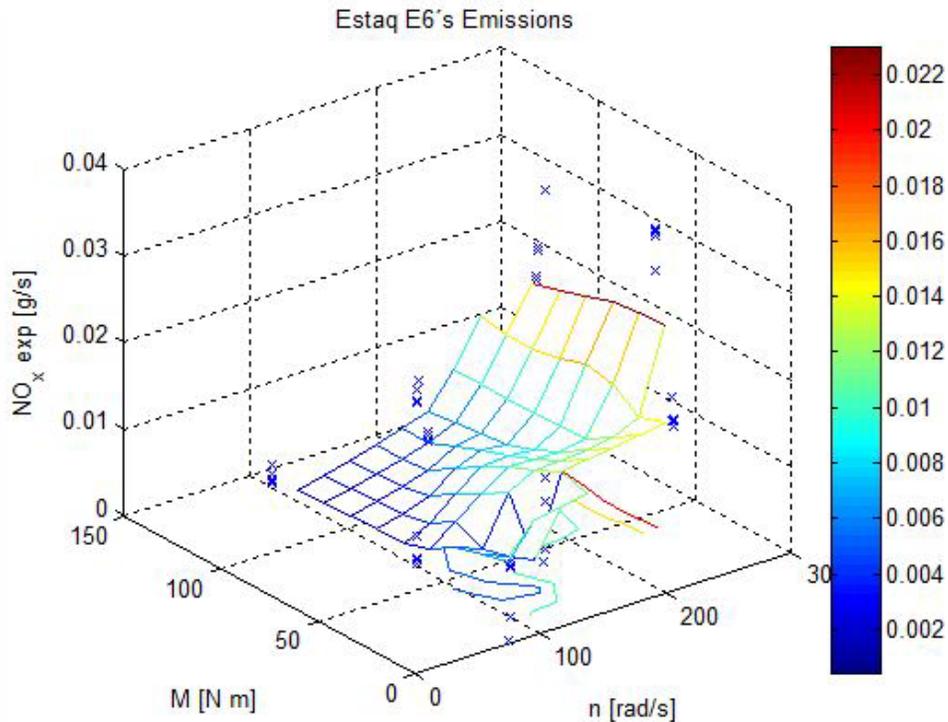


Fig. 28. Mapa 3D sin esquinas para una camioneta Estaquitas usando E6.

- Por esa razón, se establecieron niveles de emisión para tales condiciones, con los cuales poder extender la superficie obtenida, sin afectar las curvas de nivel de la misma. El resultado de ello fue un mapa **3D**, que relaciona todas las condiciones de operación del motor con el nivel de emisión de un contaminante criterio (**Fig. 29**).

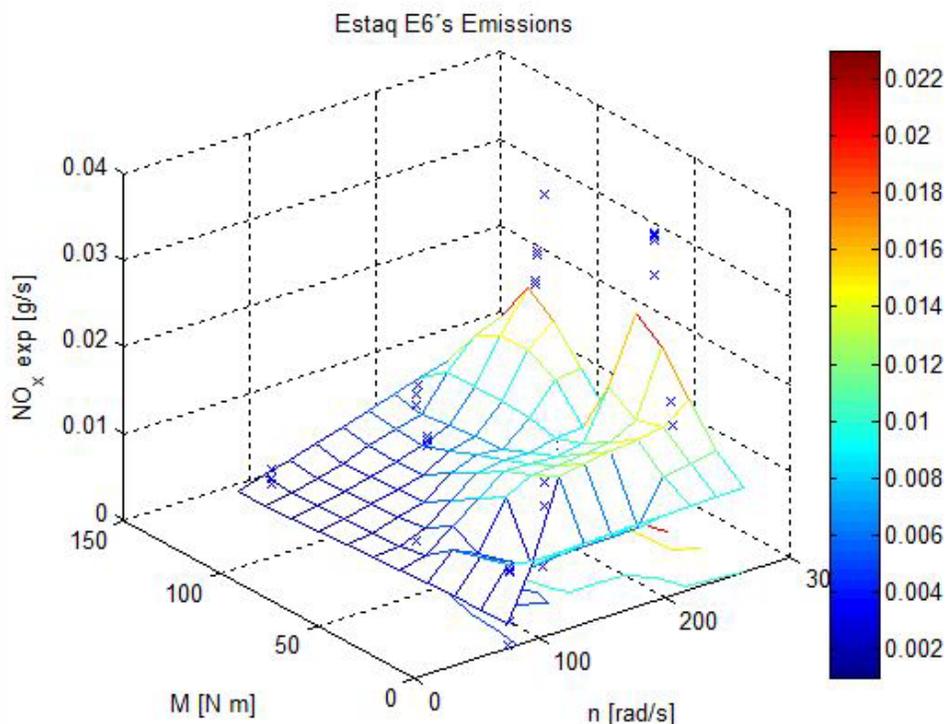


Fig. 29. Mapa 3D para una camioneta Estaquitas usando E6.

Los mapas **3D** generados sirvieron para verificar su aplicación en la estimación de las emisiones criterio, empleando la metodología propuesta, a partir de las concentraciones obtenidas con un **FTIR** de los mismos contaminantes. De esta forma, los mapas 3D de diferentes emisiones no reguladas (p.e. *Aldehídos* > H_2CO - **Formaldehído**) fueron obtenidos siguiendo un proceso similar, tal como se describe a continuación.

Emisiones no reguladas (Aldehídos)

Los niveles de emisión de diferentes compuestos fueron obtenidos de la combinación de sus concentraciones registradas por un **FTIR**, con el respectivo flujo de gases de escape registrado por un **PEMS**. Las frecuencias de muestreo de los equipos mencionados fueron diferentes, por lo que los datos registrados cada segundo por el **PEMS** se promediaron para obtener un valor por minuto, igual a la frecuencia de muestreo del **FTIR**.

La generación de los mapas respectivos a este tipo de emisiones fue realizada con el siguiente procedimiento.

1. Los datos de régimen de giro y par aplicado al motor se acoplaron con los niveles de emisiones contaminantes, de acuerdo al tiempo en que fueron registrados.

Primeramente, la condiciones de operación reproducidas con el dinamómetro de chasis fueron ordenadas en orden ascendente, considerando el nivel de régimen de giro en el motor del vehículo. Esto es ejemplificado con una gráfica de los ensayos realizados en un motor de un vehículo Estaquitas, modelo 1999 (**Fig. 30**).

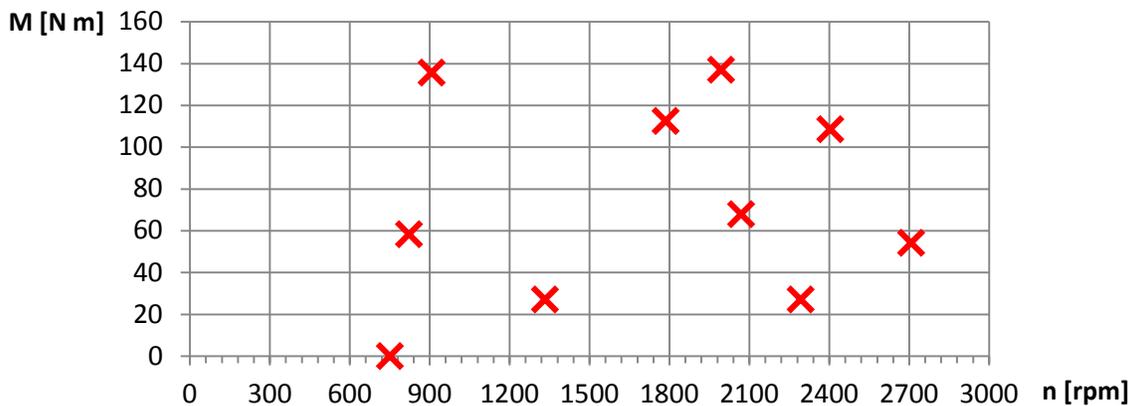


Fig. 30. Condiciones de operación de un motor MECH (E6).

Capítulo 4. Simulación Computacional

- Los datos de flujo de gases de escape obtenidos por el **PEMS** se promediaron cada 60 segundos (**Fig. 31**), para acoplarse con las concentraciones resultantes de la técnica **FTIR**.

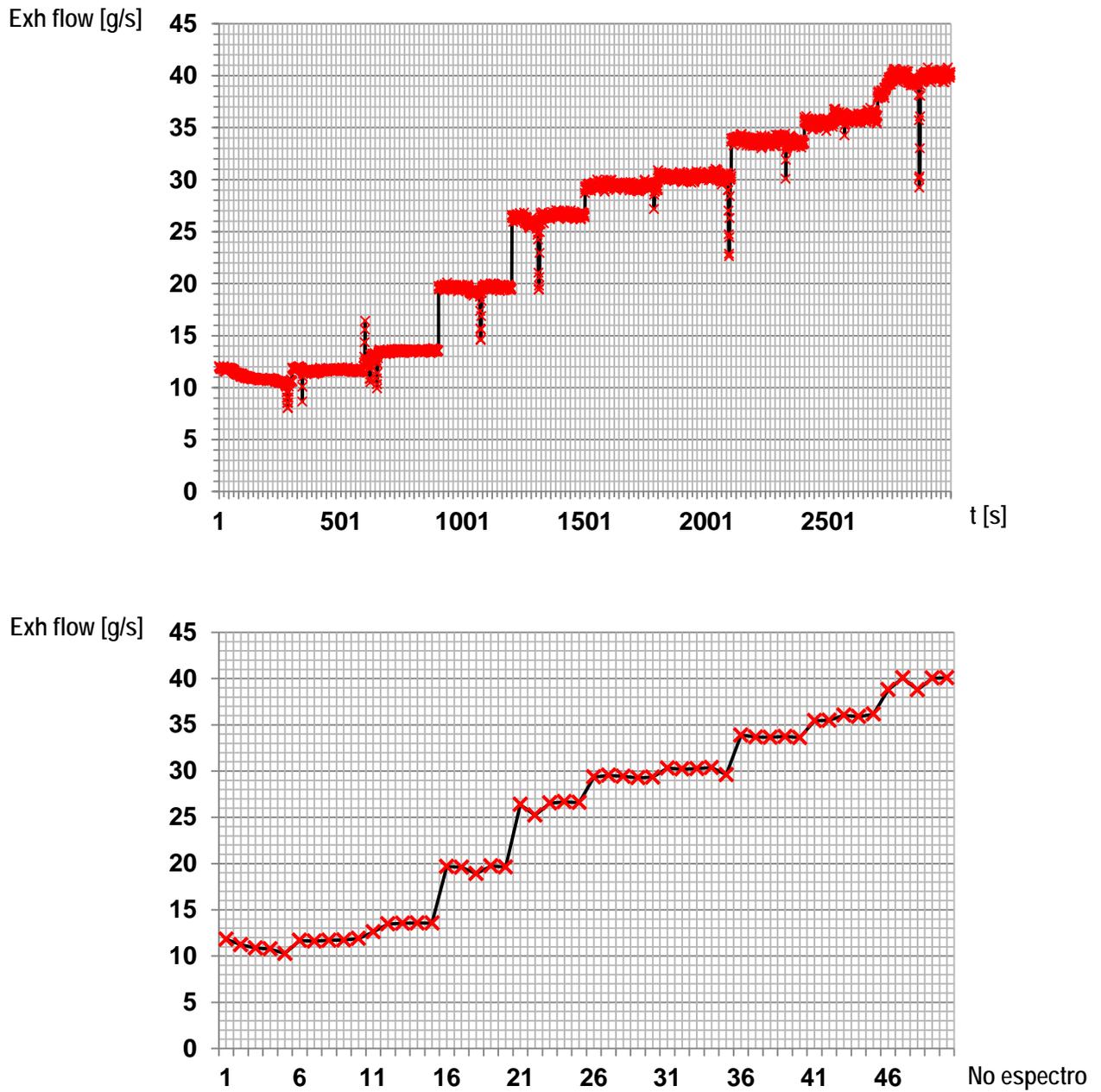


Fig. 31. Ejemplo de promediado de datos del PEMS para acoplamiento con datos del FTIR.

Capítulo 4. Simulación Computacional

- Los niveles de emisiones no reguladas se obtuvieron al multiplicar los datos promediados del punto anterior, por el valor de concentración proporcionado por la espectrometría en infrarrojo FTIR. (Fig. 32).

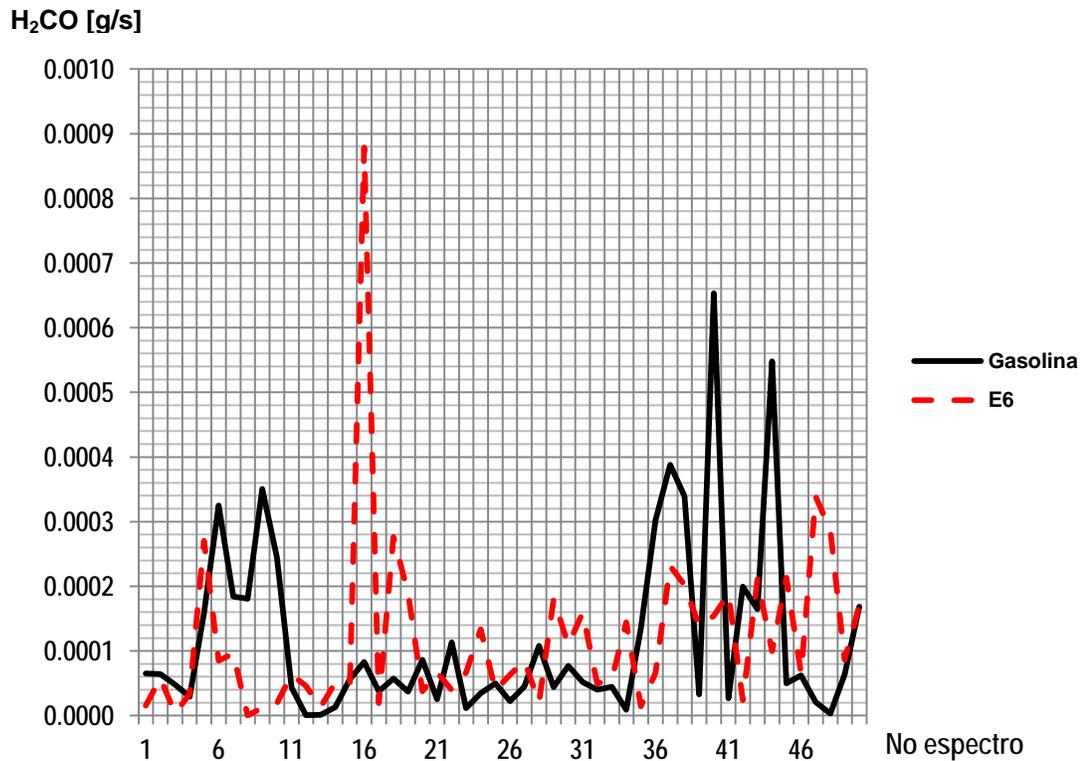


Fig. 32. Emisión de Formaldehído - H₂CO usando gasolina y E6 (Estaquitas 1999).

- Los datos registrados fueron asignados a un eje coordenado, para observar la relación entre las condiciones de operación del motor con el nivel de emisión emitido. El régimen de giro se graficó en el **eje x**, el par en el **eje y**, y el nivel de emisión en el **eje z**.
- Sin embargo, la base de datos creada de esta forma contenía un número muy grande de puntos para suministrarse al software **ADVISOR**. Por esa razón, se establecieron 16 intervalos iguales para cada uno de los ejes coordenados,

Capítulo 4. Simulación Computacional

promediando los puntos dentro de cada rango y obteniendo arreglos tridimensionales.

- Los puntos contenidos por los arreglos mencionados sirvieron para graficar una superficie. Sin embargo, esta última no abarcó las condiciones extremas de operación del motor, es decir, menor o mayor par contra menor o mayor régimen de giro (**Fig. 33**).

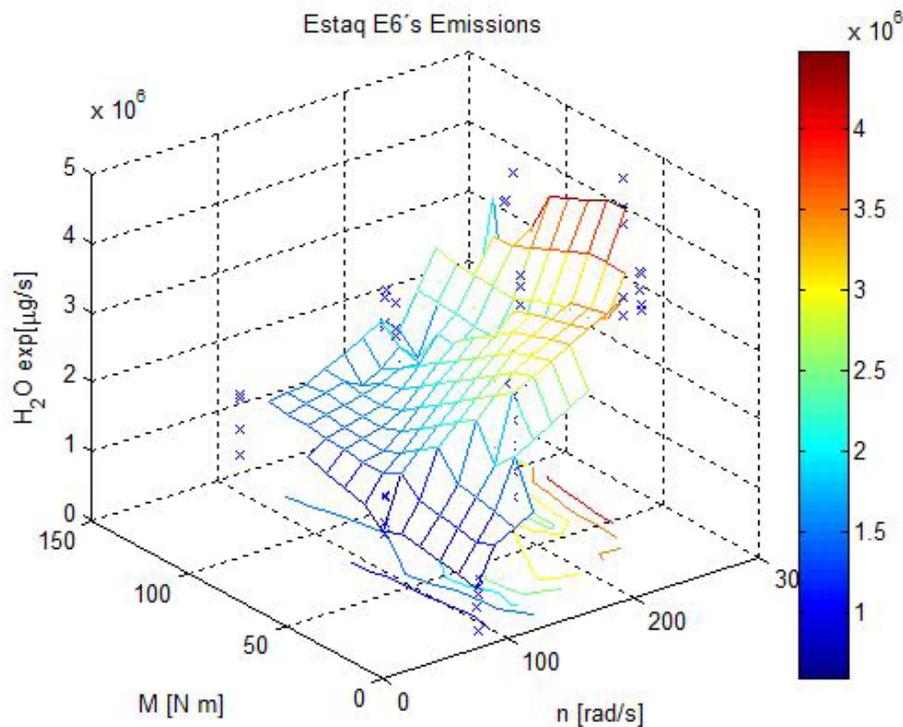


Fig. 33. Mapa 3D sin esquinas para una camioneta Estaquitas usando E6.

- Por esa razón, se establecieron niveles de emisión para tales condiciones, con los cuales poder extender la superficie obtenida previamente, sin afectar las curvas de nivel de la misma. El resultado de ello fue un mapa **3D** que relaciona todas las condiciones de operación del motor, con el nivel de una emisión no regulada (**Fig. 34**).

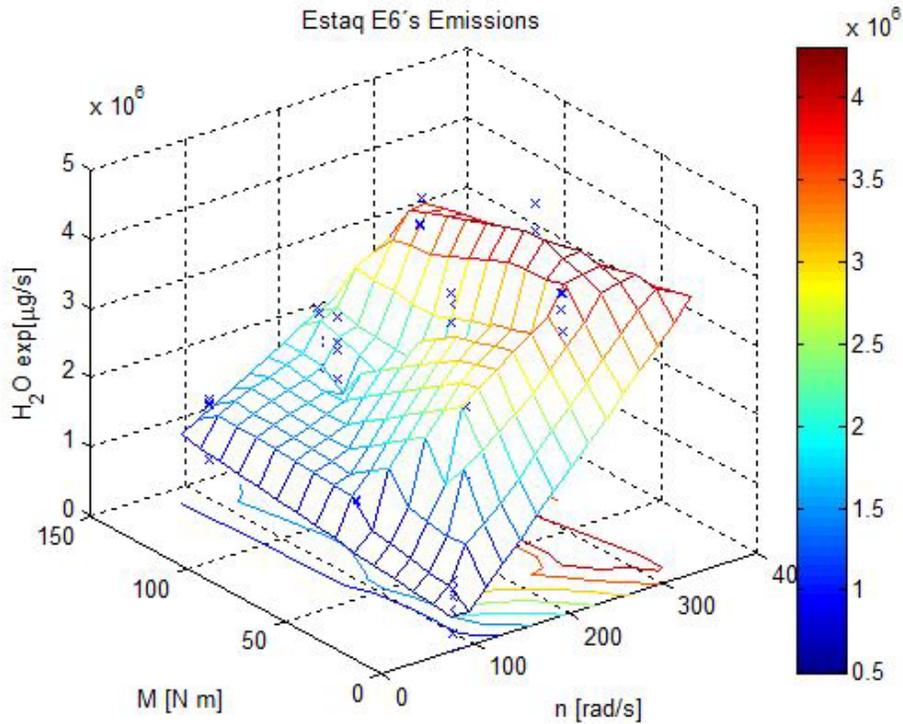


Fig. 34. Mapa 3D para una camioneta Estaquitas usando E6.

Los mapas 3D generados permitieron apreciar cómo se relacionan diferentes condiciones de operación de un **MECH**, con el nivel de una emisión no regulada en particular (**H₂CO** - Formaldehído, **CH₄** - Metano, **NH₃** - Amoniaco, **H₂O** - Agua, etc.), al usar gasolina o una mezcla **E6** (bioetanol con gasolina primaria). Los mapas 3D resultantes se encuentran en el **Anexo A** de esta tesis.

Capítulo 4. Simulación Computacional

La combinación de la información registrada por los equipos: **PEMS** y **FTIR**, hace necesario brindar una muestra de la validez de tal propuesta. Afortunadamente, el dióxido de carbono (**CO₂**) y el monóxido de carbono (**CO**) son compuestos comunes en las lecturas registradas por ambos equipos.

Por eso, ahora se presentan dichas emisiones criterio, estimadas con los pasos descritos antes, así como su comparación con las que brindó el **PEMS**. Se ha seleccionado como ejemplo de la similitud de los resultados obtenidos con dos equipos diferentes, a la camioneta estaquitas, cuando utilizó **gasolina convencional**.

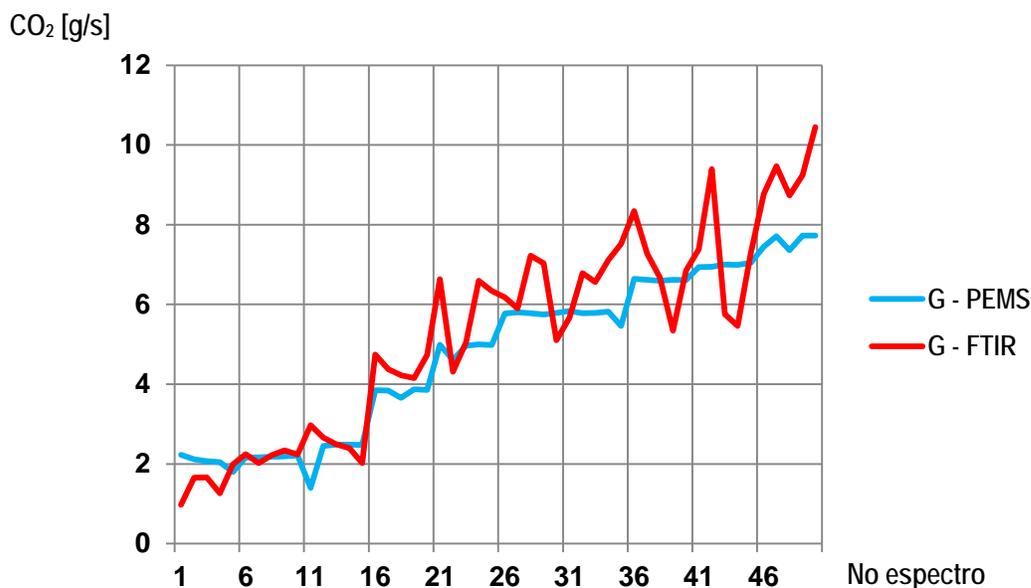


Fig. 35. Comparación de las emisiones de CO₂ obtenidas con equipos diferentes.

En la primera gráfica, se observa un aumento de la emisión de dióxido de carbono (**CO₂**) en g/s, conforme se incrementa el régimen de giro (**Fig. 35**). Dicha tendencia es similar en ambos equipos, cuyos valores son del mismo orden de magnitud, con una diferencia mayor a un alto régimen de giro del motor.

Capítulo 4. Simulación Computacional

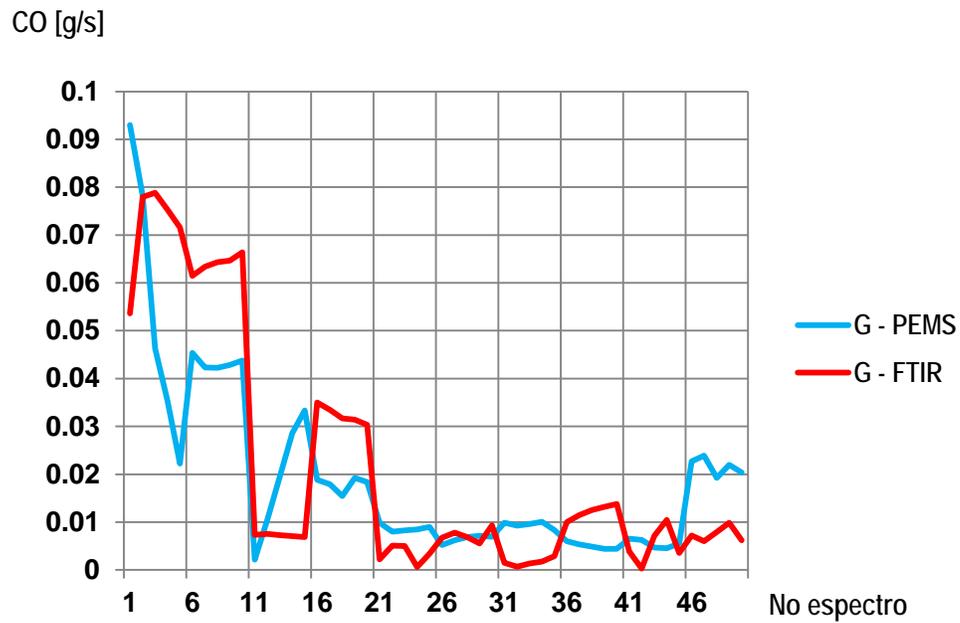


Fig. 36. Comparación de las emisiones de CO obtenidas con equipos diferentes.

Mientras en la segunda gráfica, se observa una disminución de la emisión de monóxido de carbono (**CO**) en g/s, conforme se incrementa el régimen de giro (**Fig. 36**). Dicha tendencia es similar en ambos equipos, cuyos valores son del mismo orden de magnitud, con una diferencia mayor a un bajo régimen de giro del motor.

Capítulo 4. Simulación Computacional

4.2 Mapas 3D de mezclas B5, B10, B20 y Diésel

Las pruebas en dinamómetro de banco obtuvieron información sobre las emisiones criterio mediante un **PEMS**, mientras las concentraciones de los Hidrocarburos Aromáticos Políciclicos (**HAP's**) resultaron del muestreo de las partículas emitidas en el escape de un motor diésel similar al del vehículo utilizado en las pruebas de campo.

Primeramente, se obtuvieron mapas de las emisiones criterio al utilizar diésel para ajustar las estimaciones de acuerdo a las registradas durante las pruebas de campo. Ese proceso estuvo integrado por los siguientes pasos.

Emisiones criterio

1. Los datos de régimen de giro y par aplicado al motor se acoplaron con los niveles de emisiones contaminantes de acuerdo al tiempo en que fueron registrados.

Primeramente la información de las condiciones de operación reproducidas con el dinamómetro de banco fueron ordenadas en orden ascendente considerando el régimen de giro en el motor diésel. Una gráfica de los ensayos realizados en ese motor con la mezcla B10, es un ejemplo de la organización de los datos de las pruebas con diferentes tipos de combustible (**Fig. 37**).

Una vez hecho esto, se promediaron los niveles de emisión de los contaminantes de acuerdo a la condición de operación del motor aplicada durante el ensayo. Como ejemplo, se presentan las gráficas de los niveles de emisión de **CO**, **HC** y **PM 10** registrados durante las pruebas con la mezcla B10 (**Fig. 38** y **Fig. 39**)

Capítulo 4. Simulación Computacional

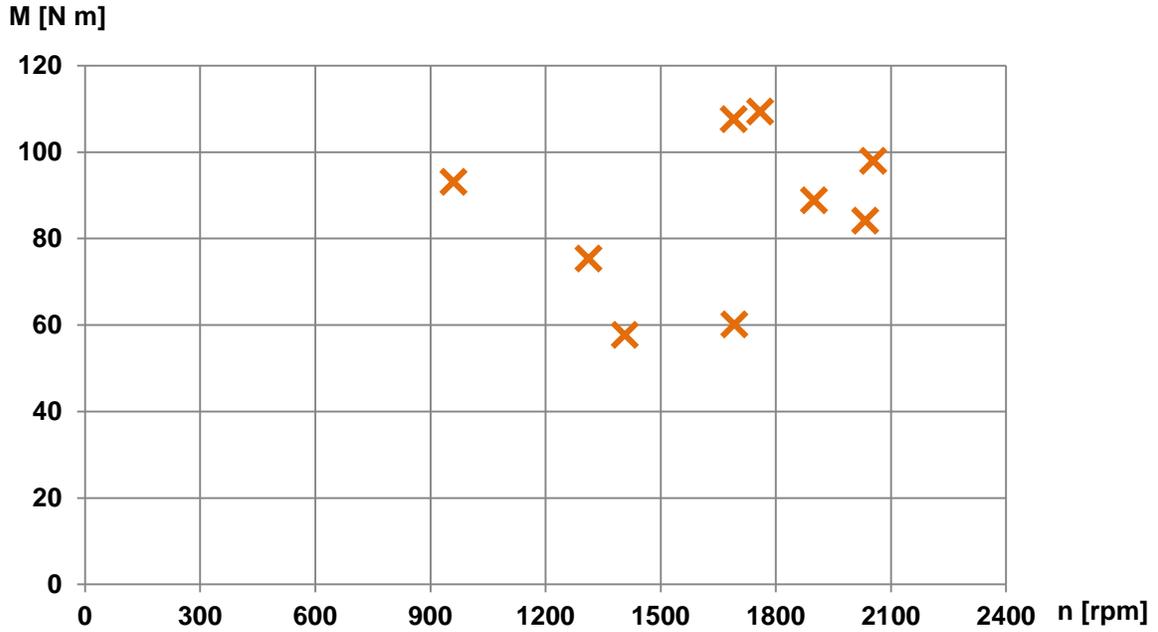


Fig. 37. Condiciones de operación de un MEP utilizando la mezcla B10.

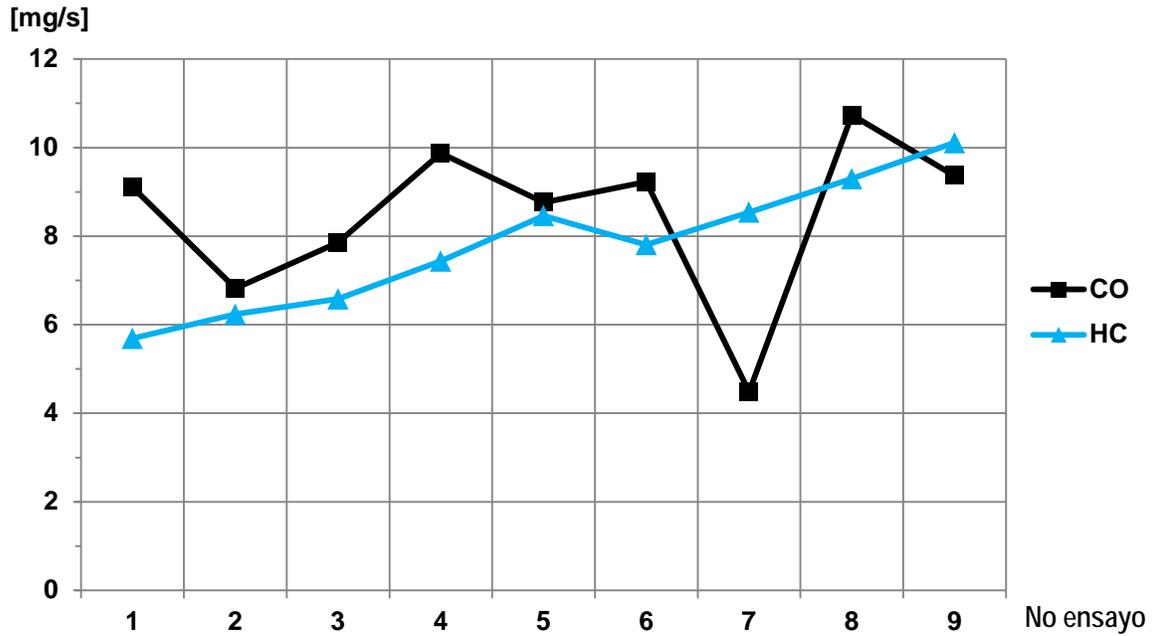


Fig. 38. Emisiones de gases criterio al utilizar la mezcla B10 en un MEP.

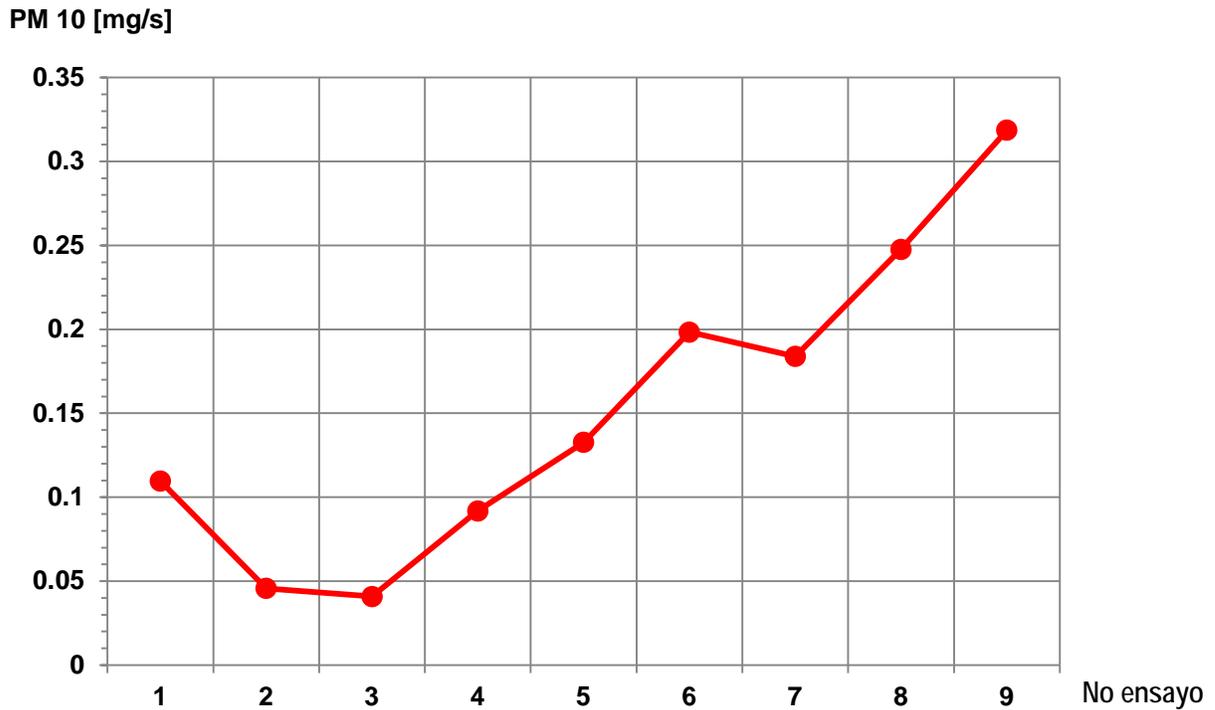


Fig. 39. Emisiones de PM 10 al utilizar la mezcla B10 en un MEP.

2. Los datos registrados fueron asignados a un eje coordenado para observar la relación entre las condiciones de operación del motor con el nivel de emisión emitido. El régimen de giro se graficó en el **eje x**, el par en el **eje y**, y el nivel de emisión en el **eje z**.
3. Sin embargo, la base de datos creada de esta forma contenía un número muy grande de puntos para suministrarse al software **ADVISOR**. Por esa razón, se establecieron 16 intervalos iguales para cada uno de los ejes coordenados, promediando los puntos dentro de cada rango y obteniendo arreglos tridimensionales.

Capítulo 4. Simulación Computacional

- Los puntos contenidos por los arreglos mencionados sirvieron para graficar una superficie. Sin embargo, esta última no abarcó las condiciones extremas de operación del motor, es decir, menor o mayor par contra menor o mayor régimen de giro (**Fig. 40**).

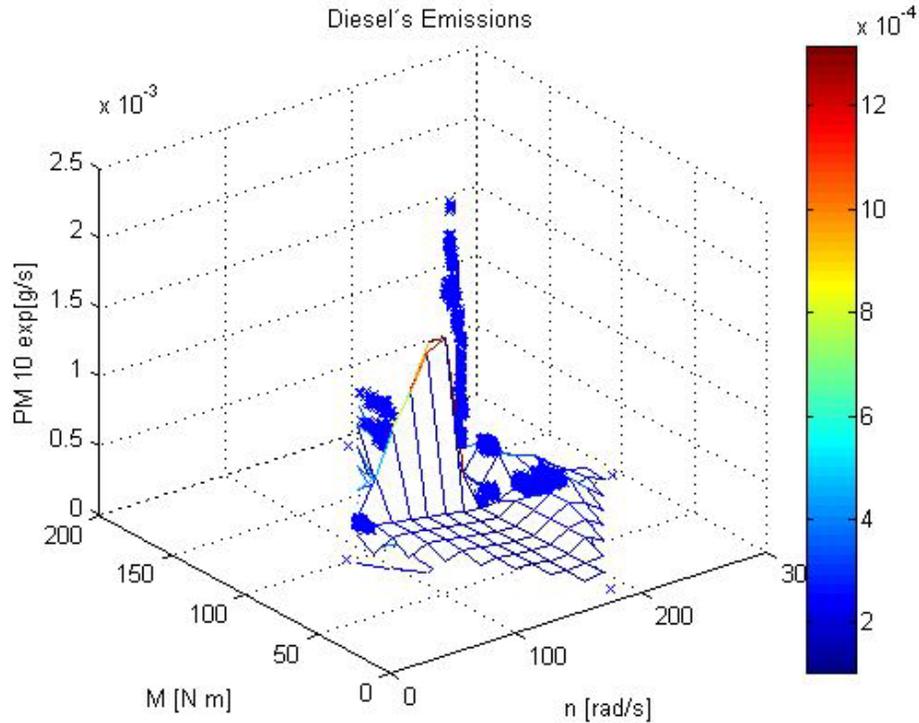


Fig. 40. Mapa 3D de PM 10 sin esquinas para una camión con motor diésel.

- Por esa razón, se establecieron niveles de emisión para esas condiciones para extender la superficie obtenida previamente, sin afectar las curvas de nivel de la misma. El resultado de ello fue un mapa 3D que relaciona todas las condiciones de operación del motor, con el nivel de emisión de un contaminante criterio (**Fig. 41**).

Capítulo 4. Simulación Computacional

Los mapas **3D** generados permitieron apreciar cómo se relacionan diferentes condiciones de operación de un **MEP** con el nivel de una emisión criterio en particular (**CO**, **CO₂**, **HC** y **NO_x**).

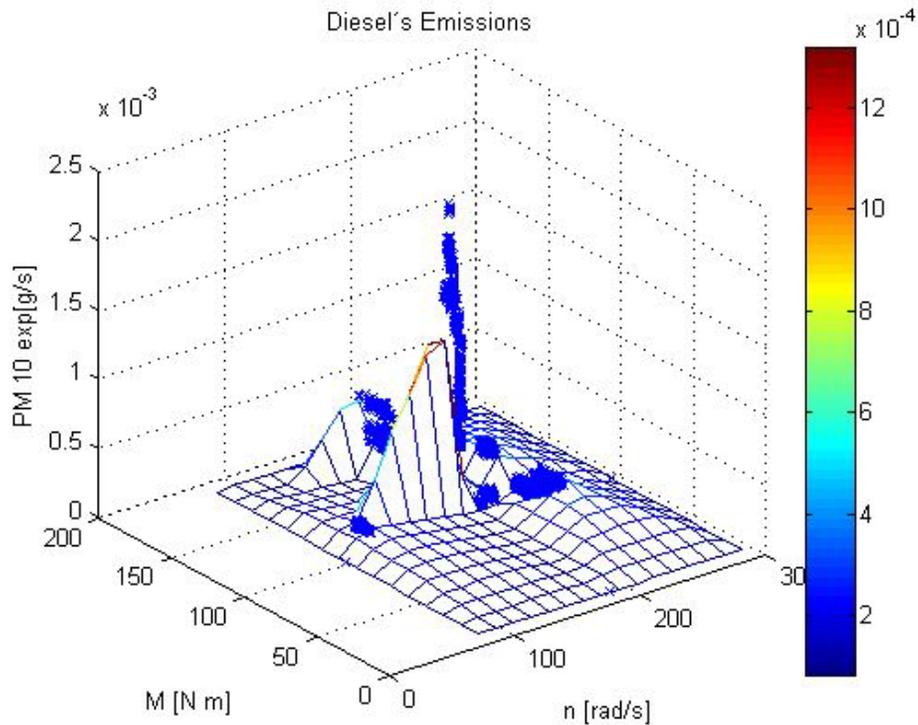


Fig. 41. Mapa 3D de PM 10 para una camión con motor diésel.

Emisiones no reguladas (Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos)

Los niveles de emisión de los **HAP's** fueron obtenidos al combinar sus emisiones en gramos por gramo de partícula emitida, con el flujo de gases de escape registrado por el **PEMS**.

La generación de los mapas respectivos a este tipo de emisiones fue realizada con el siguiente procedimiento.

Capítulo 4. Simulación Computacional

1. Los datos de régimen de giro y par aplicado al motor se acoplaron con los niveles de emisiones contaminantes de acuerdo al tiempo en que fueron registrados.

Primeramente la información de las condiciones de operación reproducidas con el dinamómetro de banco fueron ordenadas en orden ascendente considerando el régimen de giro en el motor diésel.

2. Los niveles de emisiones no reguladas se obtuvieron al multiplicar los niveles de emisiones de un determinado HAP ($\mu\text{g}_{\text{HAP}} / \text{g}_{\text{partícula emitida}}$) por el nivel emisión de partículas, de acuerdo a la condición de operación del motor diésel usada para las pruebas con un tipo de combustibles (*Fig. 42*).

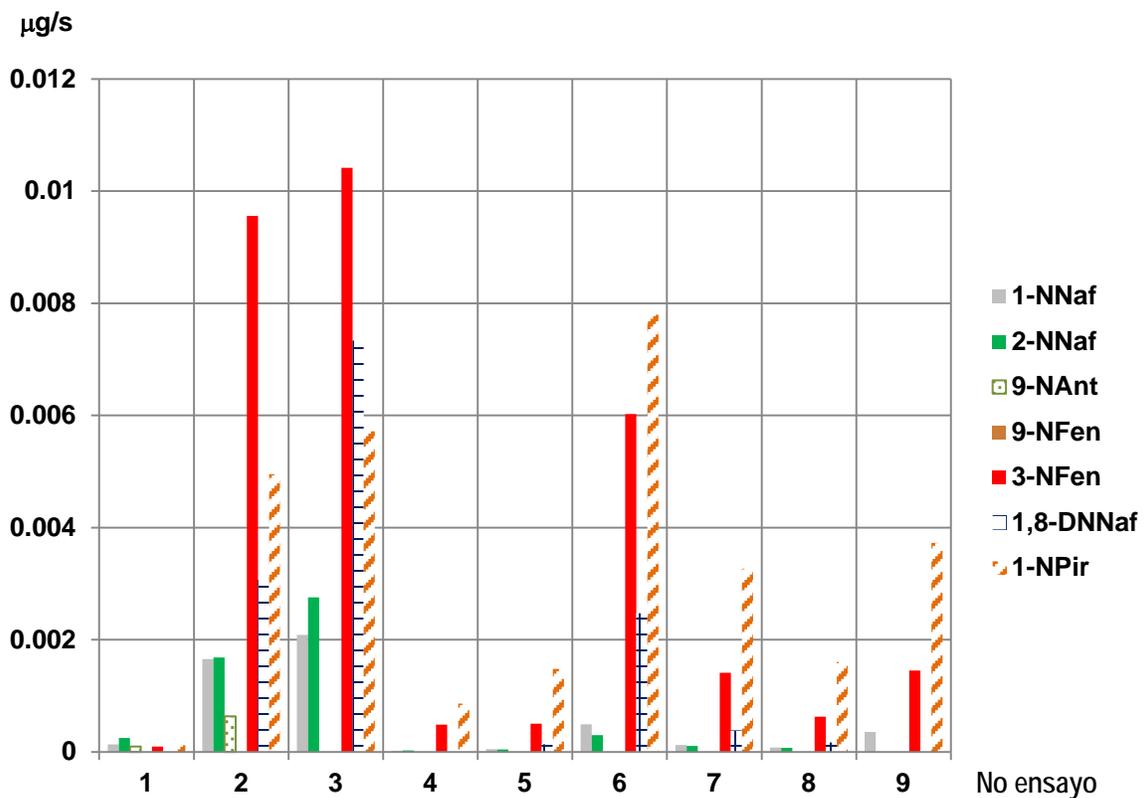


Fig. 42. Emisión de NHAP's para diferentes condiciones de operación (MEP-Diésel).

Capítulo 4. Simulación Computacional

3. Los datos registrados fueron asignados a un eje coordenado para observar la relación entre las condiciones de operación del motor con el nivel de emisión emitido. El régimen de giro se graficó en el **eje x**, el par en el **eje y**, y el nivel de emisión en el **eje z**.
4. Sin embargo, la base de datos creada de esta forma contenía un número muy grande de puntos para suministrarse al software **ADVISOR**. Por esa razón, se establecieron 16 intervalos iguales para cada uno de los ejes coordenados, promediando los puntos dentro de cada rango y obteniendo arreglos tridimensionales.
5. Los puntos contenidos por los arreglos mencionados sirvieron para graficar una superficie. Sin embargo, esta última no abarcó las condiciones extremas de operación del motor, es decir, menor o mayor par contra menor o mayor régimen de giro (**Fig. 43**).

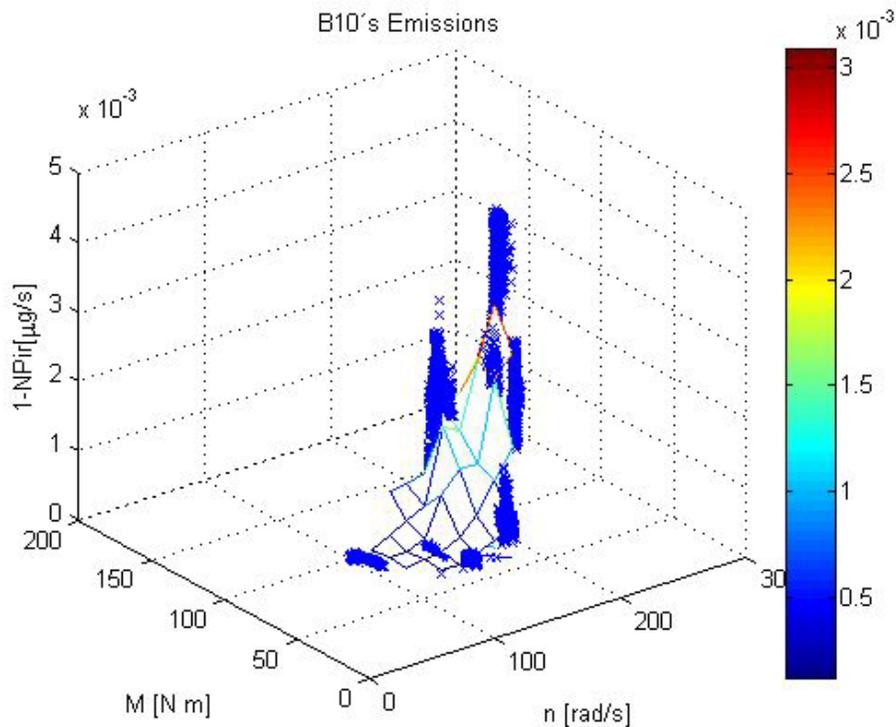


Fig. 43. Mapa 3D sin esquinas de la emisión de 1-NPir usando B10.

Capítulo 4. Simulación Computacional

6. Por esa razón, se establecieron niveles de emisión para esas condiciones para extender la superficie obtenida previamente, sin afectar las curvas de nivel de la misma. El resultado de ello fue un mapa **3D** que relaciona todas las condiciones de operación del motor, con el nivel de emisión de una emisión no regulada (**Fig. 44**).

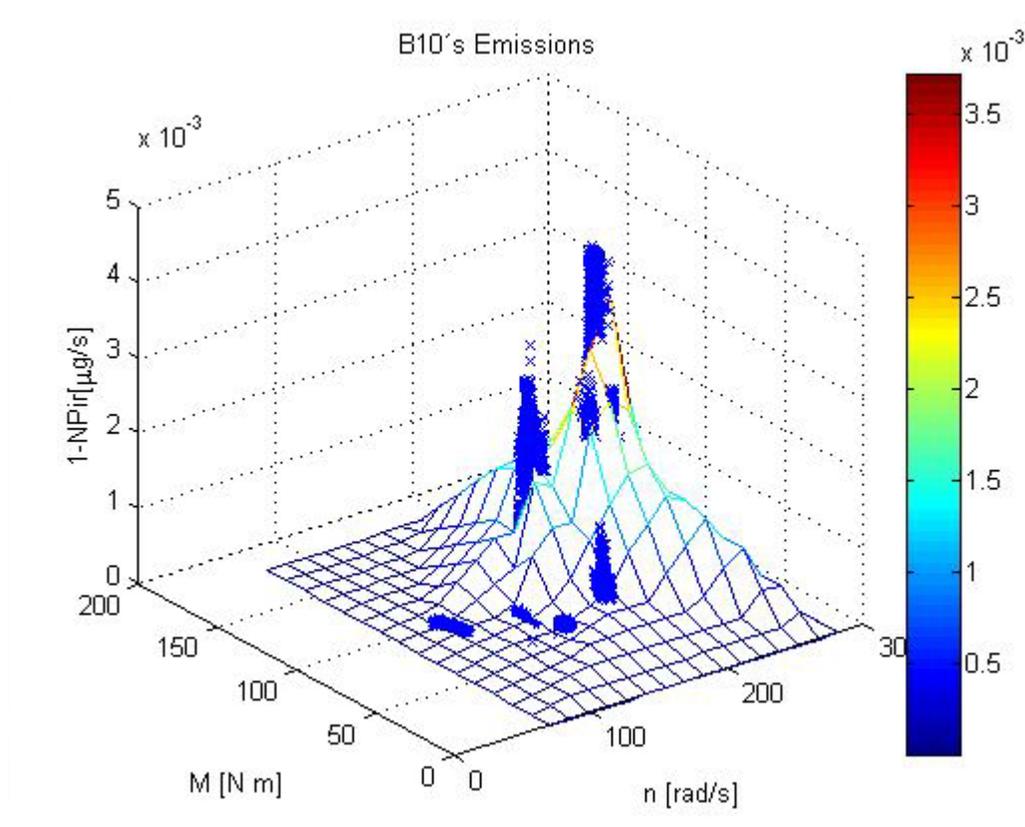


Fig. 44. Mapa 3D de la emisión de 1-NPir usando B10.

Los mapas **3D** generados permitieron apreciar como se relacionan diferentes condiciones de operación de un **MEP** con el nivel de una emisión de un **NHAP** en particular (**1-NNaftO**, **2-NNaft**, **9-Nant**, **9-NFen**, **3-NFen**, **1.8-DNNaft** y **1-NPir**). Los mapas **3D** resultantes se encuentran en el **Anexo B** de esta tesis.

Capítulo 4. Simulación Computacional

De manera similar al bioetanol, las emisiones no reguladas del biodiésel fueron estimadas empleando información registrada por el **PEMS**, debido a lo cual se brinda una muestra de la validez de dicha propuesta. En este caso, se utilizaron las emisiones criterio registradas durante las pruebas en campo, para ajustar los **mapas 3D** de emisiones criterio derivados de las pruebas en laboratorio.

Con ello se puede afirmar que el motor diésel del camión utilizado en las pruebas en campo, fue reproducido de buena manera por el motor diésel empleado en las pruebas en laboratorio. Entonces, las emisiones no reguladas corresponden a las del camión mencionado. A continuación, se presenta la emisión de hidrocarburos totales (**HC**) y de óxidos de nitrógeno (**NO_x**) al emplear diésel, compuestos relacionados con los **Nitro Hidrocarburos Aromáticos Políciclicos (NHAP's)**.

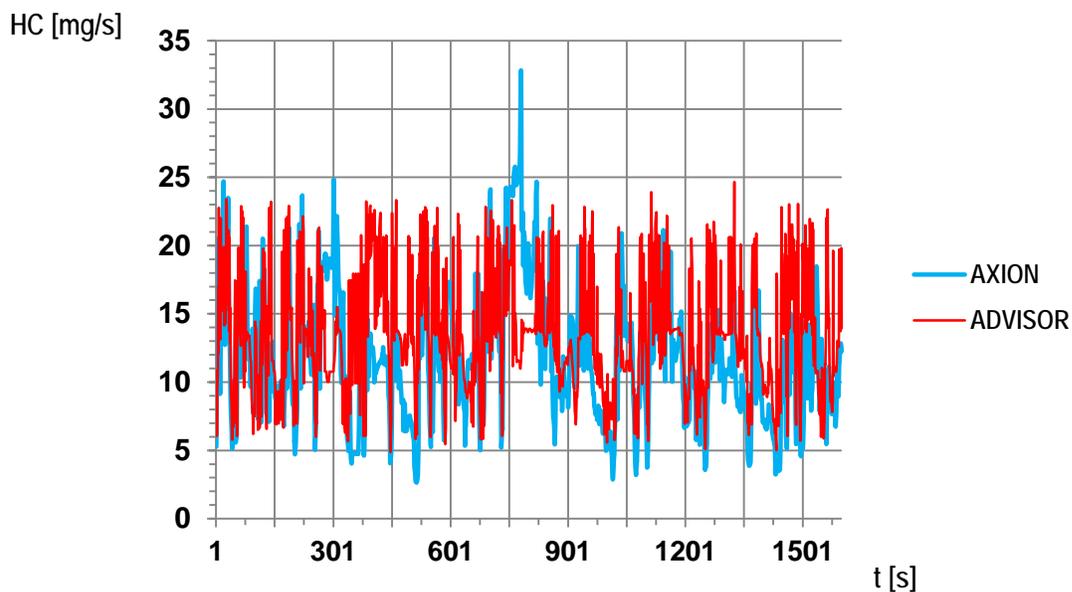


Fig. 45. Comparación de las emisiones de HC obtenidas con un PEMS y ADVISOR.

Capítulo 4. Simulación Computacional

En la primera gráfica, se observan las emisiones de **HC** en mg/s registradas en campo, así como su comparación con las estimadas en un simulador de vehículos, a partir de **mapas 3D** de las pruebas hechas en laboratorio (**Fig. 45**). Las tendencias que poseen ambos grupos de valores son similares durante todo el ciclo de manejo, con rangos muy parecidos y del mismo orden de magnitud.

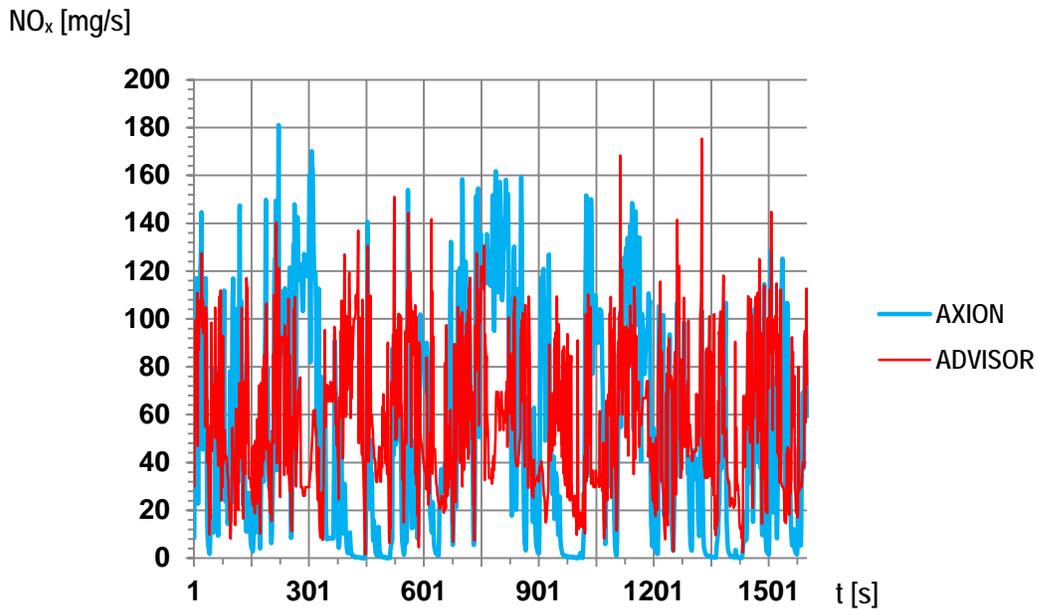


Fig. 46. Comparación de las emisiones de NO_x obtenidas con un PEMS y ADVISOR.

Mientras en la segunda gráfica, se observan las emisiones de **NOx** en mg/s registradas en campo, comparadas también con las estimadas con un simulador de vehículos, a partir de **mapas 3D** de las pruebas realizadas en laboratorio (**Fig. 46**). Nuevamente, las tendencias que poseen ambos grupos de valores son similares durante todo el ciclo de manejo, con rangos muy parecidos y del mismo orden de magnitud.

4.3 Estimación de emisiones contaminantes

Una vez concluidos los mapas de diferentes emisiones para diversas mezclas de biocombustible se procedió a modificar los diferentes modelos que integran un vehículo en el software **ADVISOR**.

Además de las características geométricas del vehículo se consideraron ciertas propiedades físicas (p.e. densidad del aire, aceleración de la gravedad, etc.) para realizar los cambios mencionados. De entre los elementos del vehículo destaca el modelo del motor de combustión interna (ya sea **MECH** o **MEP**) cuyo modelo debe incluir los mapas **3D** que relacionan todas las condiciones de operación del motor con el nivel de una emisión contaminante: criterio o no regulada.

La simulación requirió asimismo la ruta seguida por el vehículo en campo (camión repartidor de refrescos o camioneta Estaquitas). Los perfiles tiempo vs velocidad de estas últimas fueron agregados a los ciclos de manejo del simulador de vehículos, al cual puede añadirse cualquier ruta siempre que se tenga la información mencionada.

Finalmente se hace mención de las condiciones iniciales para la simulación, las cuales deben fijarse **en caliente**, es decir cuando el motor (**MECH** o **MEP**) alcanza su temperatura de operación.

Entonces la estimación de las emisiones no reguladas dependió del vehículo, el tipo de su motor (**MECH** o **MEP**) y del combustible utilizado por este último (convencional o mezcla de combustible).

A continuación se ahonda un poco respecto a las simulaciones partiendo del tipo de motor usado en las pruebas de campo.

Capítulo 4. Simulación Computacional

Aldehídos

Estas emisiones no reguladas requirieron del modelo de la camioneta Estaquitas utilizada en las pruebas de campo. Un resumen de las variables empleadas para su modelado se presenta en la **Tabla 7**.

Tabla 7. Variables requeridas para la simulación en el software ADVISOR

	Propiedad física o característica del vehículo	Variable	Valor
1	Aceleración de la gravedad, g	veh_gravity	9.78 m/s ²
2	Densidad del aire, ρ_{aire}	veh_air_density	1.2 kg/m ³
3	Coefficiente de arrastre	veh_CD	0.35
4	Área frontal	veh_FA	2.0 m ²
5	Distancia entre ejes	veh_wheelbase	2.96 m
6	Masa de carga	veh_cargo_mass	80 kg
7	Radio de la rueda	wh_radius	0.2528 m
8	Relación del diferencial	fd_ratio	4.2
9	Relaciones de transmisión	gb_ratio	3.59, 2.24, 1.41, 1.0, 0.82
10	Número de velocidades (Transmisión)	gb_gears_num	5

Los mapas de las emisiones no reguladas que integran el **Anexo A** fueron incluidos en el modelo de su motor termodinámico junto con los otros modelos de elementos del vehículo para su simulación mediante el software **ADVISOR**. (**Fig. 47**).

Capítulo 4. Simulación Computacional

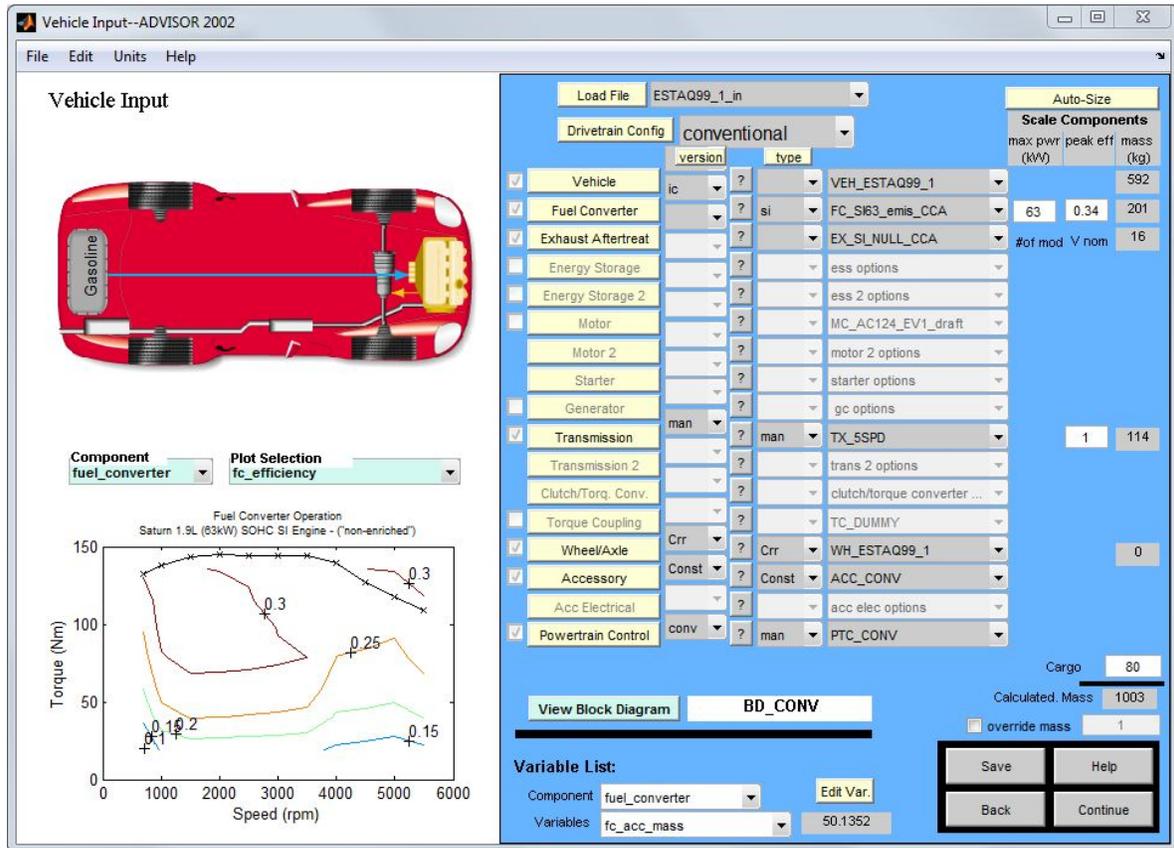


Fig. 47. Pantalla de ADVISOR que permite modificar las variables para simular un vehículo.

La estimación de las emisiones se hizo suministrando el ciclo de manejo utilizado durante las pruebas de campo de la camioneta estaquitas (**Fig. 48**) y estableciendo las condiciones iniciales denominadas en caliente, lo cual significa que el motor ha alcanzado su temperatura de operación.

Capítulo 4. Simulación Computacional

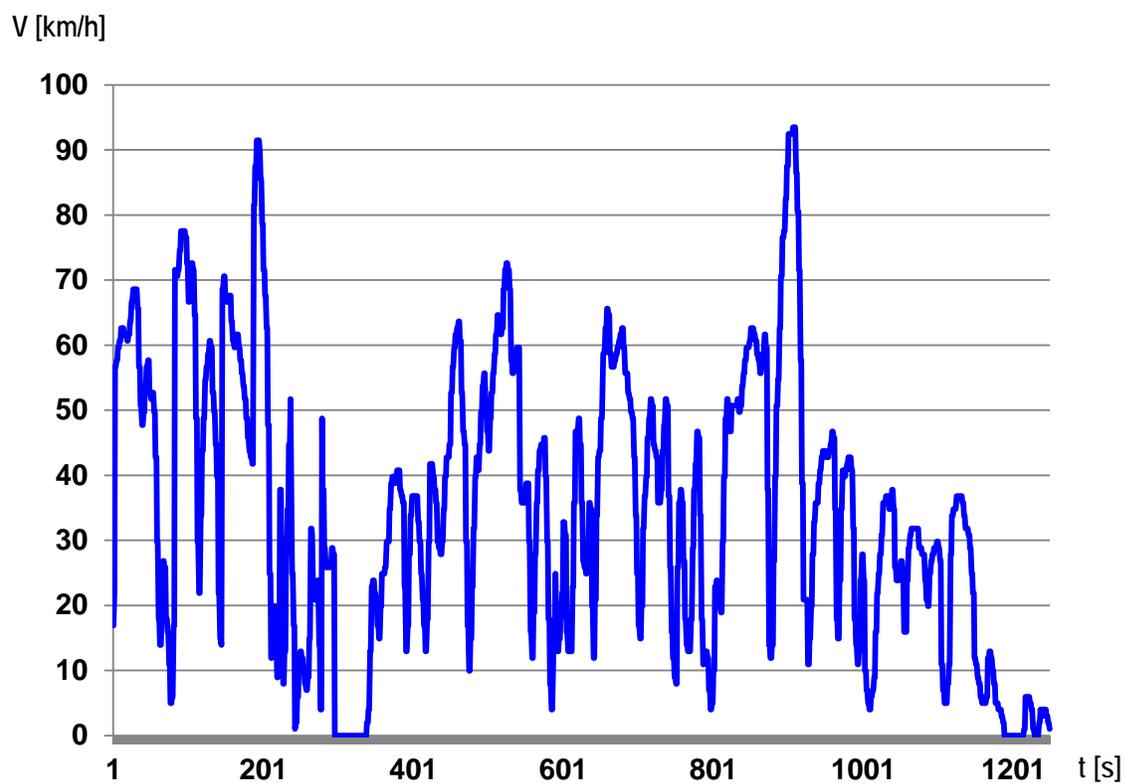


Fig. 48. Ciclo de manejo utilizado para la simulación de la camioneta Estaquitas.

Capítulo 4. Simulación Computacional

Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos

Estas emisiones no reguladas requirieron del modelo del camión repartidor de refrescos utilizado en las pruebas de campo. Un resumen de las variables empleadas para su modelado se presenta en la **Tabla 8**.

Tabla 8. Variables requeridas para la simulación en el software ADVISOR

	Propiedad física o característica del vehículo	Variable	Valor
1	Aceleración de la gravedad, g	veh_gravity	9.81 m/s ²
2	Densidad del aire, ρ_{aire}	veh_air_density	0.98 kg/m ³
3	Coefficiente de arrastre	veh_CD	0.8
4	Área frontal	veh_FA	9 m ²
5	Distancia entre ejes	veh_wheelbase	9.75 m
6	Masa de carga	veh_cargo_mass	20000 lb
7	Radio de la rueda	wh_radius	0.5 m
8	Relación del diferencial	fd_ratio	4.5
9	Relaciones de transmisión	gb_ratio	7.4, 6.05, 4.7 3.65, 2.6, 2.25, 1.9, 1.45, 1
10	Número de velocidades (Transmisión)	gb_gears_num	9

Los mapas de las emisiones no reguladas que integran el **Anexo B** fueron incluidos en el modelo de su motor termodinámico junto con los otros modelos de elementos del vehículo para su simulación mediante el software **ADVISOR**. (**Fig. 49**).

Capítulo 4. Simulación Computacional

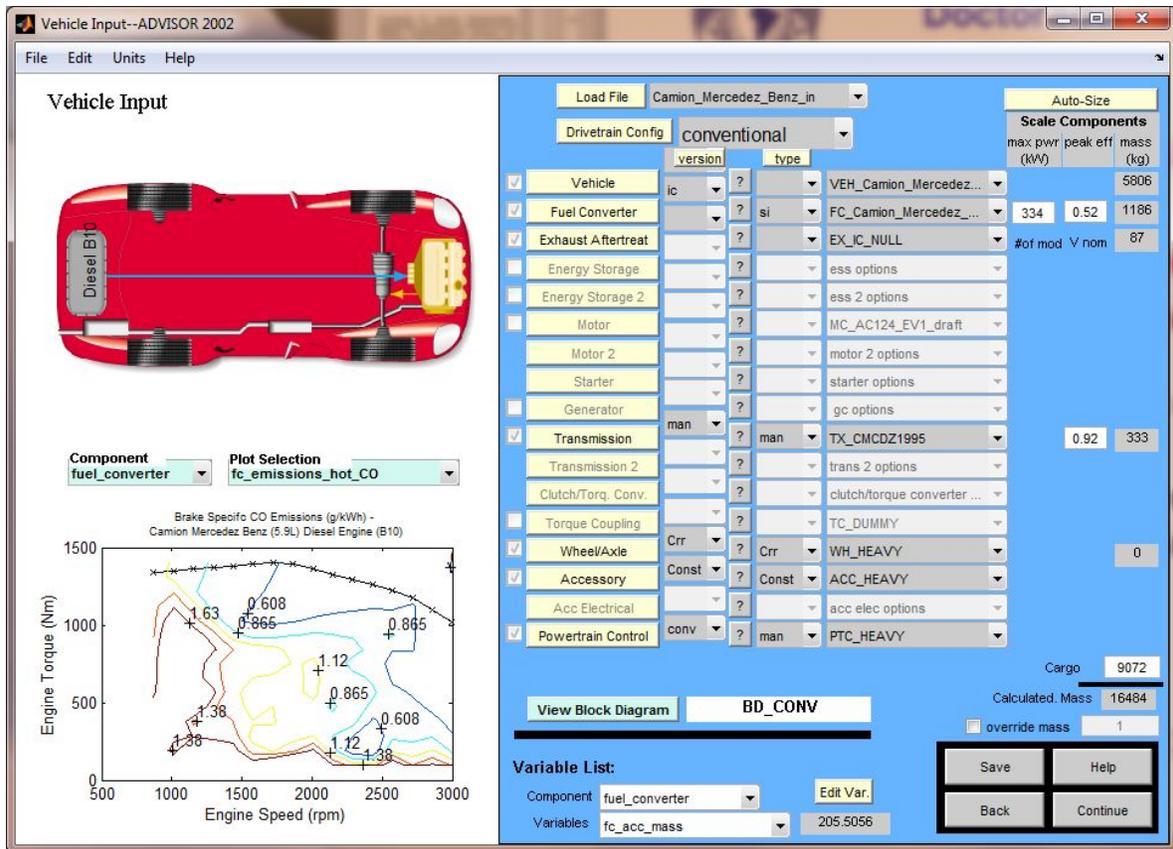


Fig. 49. Pantalla de ADVISOR con los modelos del camión Diésel.

La estimación de las emisiones se hizo suministrando el ciclo de manejo utilizado durante las pruebas de campo (**Fig. 50**) y estableciendo las condiciones iniciales denominadas en caliente, lo cual significa que el motor ha alcanzado su temperatura de operación.

Capítulo 4. Simulación Computacional

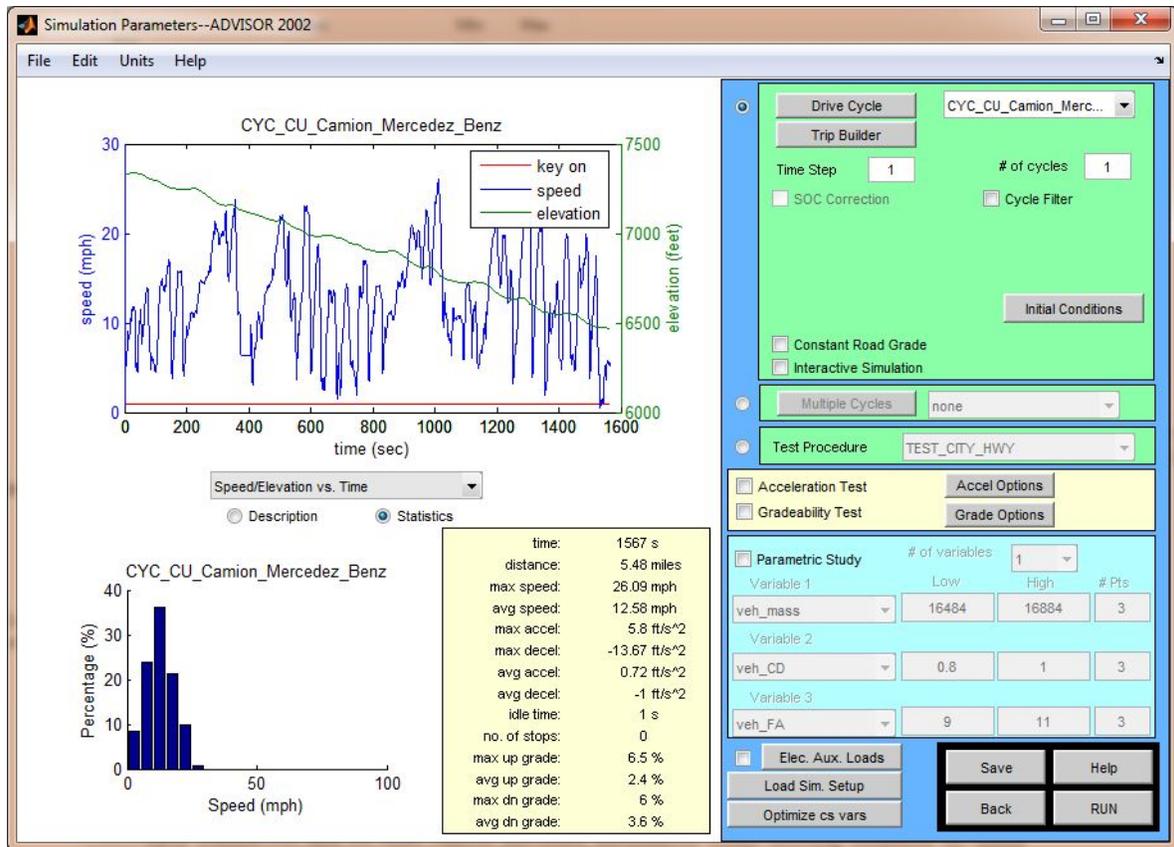


Fig. 50. Ciclo de manejo y condiciones iniciales para efectuar la simulación con el camión diésel.

El siguiente capítulo de este trabajo incluye los resultados obtenidos de manera experimental así como una comparación con las estimaciones hechas en computadora con el software **ADVISOR**.

Capítulo 5.

RESULTADOS

5.1 Prestaciones del MCIA al utilizar mezclas E6, B5, B10 y B20

Las prestaciones de un **MCIA** incluyen el par y el consumo de combustible durante su funcionamiento. Primeramente, se presenta una gráfica con las condiciones de operación aplicadas al motor de tres vehículos, los dos más nuevos usados para las pruebas en laboratorio: **Chevy** y **Sentra**, así como el más viejo: **Estaquitas**. A bajo régimen de giro del motor, las condiciones de operación con gasolina fueron menores a las obtenidas con la mezcla **E6** (**Fig. 51** - puntos 1, 2, 3 y 4). En cambio a un mayor régimen de giro, se presentó la situación opuesta (**Fig. 51** - puntos 5, 6, 7, 8, 9 y 10).

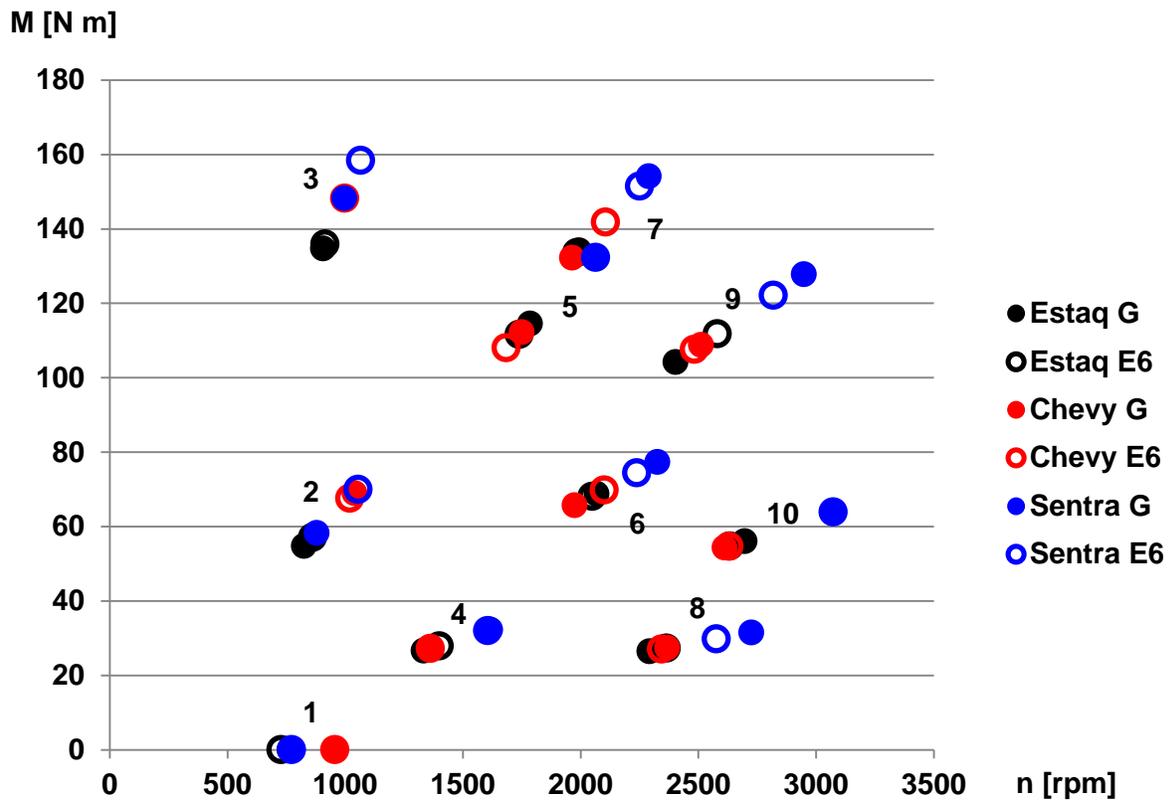


Fig. 51. Condiciones de operación aplicadas al motor de diferentes vehículos, empleando gasolina y mezcla E6.

Capítulo 5. Resultados

El funcionamiento sin carga aplicada al motor (**Fig. 51 - punto 1**), o en ralentí, permite apreciar la diferencia existente entre los motores de dichos vehículos, siendo el motor del **Chevy** el más rápido, inclusive con la mezcla **E6**.

La comparación entre el consumo de combustible se realizó considerando dos de los tres vehículos mencionados: el más nuevo con el más viejo y entre los dos más recientes. En el primer caso, el consumo del **Chevy 2011** fue menor que el de la **Estaquitas 1999**, una diferencia que aumentó conforme se incrementó el régimen de giro del motor. (**Fig. 52**). Además, la figura muestra como el vehículo viejo utilizó más gasolina que **E6**, de forma opuesta al más nuevo.

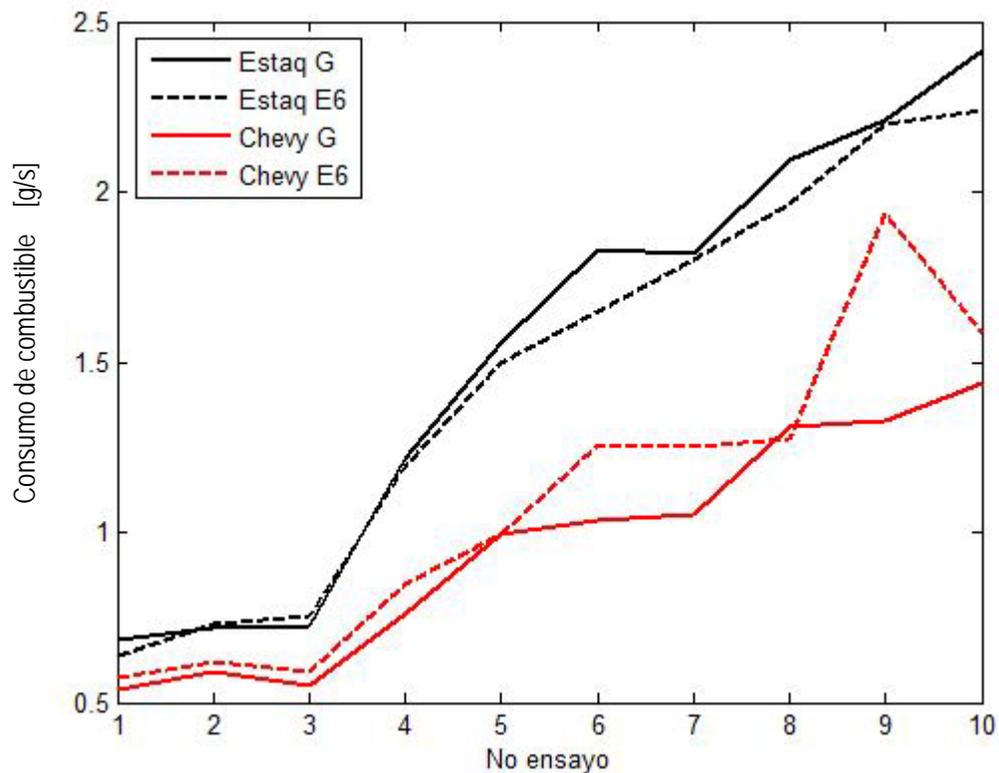


Fig. 52. Consumo de combustible del vehículo más reciente y el más viejo (ensayos en laboratorio).

Capítulo 5. Resultados

El consumo de combustible entre los vehículos más recientes: el **Chevy 2011** con el **Sentra 2005**, mostró un comportamiento similar pero con una menor diferencia (**Fig. 53**). Nuevamente, entre estos vehículos, el más viejo de ellos: el Sentra, tuvo un mayor consumo de gasolina que de mezcla **E6**.

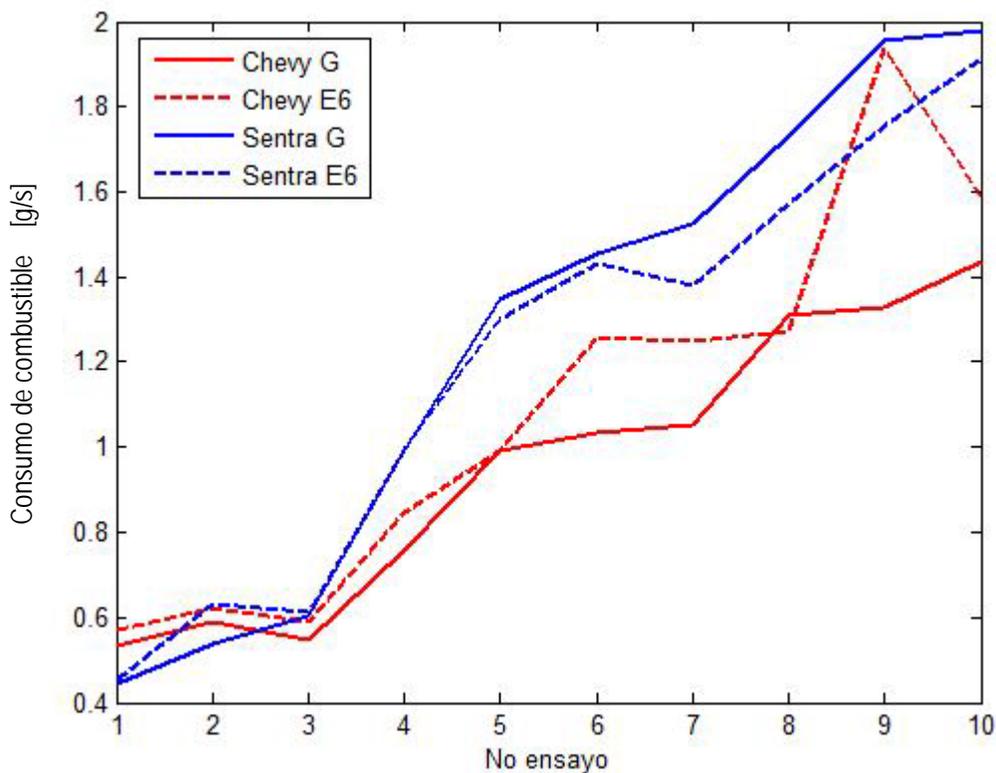


Fig. 53. Consumo de combustible de los vehículos más recientes (ensayos en laboratorio).

De manera similar a las pruebas con bioetanol, se presenta una gráfica con las condiciones de operación del motor diésel, reproducidas en los ensayos en laboratorio. En estos casos, el incremento de biodiésel en la mezcla con diésel convencional disminuyó el régimen de giro del motor, y en consecuencia el valor del par aplicado. (**Fig. 54**).

Capítulo 5. Resultados

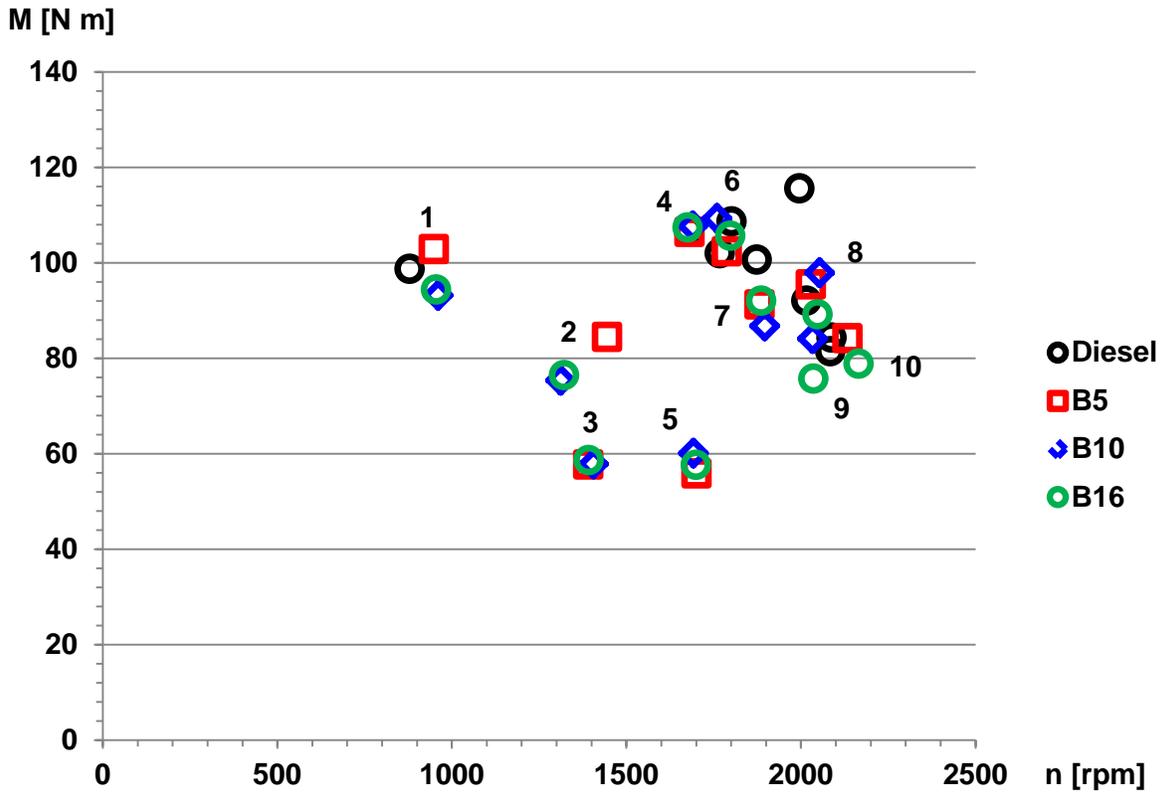


Fig. 54. Condiciones de operación aplicadas al motor diésel, empleando diésel y mezcla B5, B10 y B16.

Lo anterior se puede apreciar al observar la diferencia entre los ensayos con **B10** y **diésel**, aunque el régimen de giro del motor es mayor para el primero, el par aplicado es menor. Además, el menor régimen de giro en las pruebas siempre lo tuvo la mezcla **B16**, del cual se presentan los resultados obtenidos con 10 condiciones de operación.

Los mayores valores de consumo de combustible estos ensayos, los tuvo el diésel. (*Fig. 55*). Sin embargo, es posible que tales valores difieran a lo reportado porque el equipo encargado de proporcionar dicha información: **AXION**, emplea la composición del combustible para estimar el consumo.

Capítulo 5. Resultados

Es importante recalcar que el biodiésel utilizado no fue elaborado empleando una sola materia prima, en su mayor parte fue sebo de res, y su composición no fue proporcionada por el fabricante. Por eso, la composición de biodiésel utilizada se basó en la que posee un biocombustible producido a partir de una sola materia prima.

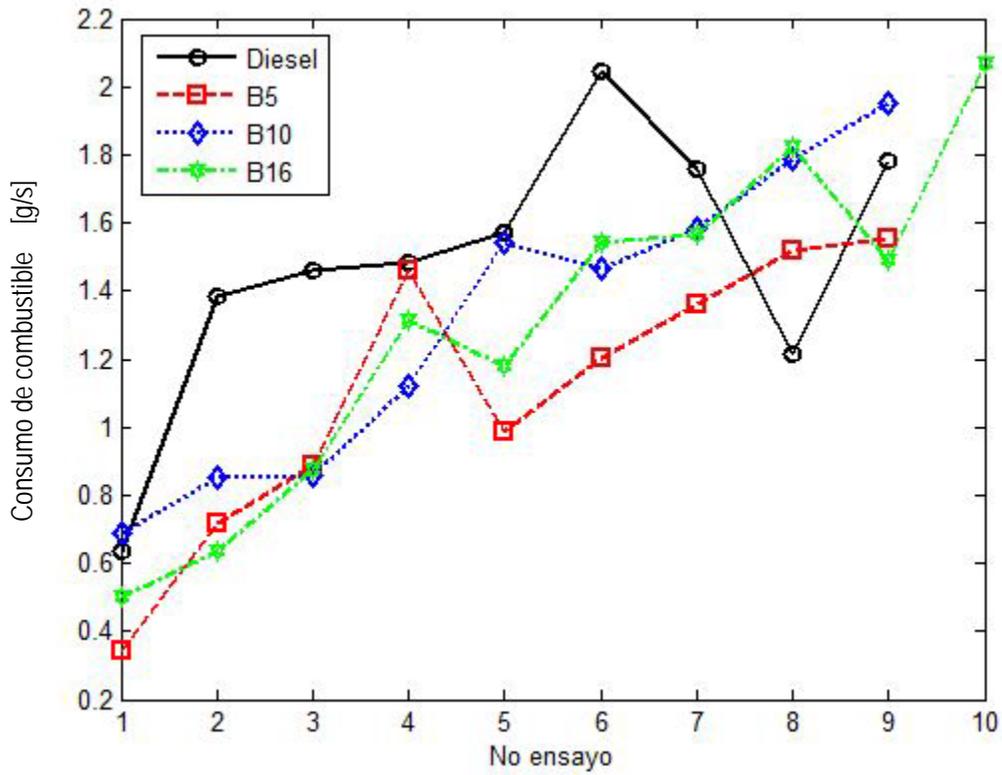


Fig. 55. Consumo de combustible para las condiciones de operación de la Fig. 48.

Capítulo 5. Resultados

5.2 Emisiones contaminantes

Este apartado presenta las emisiones contaminantes estimadas de la información obtenida en laboratorio, por la combinación de varias técnicas y equipos. Además, otra parte está dedicada a las emisiones no reguladas obtenidas con el simulador de vehículos **ADVISOR**. La metodología utilizada es abarcada a detalle por el anterior capítulo, y se consideran únicamente las emisiones no reguladas más abundantes, producidas por la combustión del bioetanol y el biodiésel.

LCE

La estimación de las emisiones no reguladas en el laboratorio sirvió para generar los **mapas 3D** contenidos en los anexos **A** y **B** de esta tesis. Entre las emisiones estimadas con bioetanol y biodiésel, se han seleccionado las del primer combustible debido un número de datos menor en comparación con el segundo, lo cual permite apreciar mejor las variaciones entre ellas.

Las siguientes gráficas corresponden a las emisiones no reguladas, producto de la combustión de la **gasolina** y la **mezcla E6**, al utilizarse en el vehículo más nuevo (**Chevy 2011**), así como en el más viejo (**Estaquitas 1999**) empleado para las pruebas.

La emisión de acetileno (C_2H_2) en g/s, fue menor para el **Chevy** en comparación con la **Estaquitas**, al usar cualquier combustible (**Fig. 56**). La gráfica permite apreciar como dicha diferencia es mayor a bajo régimen de giro del motor, sin importar el par aplicado (No espectros 1 al 21), y a un régimen mayor de giro cuando se aplica un alto par al motor (No espectros 36 al 41). Dichos espectros corresponden respectivamente, a los *puntos 1, 2, 3, 4 y 8* de la **Fig. 51**. La presencia de este compuesto es muy importante porque se ha señalado que su formación antecede a la de los **NHAPs**, compuestos calificados como tóxicos e inclusive cancerígenos para la salud humana.

Capítulo 5. Resultados

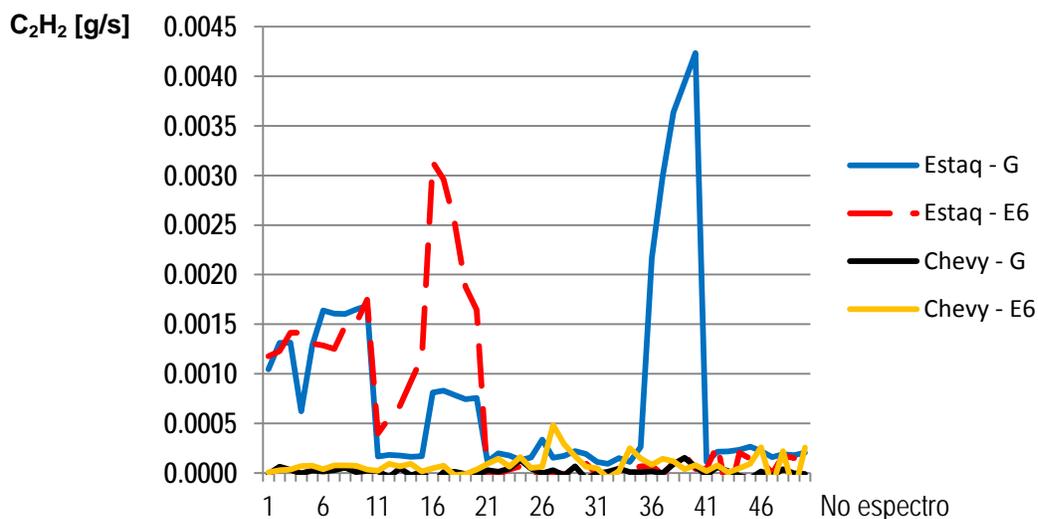


Fig. 56. Emisiones de C_2H_2 usando gasolina y mezcla E6.

La emisión de formaldehído (H_2CO) en g/s, fue menor para el **Chevy** en comparación con la **Estaquitas**, en la mayoría de las condiciones de operación del motor, al usar cualquier combustible (Fig. 57). El único caso en que no fue así, se presentó a un régimen de giro del motor medio y un alto par (No espectros 26 al 31, que corresponden al *punto 6* de la Fig. 51). La formación de este compuesto contribuye a la contaminación de la atmósfera de dos maneras: en los gases de escape del vehículo como un contaminante primario y como un precursor de la formación de un contaminante secundario: smog fotoquímico.

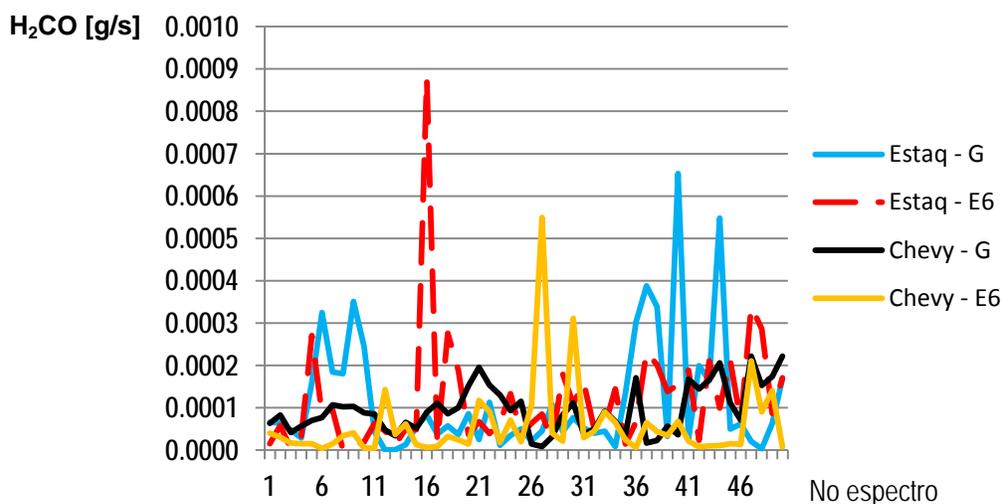


Fig. 57. Emisiones de H_2CO usando gasolina y mezcla E6.

Capítulo 5. Resultados

En el caso de la emisión de metano (CH_4) en g/s, el uso de la mezcla **E6** se tradujo en un aumento de dicho contaminante, en mayor medida para el vehículo más nuevo. La gráfica permite apreciar que para esos vehículos, la diferencia más grande se presentó a un alto régimen de giro del motor (**Fig. 58** - No espectros 26 al 50), sin importar el par aplicado (**Fig. 51** - puntos 6,7,8,9 y 10).

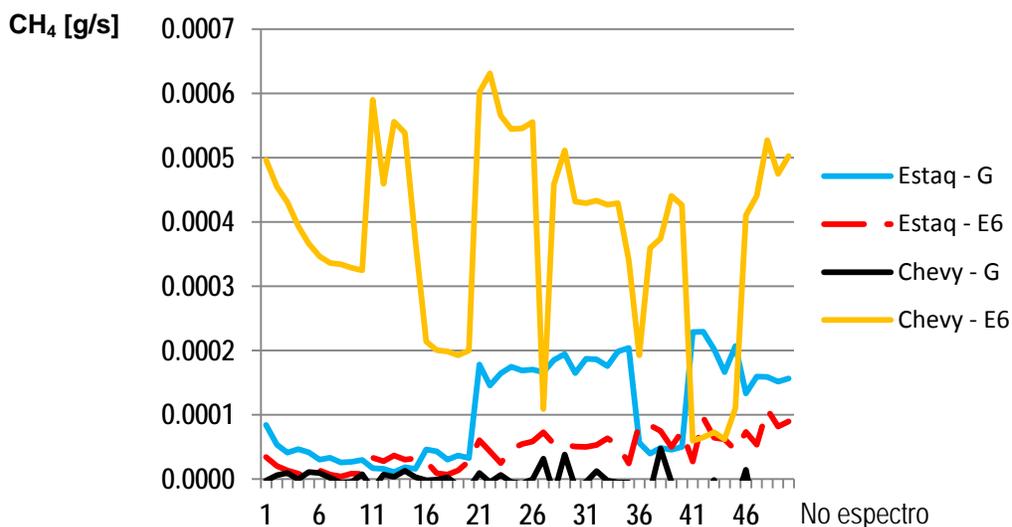


Fig. 58. Emisiones de CH_4 usando gasolina y mezcla E6.

Por su parte, la emisión de amoníaco (NH_3) en g/s, fue mayor para el vehículo más viejo, principalmente a un bajo régimen de giro del motor (No espectros 1 al 21 de la **Fig. 59**, que corresponden a los puntos 1,2,3 y 4 de la **Fig. 51**). Es de llamar la atención que la mezcla **E6** siempre produjo una mayor emisión de este contaminante, en comparación con la gasolina, sobre todo a un alto régimen de giro y un alto par aplicado al motor (No espectros 36 al 50, que corresponden al punto 8 de la **Fig. 51**).

Capítulo 5. Resultados

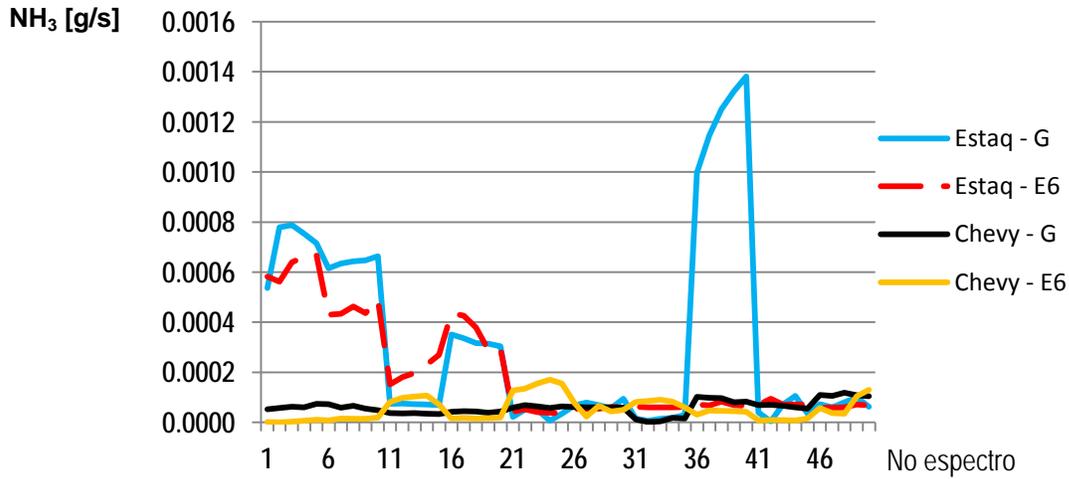


Fig. 59. Emisiones de NH₃ usando gasolina y mezcla E6.

En cambio, la emisión de agua (H₂O) en g/s, dependió del la antigüedad del vehículo: mayor con gasolina en el más viejo (**Estaquitas**) y menor con la mezcla **E6** en el más nuevo (**Chevy**). En la gráfica correspondiente (**Fig. 60**), se observa una tendencia ascendente para dicha emisión conforme se incrementa el régimen de giro del motor .

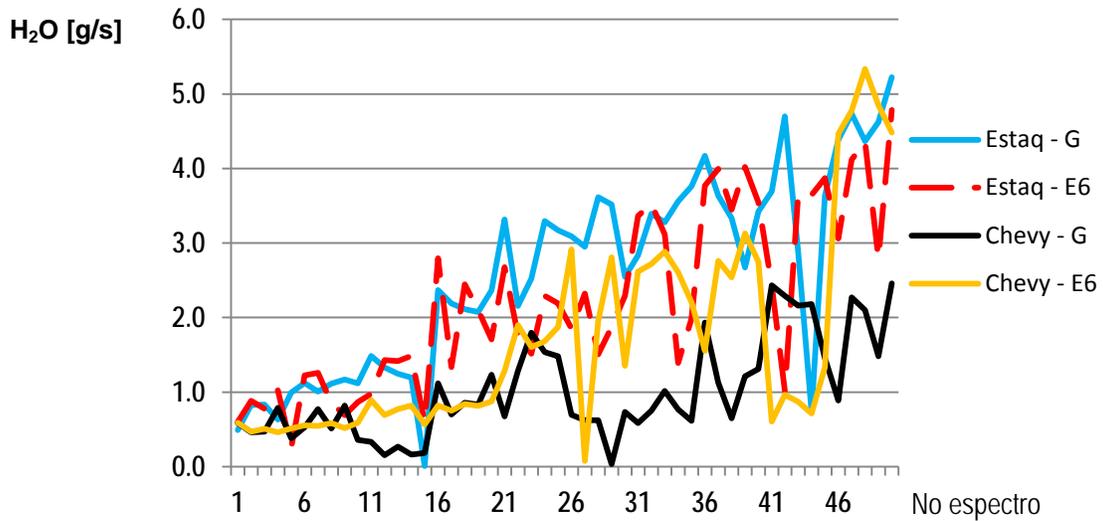


Fig. 60. Emisiones de H₂O usando gasolina y mezcla E6.

Capítulo 5. Resultados

ADVISOR

La aplicación de los **mapas 3D** generados con este trabajo, ahora se ejemplifica al presentar las emisiones estimadas con ellos, utilizando un simulador de vehículos. Para ello, se seleccionaron las emisiones no reguladas producto de la combustión del diésel y sus mezclas con biodiésel: **B5**, **B10** y **B16**. Esto debido a que pueden compararse sus emisiones no reguladas estimadas, a partir de los **mapas 3D** generados en laboratorio, con la simulación del camión empleado durante las pruebas en campo.

En primer término, se presenta el ciclo de manejo empleado para la simulación, un recorrido dentro de ciudad universitaria **CU - UNAM**, el cual fue seguido por el camión repartidor de refrescos, durante las pruebas en campo (**Fig. 61**).

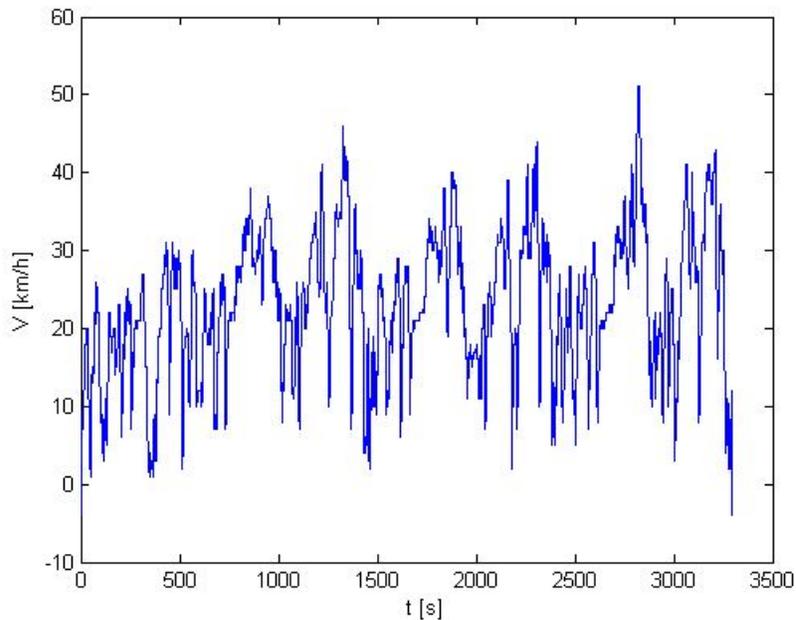


Fig. 61. Ciclo de manejo utilizado para las pruebas de un camión diésel en campo .

Capítulo 5. Resultados

La emisión de **1-Nitronaftaleno** y **2-Nitronaftaleno** en $\mu\text{g/s}$, presentó un comportamiento similar, por lo cual únicamente se presenta la gráfica de una de ellas (**Fig. 62**). En tal figura, las líneas negras corresponden a los niveles de emisión obtenidos con **diésel convencional**; mientras las líneas en otros colores muestran una notoria disminución producida por el uso de cualquier mezcla de biodiésel: **B5**, **B10** y **B16** en el motor.

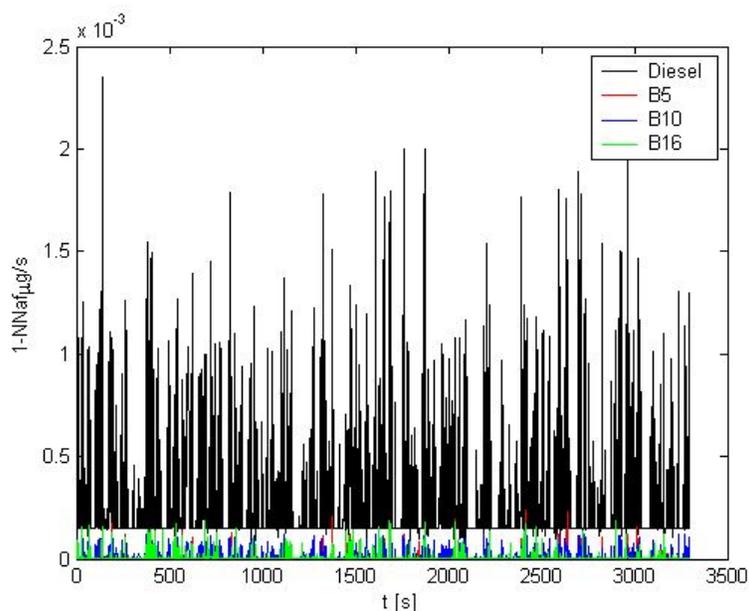


Fig. 62. Emisión de 1-NNaf usando diferentes tipos de combustible.

A diferencia de las emisiones anteriores, la de **9-Nitroantraceno (9-NAnt)** en $\mu\text{g/s}$, se presentó únicamente con dos combustibles: diésel convencional y la mezcla de biodiésel **B5**. (**Fig. 63**) En la gráfica respectiva, es posible apreciar una menor diferencia entre tales emisiones, donde las líneas rojas (mezcla **B5**) son aproximadamente de la mitad de tamaño que las líneas negras (**diésel convencional**). Además, la mezcla de biodiésel mencionada parece incrementar la emisión de este compuesto en las desaceleraciones más drásticas del camión.

Capítulo 5. Resultados

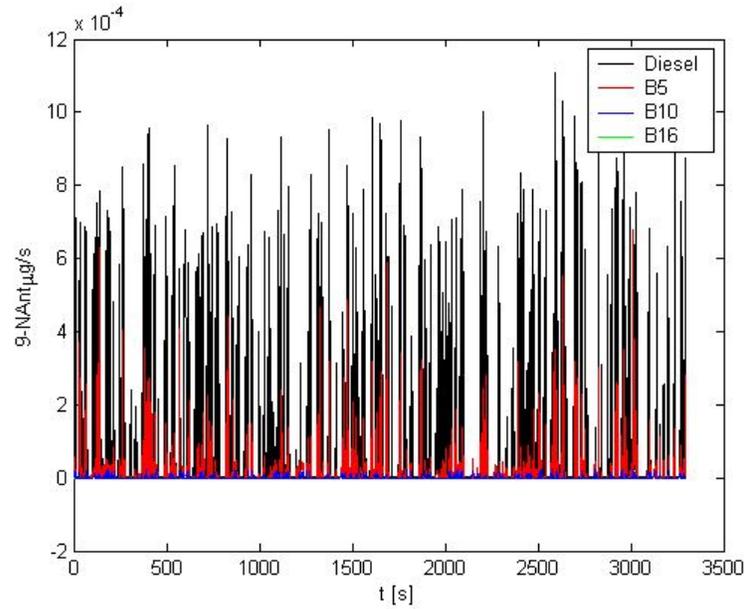


Fig. 63. Emisión de 9-NAnt usando diferentes tipos de combustible.

En cambio, la emisión de **9-Nitrofenantreno (9-NFen)** en $\mu\text{g/s}$, se presentó con las mezclas de biodiésel: **B10** y **B16**. (**Fig. 64**). La observación de la gráfica correspondiente, muestra valores del mismo orden de magnitud para ambos combustibles, líneas azules y verdes, predominando estas últimas (mezcla **B16**).

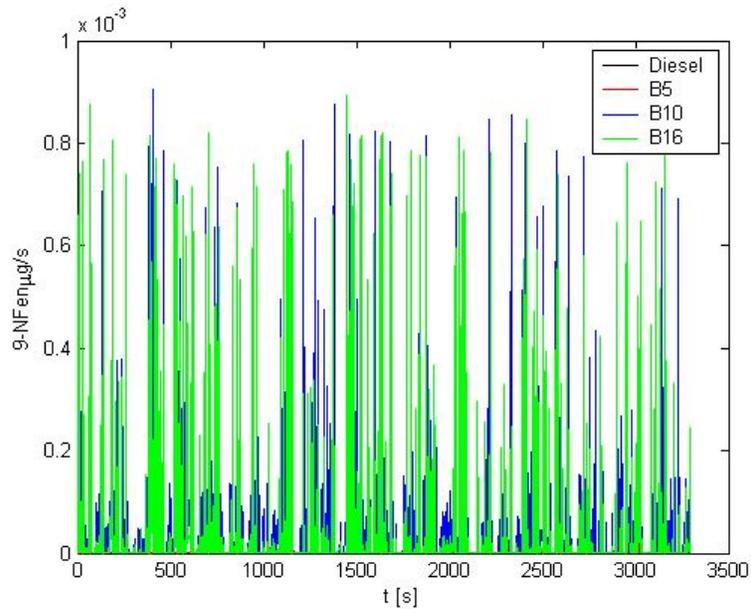


Fig. 64. Emisión de 9-NFen usando diferentes tipos de combustible.

Capítulo 5. Resultados

Por su parte, la emisión de **3-Nitrofenantreno (3-NFen)** en $\mu\text{g/s}$, se presentó con casi todos los tipos de combustible, a excepción de la mezcla de biodiésel **B10**. (**Fig. 65**). Los niveles más altos y por un mayor tiempo los produjo el diésel, después la mezcla **B16** y finalmente la mezcla **B5**. Además, las mezclas de biodiésel aparecieron con una velocidad menor del vehículo.

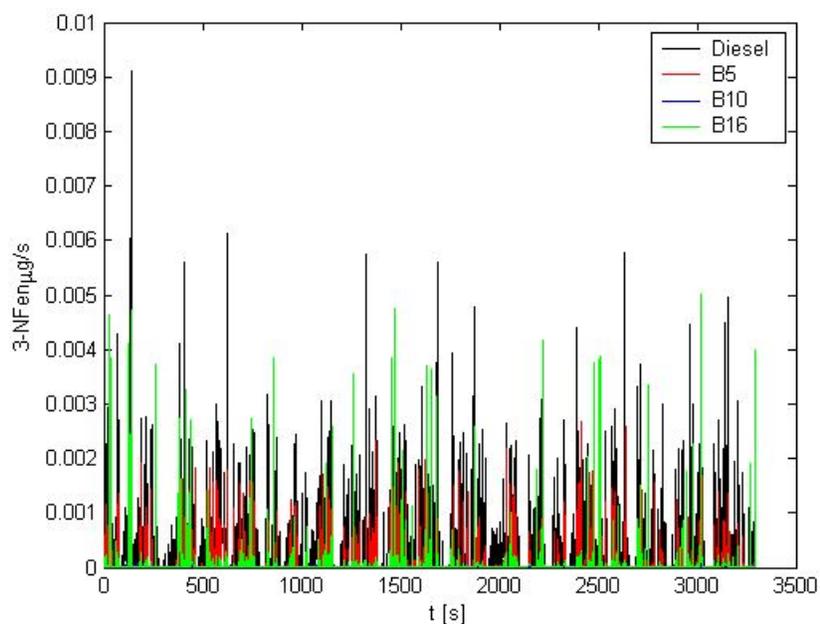


Fig. 65. Emisión de 3-NFen usando diferentes tipos de combustible.

La emisión de **1,8-Dinitronaftaleno (1,8-DNNaf)** en $\mu\text{g/s}$, se presentó principalmente con las mezclas de biodiésel **B5** y **B16** (**Fig. 66**). La primera de ellas provocó niveles de emisión menores durante prácticamente todo el ciclo de manejo, mientras que la segunda produjo los mayores niveles durante tiempos muy cortos.

Capítulo 5. Resultados

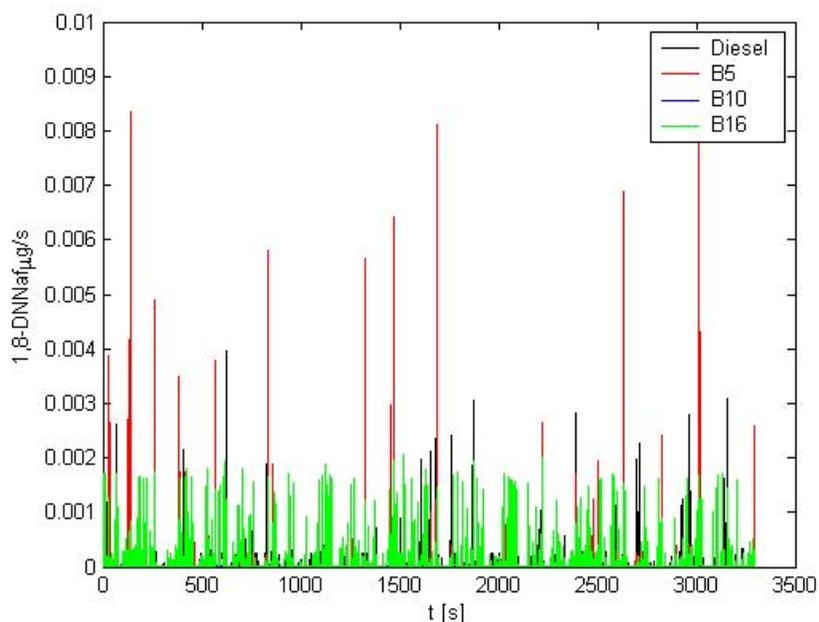


Fig. 66. Emisión de 3-NFen usando diferentes tipos de combustible.

A diferencia de los dos últimos compuestos, la emisión de **1-Nitropireno (1-NPir)** en $\mu\text{g/s}$, se presentó con todos los tipos de combustible (**Fig. 67**), siguiendo la misma tendencia para las mezclas de biodiésel mencionada para el **3-NFen**. Aunque, con una variación menor entre los combustibles utilizados.

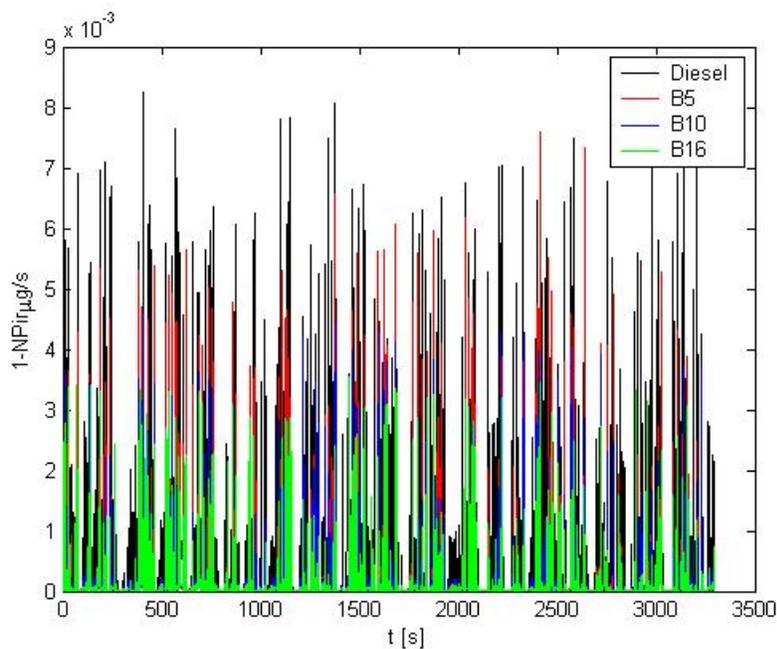


Fig. 67. Emisión de 1-NPir usando diferentes tipos de combustible.

5.3 Especiación más detallada de dichas emisiones

Ahora se presenta una especiación de las emisiones no reguladas más abundantes de los ensayos obtenidos en laboratorio hechos con bioetanol. Los valores fueron estimados a partir de la información obtenida, como se describió en el capítulo anterior.

Las comparaciones realizadas incluyen la combinaciones de tres vehículos: **Estaquitas**, **Chevy** y **Sentra**, así como dos combustibles: **gasolina** y la **mezcla de bioetanol E6**.

La emisión de **acetileno (C_2H_2)** en g/s, presentó una disminución en los vehículos más recientes (**Sentra** y **Chevy**), en comparación con el de mayor antigüedad (**Estaquitas**). Tal diferencia, se presentó a un bajo régimen de giro del motor, sin importar el par aplicado (No ensayos 1, 2, 3, 4 y 5 de la **Fig. 68**); así como a un alto régimen de giro del motor y un bajo par aplicado al mismo (**punto 8 de la Fig. 51**).

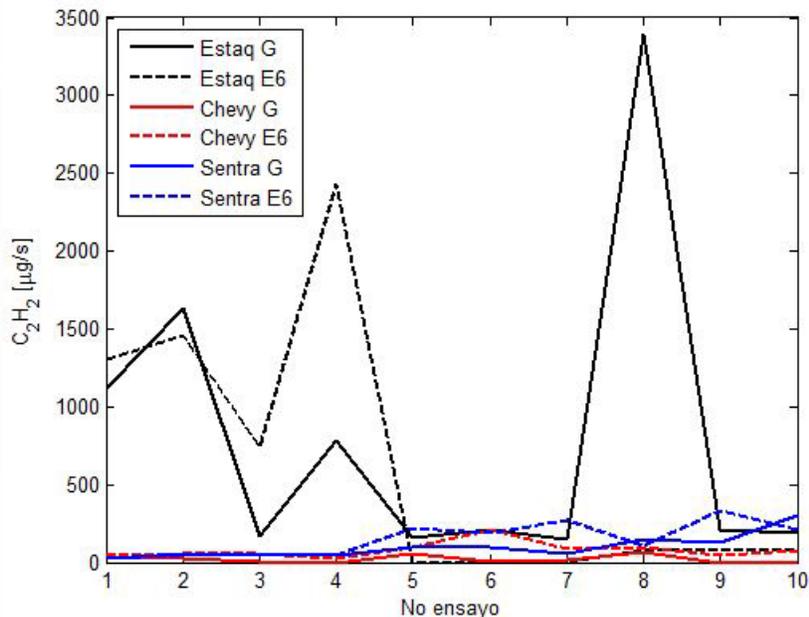


Fig. 68. Emisiones de C_2H_2 a diferentes condiciones de operación de un motor MECH.

Capítulo 5. Resultados

En cambio, la emisión de **metano (CH₄)** en g/s, fue menor con el vehículo más viejo (**Estaquitas**) en comparación con la de los vehículos más recientes (**Sentra y Chevy**). Principalmente, a un alto régimen de giro del motor, sin importar el par aplicado (No ensayos 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 de la **Fig. 69**). Además, la mezcla **E6** provocó una disminución de esta emisión en comparación con la gasolina, a excepción del vehículo **Sentra**.

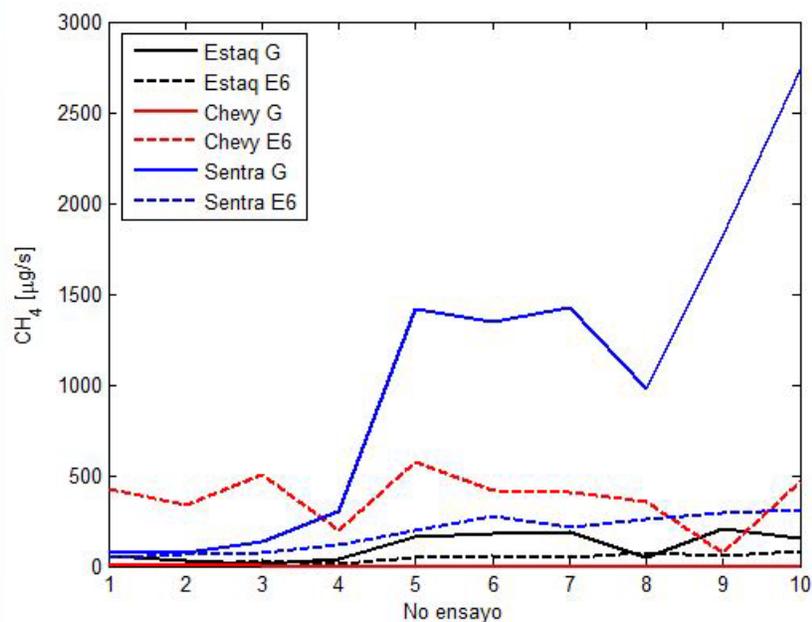


Fig. 69. Emisiones de CH₄ a diferentes condiciones de operación de un motor MECH.

Por su parte, la emisión de **formaldehído (H₂CO)** en g/s, fue mayor con la mezcla **E6** a un régimen de giro medio del motor (No ensayos 3, 4, 5, 6 y 7 de la **Fig. 70**), y mayor con gasolina a un bajo así como a un alto régimen de giro del motor. (No ensayos 1, 2, 8, 9 y 10 de la **Fig. 70**). De manera similar al acetileno, la emisión de formaldehído también disminuyó con los vehículos más recientes (**Sentra y Chevy**), en comparación con la del vehículo más viejo (**Estaquitas**).

Capítulo 5. Resultados

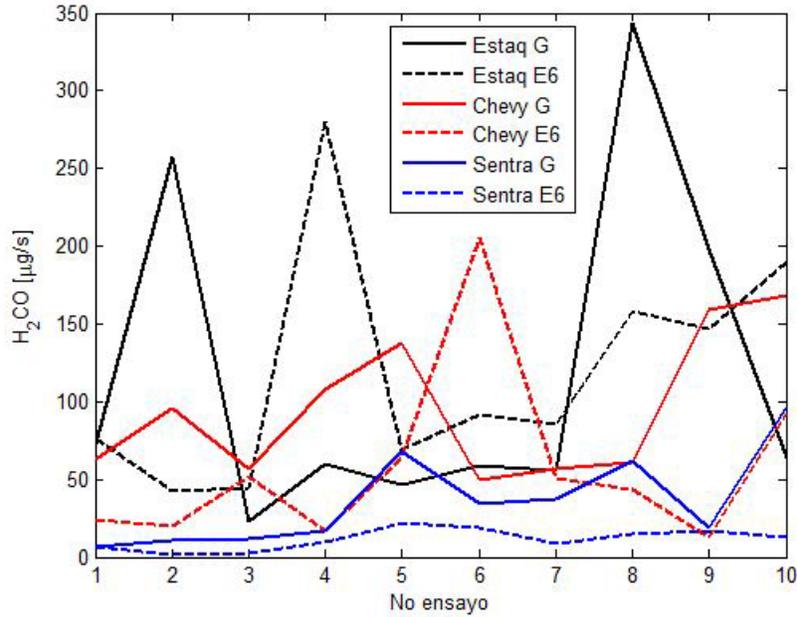


Fig. 70. Emisiones de H_2CO a diferentes condiciones de operación de un motor MECH.

La emisión de **agua (H_2O)** en g/s, fue mayor al utilizar la mezcla **E6** en lugar de gasolina únicamente con el vehículo más reciente (**Chevy**), y ocurrió lo opuesto con los demás vehículos: **Estaquitas** y **Sentra** (**Fig. 71**). La gráfica permite apreciar un incremento en dicha emisión, conforme se aumenta el régimen de giro del motor.

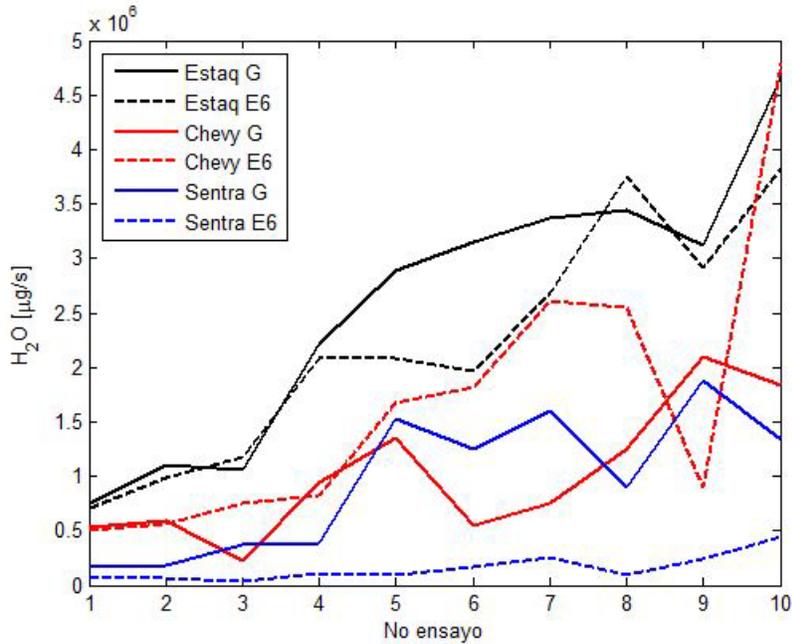


Fig. 71. Emisiones de H_2O a diferentes condiciones de operación de un motor MECH.

Capítulo 5. Resultados

En el caso de la emisión de **amoniaco (NH_3)** en g/s, esta disminuyó también con los vehículos más recientes (**Sentra y Chevy**), en comparación con la producida por el motor del automóvil más viejo (**Estaquitas**). Dicha situación se presentó a un bajo régimen de giro del motor, sin importar el par aplicado al mismo (No. ensayos: 1,2 y 4 de la **Fig. 72**); así como a un alto régimen de giro del motor con un bajo par aplicado (No. ensayo 8 de la **Fig. 72**)

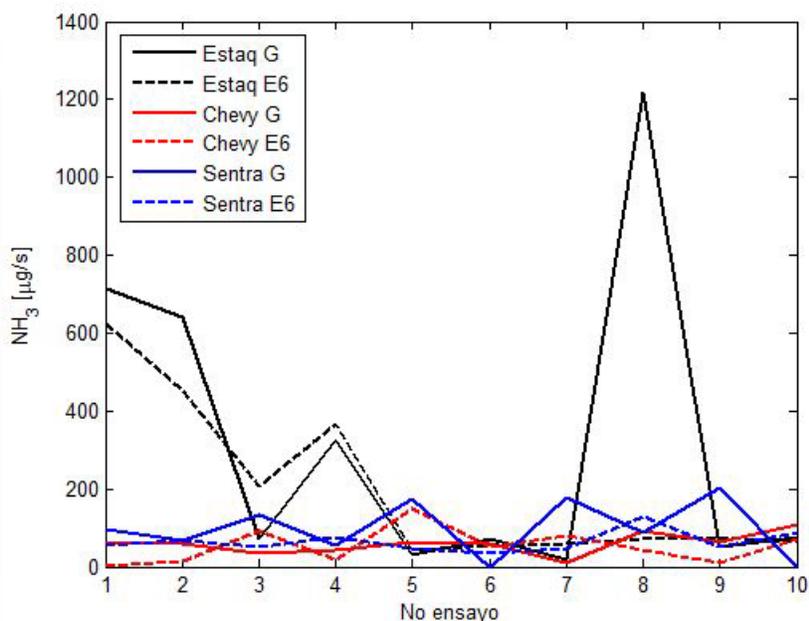


Fig. 72. Emisiones de NH_3 a diferentes condiciones de operación de un motor MECH.

De manera similar a las pruebas con bioetanol, El muestreo de partículas durante las pruebas con biodiésel permitió identificar diferentes **NHAP's**. Sin importar el tipo de combustible, se presentaron prácticamente los mismos compuestos. A continuación se realiza una comparación de los niveles de flujo de emisión [$\mu\text{g/s}$], para los siete compuestos más abundantes, durante los ensayos realizados en laboratorio. (**Fig. 73 a Fig. 79**).

Capítulo 5. Resultados

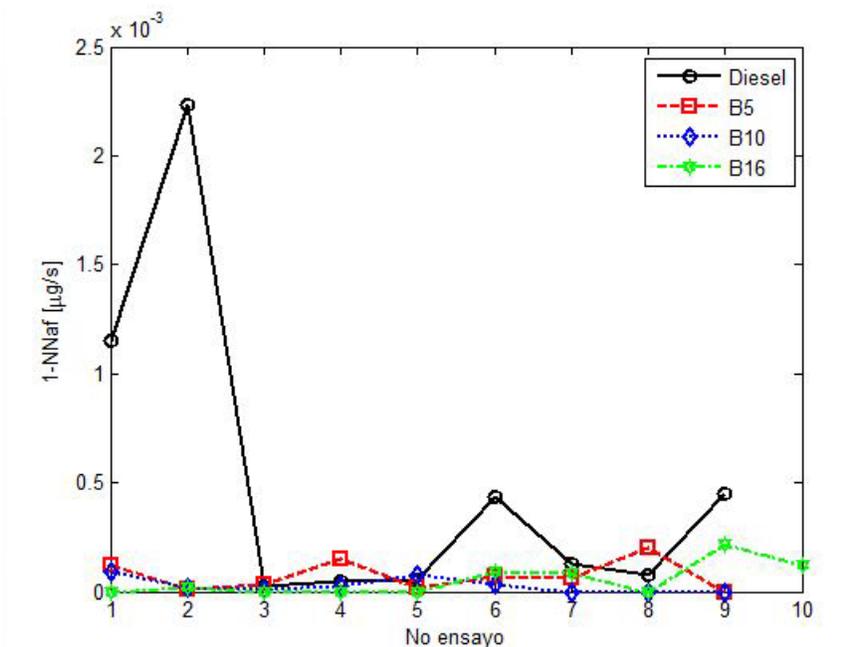


Fig. 73. Emisiones de 1-NNaf a diferentes condiciones de operación del motor diésel (MEP).

La emisión del **1-Nitronaftaleno (1-NNaf)** en $\mu\text{g/s}$, disminuyó al utilizar una mezcla de biodiésel en lugar de diésel convencional, para la mayoría de los ensayos (**Fig. 73**). En particular, a un bajo régimen de giro del motor (No ensayos - 1 y 2 de la **Fig. 73**) y un par, de aproximadamente 90 N.m en promedio (**Fig. 54**).

De manera opuesta, la mezcla **B5** produjo la mayor emisión de **1-NNaf** (No ensayos 4 y 8 de la **Fig. 73**). Dichas condiciones de operación, corresponden a diferentes regímenes de giro del motor, con un par aplicado a este último, de aproximadamente de 90 N.m en promedio (**Fig. 54**).

Capítulo 5. Resultados

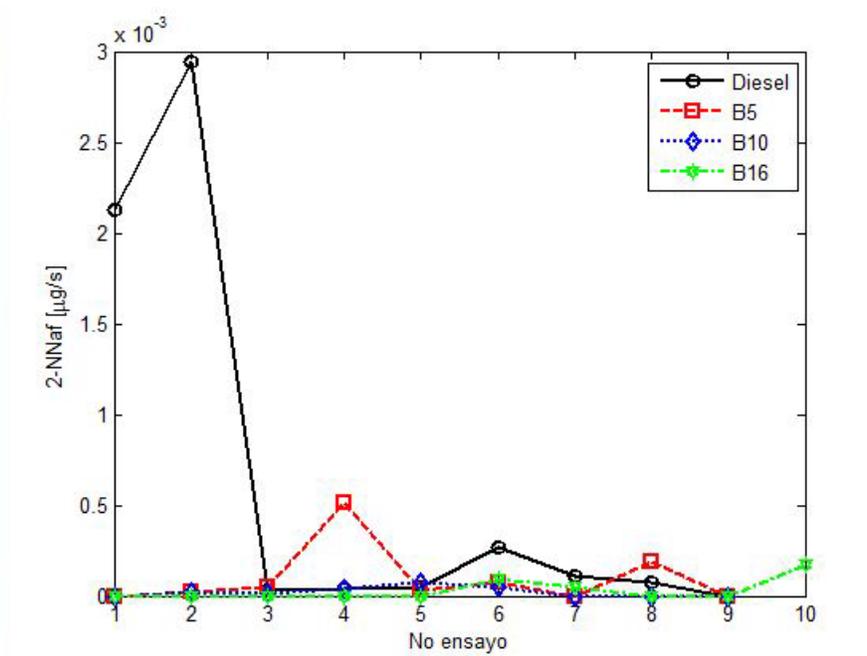


Fig. 74. Emisiones de 2-NNaf a diferentes condiciones de operación del motor diésel (MEP).

La emisión del **2-Nitronaftaleno (2-Nnaf)** en $\mu\text{g/s}$, disminuyó también al utilizar una mezcla de biodiésel en lugar de diésel convencional, para la mayoría de los ensayos (**Fig. 74**). A diferencia del compuesto anterior, la variación fue más grande a un bajo régimen de giro del motor (No ensayos - 1 y 2 de la **Fig. 74**) y un par aplicado a este último, de aproximadamente de 90 N.m en promedio (**Fig. 54**).

Asimismo, la mezcla **B5** también produjo la mayor emisión de **1-Nnaf**, bajo las mismas condiciones de operación: ensayos 4 y 8 de la **Fig. 74**, solo que aumento en comparación a la del **1-NNaf**.

Capítulo 5. Resultados

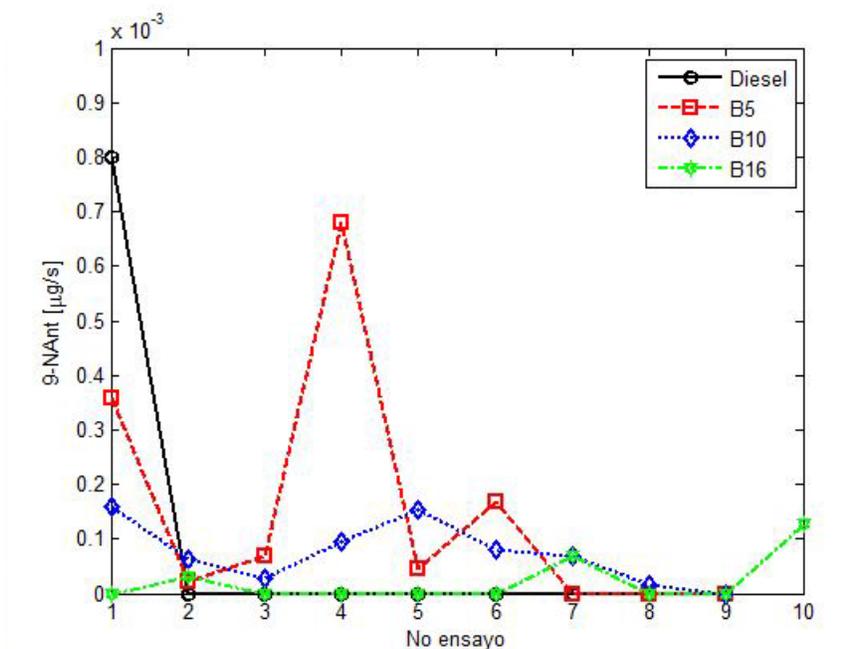


Fig. 75. Emisiones de 9-Nant a diferentes condiciones de operación del motor diésel (MEP).

Para el **9-Nitroantraceno (9-Nant)**, su emisión en $\mu\text{g/s}$ presentó un aumento en la mayoría de los ensayos, cuando se utilizó una mezcla de biodiésel en comparación con el diésel convencional (**Fig. 75**). Dicha variación se aprecia claramente a regímenes medios de giro del motor (No ensayos 4 y 6 de la **Fig. 75**), donde un menor contenido de biodiésel en la mezcla produjo una mayor emisión.

A diferencia de lo mencionado, la emisión de **9-Nant** obtenida, al menor régimen de giro del motor, fue mayor al utilizar el diésel convencional y disminuyó conforme su mezcla con biodiésel tenía más contenido de este último (No ensayo 1 de la **Fig. 75**).

Capítulo 5. Resultados

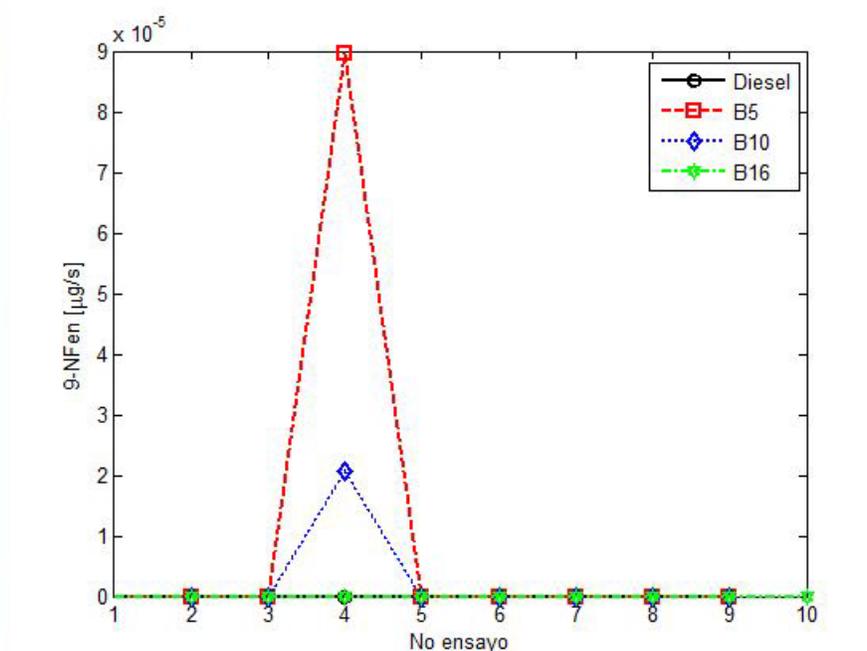


Fig. 76. Emisiones de 9-Nfen a diferentes condiciones de operación del motor diésel (MEP).

En cambio, el diésel convencional no produjo emisión de **9-Nitrofenantreno (9-Nfen)** en $\mu\text{g/s}$, bajo ninguna condición de operación (**Fig. 76**). Las mezclas de biodiésel presentaron una emisión prácticamente nula en todos los casos, con excepción del No 4 de la **Fig. 76**. Tal situación corresponde a un régimen medio de giro del motor y un par aplicado al mismo de 100 Nm (**Fig. 54**).

Capítulo 5. Resultados

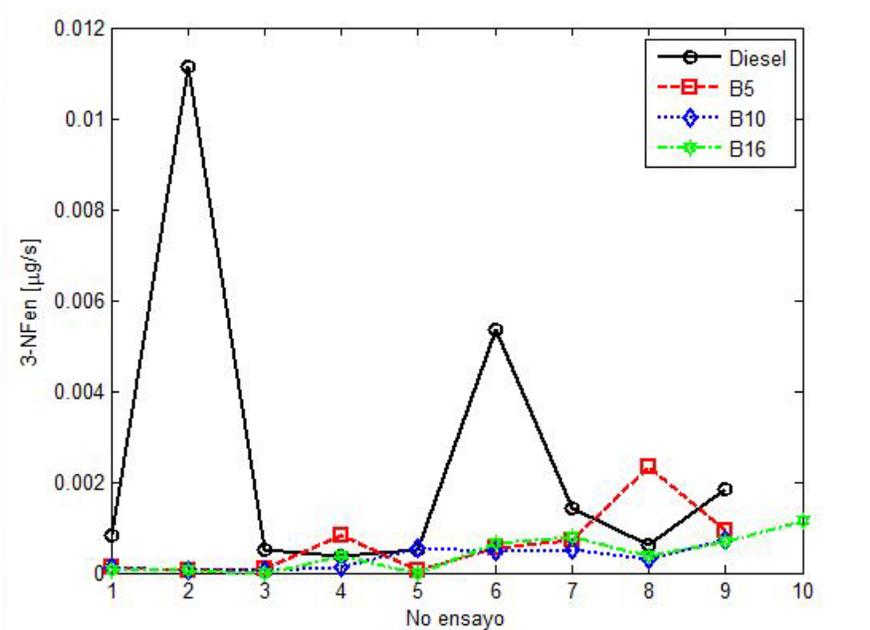


Fig. 77. Emisiones de 3-Nfen a diferentes condiciones de operación del motor diésel (MEP).

La emisión del **3-Nitrofenantreno (3-Nfen)** en $\mu\text{g/s}$, disminuyó al utilizar una mezcla de biodiésel en lugar de diésel convencional, para la mayoría de los ensayos (**Fig. 77**). La mayor diferencia se presentó a un bajo régimen de giro del motor (No ensayo - 2 de la **Fig. 77**) y un par aplicado al mismo de 80 N.m (**Fig. 54**).

En contraste a ello, la mezcla **B5** produjo la mayor emisión de **3-Nfen** (No ensayos 4 y 8 de la **Fig. 77**). Dichas condiciones de operación, corresponden a diferentes regímenes de giro del motor, con un par aplicado a este último, de aproximadamente 90 N.m en promedio (**Fig. 54**).

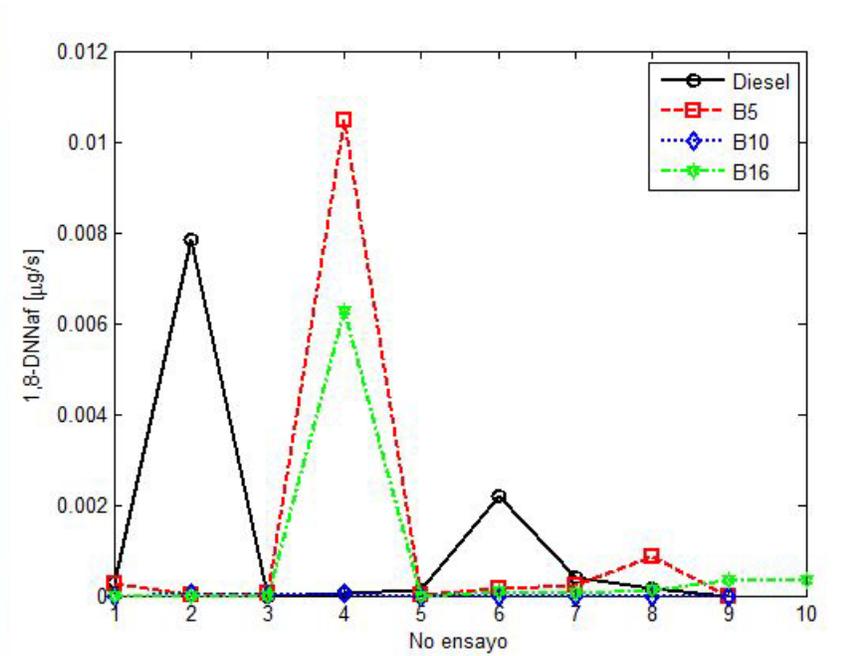


Fig. 78. Emisiones de 1,8-DNNaf a diferentes condiciones de operación del motor diésel (MEP).

En el caso de **1,8-Dinitronaftaleno (1,8-DNNaf)**, su emisión en $\mu\text{g/s}$ varió de dos maneras. La primera fue mayor con diésel convencional, a diferentes regimenes de giro del motor (No ensayos 2 y 6 de la **Fig. 78**) y un par aplicado en promedio al mismo de 90 Nm (**Fig. 54**). Mientras la segunda fue mayor con mezclas de biodiésel, a diferentes regimenes de giro del motor (No ensayos 4 y 8 de la **Fig. 78**) y un par aplicado al mismo, de 90 Nm en promedio (**Fig. 54**).

Capítulo 5. Resultados

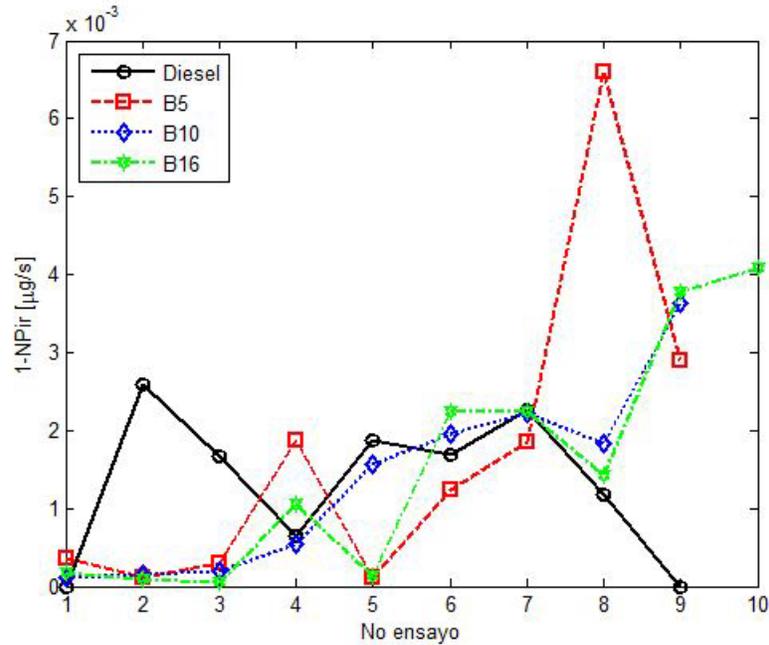


Fig. 79. Emisiones de 1-NPir a diferentes condiciones de operación del motor diésel (MEP).

La emisión del **1-Nitropireno (1-NPir)** en $\mu\text{g/s}$, fue mayor con diésel a un bajo régimen de giro del motor y mayor con las mezcla de biodiésel a un alto régimen de giro del motor (**Fig. 79**), sin importar el par aplicado a este último (**Fig. 54**). Las mayores diferencias se presentaron en los ensayos más próximos a los límites del régimen de giro del motor, es decir, No ensayos - 2 y 8 de la **Fig. 79**.

CONCLUSIONES

La metodología propuesta sirvió para estimar las emisiones no reguladas, producidas por las mezclas de biocombustible - combustible convencional, del motor de un vehículo al seguir un ciclo de manejo determinado. Gracias a los mapas 3D generados por este trabajo, un cambio del ciclo de manejo seleccionado en el simulador de vehículos **ADVISOR**, permite estimar dichas emisiones al seguir diferentes rutas, y comparar como puede afectarlas. Esto es sumamente importante, si se considera que tales resultados se lograron con la combinación de varias técnicas y equipos para solventar la imposibilidad de medir dichas emisiones en tiempo real.

Los resultados obtenidos por los equipos PEMS y FTIR para las mismas emisiones (CO₂ y CO), no fueron iguales, lo cual era de esperarse, pero si del mismo orden de magnitud. Esto demuestra la validez de combinar la información obtenida al mismo tiempo con dichos equipos, durante las pruebas realizadas en laboratorio, para estimar las emisiones no reguladas producidas por **la gasolina de convencional y la mezcla E6.**

Los resultados obtenidos por el PEMS durante las pruebas realizadas en laboratorio con biodiésel, permitieron estimar con una buena aproximación, las emisiones criterio de las mezclas de biodiésel y diésel convencional utilizados en las pruebas en campo. Esto da sustento, al uso del flujo de gases de escape calculado por dicho equipo, para estimar las emisiones no reguladas producidas por el **diésel convencional** y las **mezclas B5, B10 y B16**, durante las pruebas hechas en laboratorio.

Las emisiones no reguladas no tienen una tendencia definida por las condiciones de operación del motor, o por el combustible utilizado, ya que cada una de ellas varió de forma diferente. En algunos casos, aumentaron al utilizar una mezcla de biocombustible, pero en otros disminuyeron. Otros compuestos, produjeron menor emisión a bajos regímenes de giro del motor, y mayor emisión a regímenes altos del motor. Además, existieron niveles de emisión a diferentes regímenes de giro del motor para los compuestos restantes.

Las pruebas hechas con bioetanol mostraron una variación en el consumo de combustible principalmente, de acuerdo al año modelo del vehículo empleado: mayor mezcla E6 que gasolina convencional con el modelo más reciente, o mayor gasolina convencional que mezcla E6 con el modelo más viejo. Lo anterior advierte que es un error, considerar de antemano cualquier biocombustible como un paliativo para tener petróleo por más tiempo, antes de que se agote.

En este caso en particular, el ahorro en gasolina convencional por su remplazo parcial con bioetanol, podría ser menor al esperado en los vehículos más viejos. Debe recordarse que no se probó bioetanol puro, sino mezclado con una gasolina, que no se podría producir en la misma cantidad que la convencional, si se considera el volumen correspondiente actualmente a los aditivos.

Por su parte, **las pruebas hechas con biodiésel mostraron, un mayor consumo cuando se utilizó diésel convencional.** Tal situación debe tomarse con cierta reserva, porque no se tuvo la composición exacta del biodiésel, un factor que afecta las propiedades de tal biocombustible de manera importante. Existen estudios que brindan la variación entre biodiésel producido con diferente materia prima, e inclusive algunos cuando se trata de mezclas. Pero no existe información precisa acerca de biodiésel producido por un porcentaje de diferentes materia primas, como el utilizado para los ensayos efectuados en las pruebas en laboratorio.

REFERENCIAS

Capítulo 1.

- [1] Renewable Fuels Association, 2008
<http://www.ethanolrfa.org/>
- [2] PIMENTEL, David. et. al. *Food Versus Biofuels: Enviromental and Economic Costs*. Springer Science. January 2009
- [3] SANZ, David. *Etanol de segunda generación a partir de residuos de madera*.
<http://energiasrenovadas.com/etanol-de-segunda-generacion-a-partir-de-residuos-de-madera/>
- [4] *A Review of the Potential of Marine Algae as a Source of Biofuel in Ireland*. Sustainable Energy Ireland SEI. February 2009
- [5] ROHAN, John. et. al. *Micro and macroalgal biomass: A renewable source for bioethanol*. Bioresource Technology. Elsevier 2010
- [6] KREUTZ, Tomas. et. al. *Fischer-Tropsch Fuels from Coal and Biomass*. Princetown Enviroment Institute. USA 2008
- [7] *Shell and HR Biopetroleum build facility to grow algae for biofuel*.
<http://www.shell.com/global/aboutshell/media/news-and-media-releases/2007/biofuels-cellana-11122007.html>
- [8] SUMPSI, José M. *La Crisis Alimentaria Mundial*. Mediterráneo Económico. Num. 15
- [9] *The Volumetric Ethanol Excise Tax Credit: History and Current Policy*.
<http://www.taxpayer.net/library/article/the-volumetric-ethanol-excise-tax-credit-history-and-current-policy> April 2011
- [10] *Biofuels Platform - European Directive 2003/30/EC*
<http://www.biofuels-platform.ch/en/infos/eu-directive200330.php>

REFERENCIAS

Capítulo 2.

- [11] *Química Orgánica - Alcoholes*
<http://www.sinorg.uji.es>

- [12] *What's So Different about Biodiesel Fuel?* College of Agricultural Sciences.
Penn State University

- [13] *INTERNATIONALLY COMPATIBLE BIOFUEL STANDARDS.* DECEMBER 31
2007

- [14] *Automotive fuels - Fatty acid methyl esters (FAME) for diesel engines -
Requirements and test methods.* EUROPEAN STANDARD EN 14214
November 2008

- [15] *Código Federal de regulaciones - CFR.* Capítulo 40. Apartado 86.
Subapartados A, B y H. E.U.

- [16] *Directiva 98/69/CE & 2002/80/CE.* Comunidad Europea. 1998

- [17] *Norma Oficial Mexicana. NOM-050-SEMARNAT-1993*

- [18] *International Union of Pure and Applied Chemistry*
<http://www.iupac.org/>

- [19] *Propiedades físicoquímicas de HAPs*
<http://www.miliarium.com/prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesHAP.htm>

- [20] *DIRECTIVA 204/107/CE, relativa al arsénico, el mercurio, el níquel y los
hidrocarburos aromáticos policíclicos en el aire ambiente.*

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **WALKER**, Graeme. *Bioethanol: Science and Technology of Fuel Alcohol*. Walker & Ventus Publishing ApS. 2010
- [2] **KNOTHE**, Gerhard. *The Biodiesel Handbook*. AOCS Press USA 2005
- [3] **DEMIRBAS**, Ayhan. *Biodiesel. A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines*. Springer 2010
- [4] *FROM 1st TO 2nd GENERATION BIOFUEL TECHNOLOGIES*. International Energy Agency **IEA**. NOVEMBER 2008
- [5] *Gaps in the Research of 2nd Generation Transportation Biofuels*. International Energy Agency **IEA**. 2008
- [6] *Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México*. Secretaría de Energía **SENER**. México. Noviembre 2006
- [7] **PAYRI**, F. **DESANTES**, J. M. *Motores de Combustión Interna Alternativos*. Ed. Reverté. Barcelona, España. 2012
- [8] **RUTZ**, Dominik. **JANSSEN**, Rainer. *BIOFUEL TECHNOLOGY HANDBOOK*. WIP Renewable Energies. Germany 2007
- [9] *Biodiesel Handling and Use Guide*. Fourth Edition. National Renewable Energy Laboratory **NREL**. January 2009
- [10] *AUTOMOTIVE FUELS FOR THE FUTURE*. International Energy Agency - **IEA**. 2000
- [11] *MATLAB Graphics*. Fourth Printing. The MathWorks Inc. September 2000
- [12] *Improvement needed for the biodiesel standard EN 14214*. BIOScopes Project. European Commission's Directorate-General Energy and Transport. April 2008
- [13] *Internationally Compatible Biofuel Standards*. Tripartite Task Force: Brazil, European Union & United States of America. December 31, 2007

BIBLIOGRAFÍA

- [14] **International Biofuels Strategy Project.** Liquid Transport Biofuels - Technology Stats Report. The National Non-Food Crops Centre. UK. November 2007
- [15] **Biodiesel in Germany 2006: Market Trends and Competition.** UNION ZUR FÖRDERUNG VON OEL- UND PROTEINPFLANZEN - **UFOP**. Berlin 2007
- [16] **Building the European Knowledge based Bio-economy.** EPOBIO Project. Chris Fowler International Ltd. London UK 2009
- [17] **Biomass Resources Potential and Related Costs.** Refuel Final Report. Netherlands January 2008
- [18] **Status and outlook for biofuels, other alternative fuels and new vehicles.** Technical Research Centre of Finland **VVT**. Finland 2008
- [19] **Recomendaciones de especificaciones técnicas para el etanol y sus mezclas (E6), y la infraestructura para su manejo en México.** Secretaría de Energía **SENER**. México. Marzo 2010
- [20] **Emission Evaluation Test Report (Diesel and Biodiesel Blends in a Large Diesel Engine).** CONEG Policy Research Center Inc. Washington, D.C. January 1998
- [21] **GARCIA CAMUS, Juan M. GARCÍA LABORDA, José A. Biocarburantes líquidos: Biodiesel y Bioetanol.** Dirección General de Universidades e Investigación. España 2006
- [22] **LUJAJI, F. BEREZKY, A. Cetane Number and Thermal Properties of Croton Oil, Biodiesel, 1-Butanol, and Diesel Blends.** World Congress on Engineering 2010. Vol. III, London, UK
- [23] **YANG, Bin. WYMAN, Charles. Pretreatment: the key to unlocking low-cost cellulosic ethanol.** Biofuels, Bioprod. Bioref. 2:26-40 2008

BIBLIOGRAFÍA

- [24] **DERNOTTE, J. MOUNAIM_ROUSELLE, C. *Evaluation of Butanol-Gasoline Blends in a Port Fuel-Injection, Spark Ignition Engine.*** Oil & Gas Science and Technology Vol. 65. No.2, pp. 345-351 2009
- [25] ***California Biobutanol Multimedia Evaluation. Tier I. Report.*** Butamax™ Advanced Biofuels, LLC. January 2010
- [26] **RAMEY, David. *Butanol: The Other Alternative Fuel.*** ButylFuel, LLC
- [27] **McCORMICK, R.L. WILLIAMS, A. *Effects of Biodiesel Blends on Vehicle Emissions.*** National Renewable Energy Laboratory **NREL.** October 2006
- [28] **TING_HUAN, CHANG. HSIN-MEI, Su. *The substitutive effect of biofuels on fossil fuels in the lower and higher crude oil price periods.*** Energy 35. ELSEVIER. 2010
- [29] ***ADVISOR Documentation.*** National Renewable Energy Laboratory **NREL.** April 30, 2002
- [30] **JAZCILEVICH, Aron. et. al. *Vehicle Emissions System Using a Car Simulator.*** Air and Waste Management Association 57. p. 1234-1240. 2007
- [31] **MEDINA C., Josué. *Simulación de Emisiones Criterio de un Vehículo propulsado por Diesel 500, Biodiesel y Diesel UBA. Tesis de Licenciatura.*** Facultad de Química. **UNAM.** México D.F. 2011

ANEXO A.

MAPAS 3D

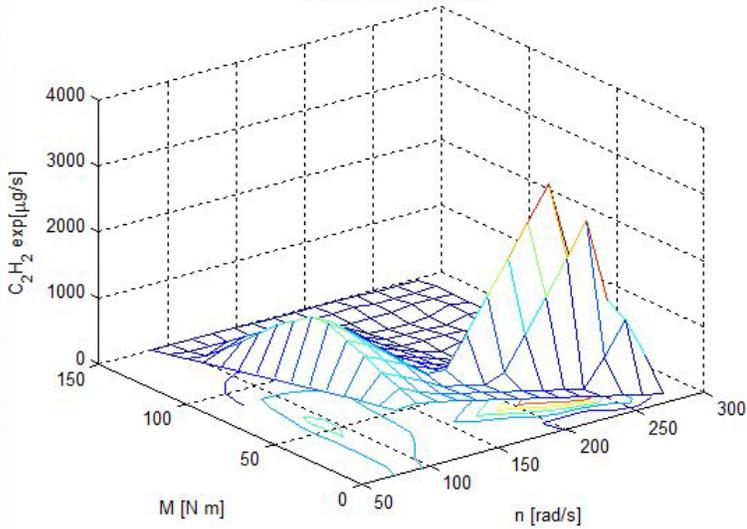
EMISIONES NO REGULADAS

BIOETANOL

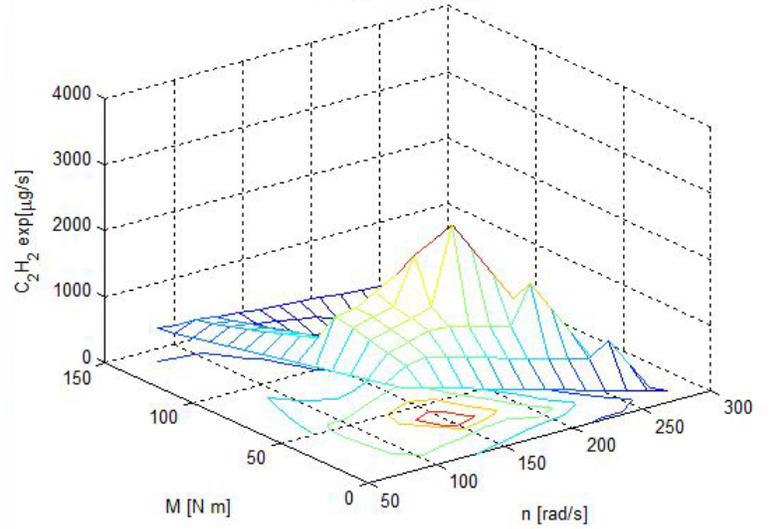
ANEXO A. Mapas 3D - EMISIONES NO REGULADAS - BIOETANOL

Acetileno

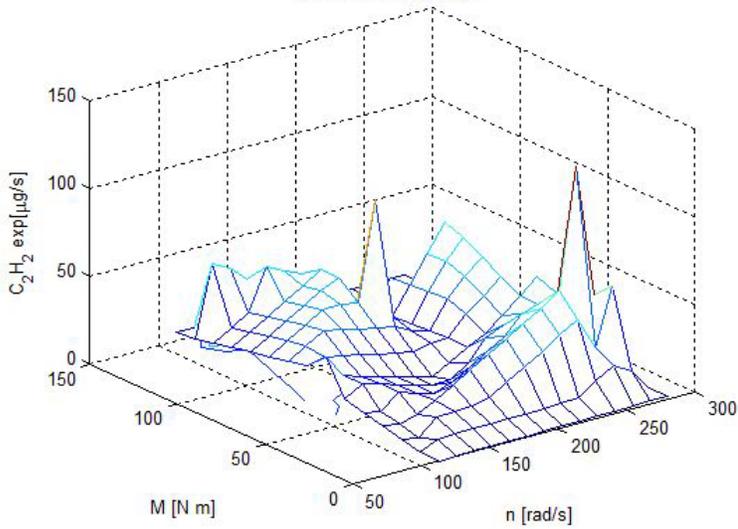
Estaq G's Emissions



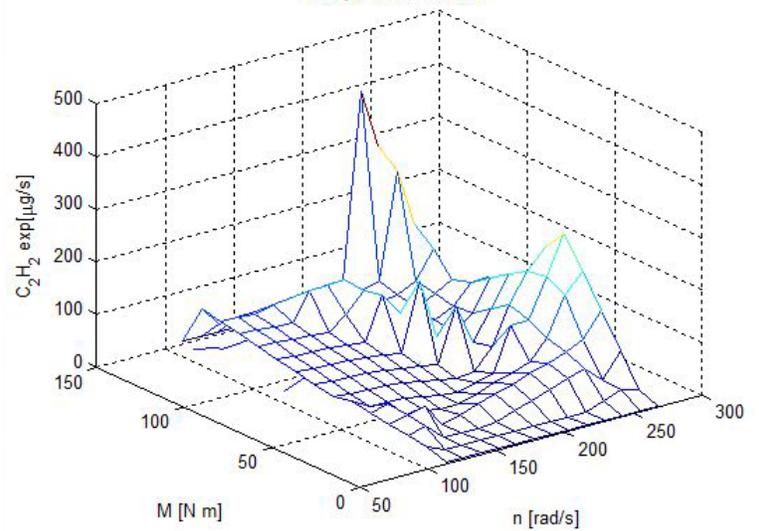
Estaq E6's Emissions



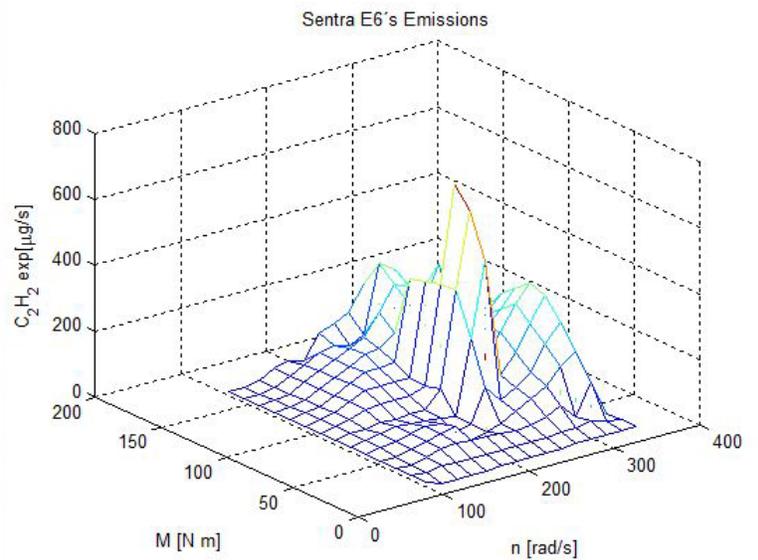
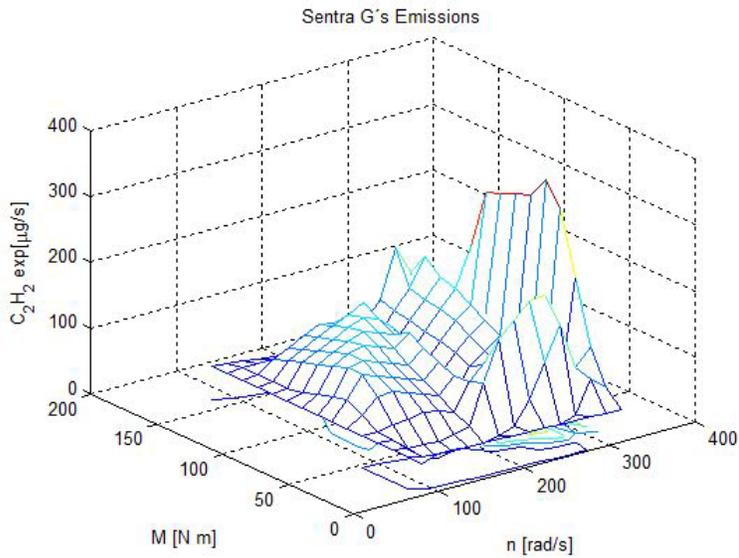
Chevy G's Emissions



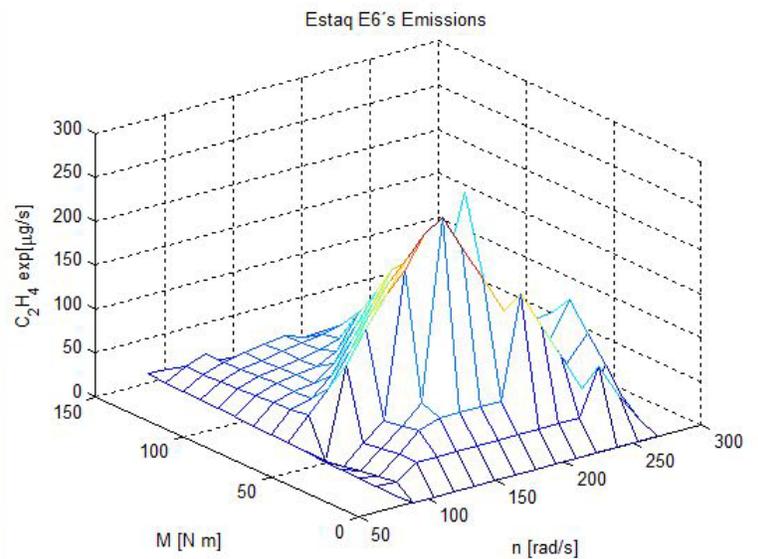
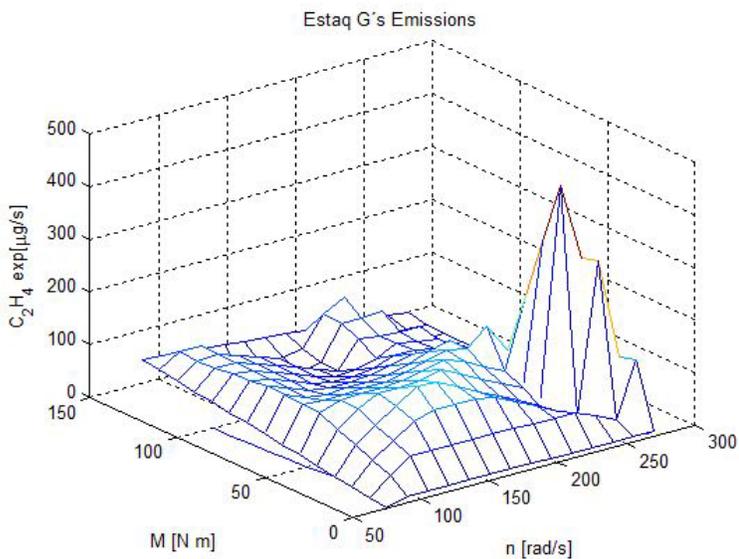
Chevy E6's Emissions



ANEXO A. Mapas 3D - EMISIONES NO REGULADAS - BIOETANOL

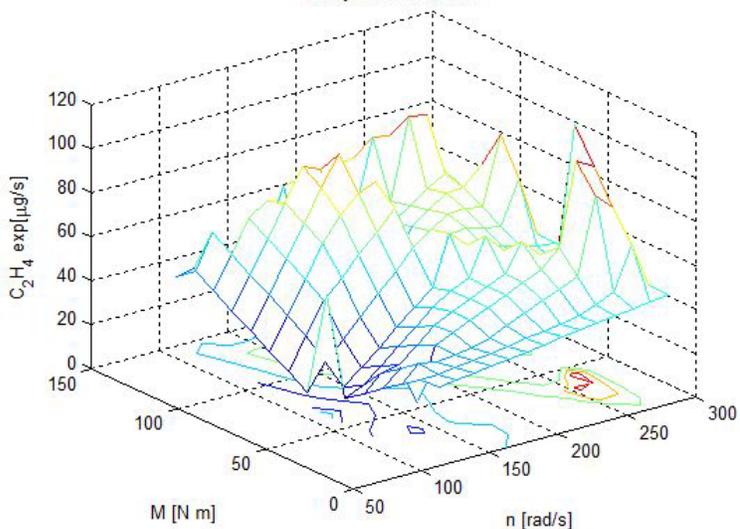


Etileno

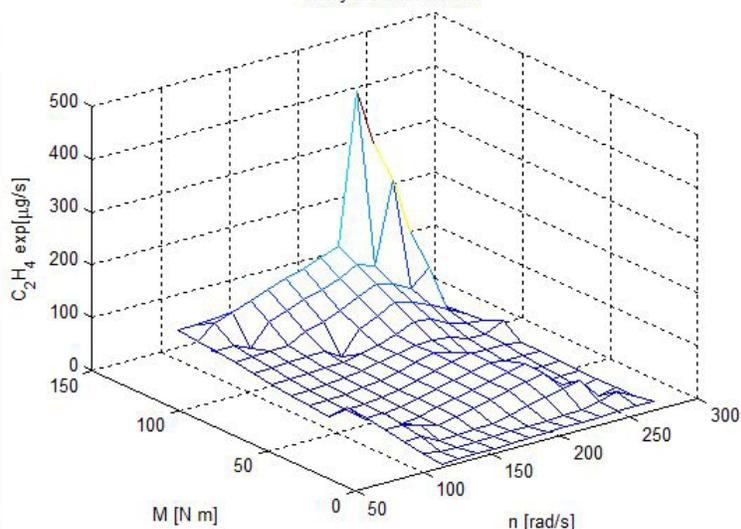


ANEXO A. Mapas 3D - EMISIONES NO REGULADAS - BIOETANOL

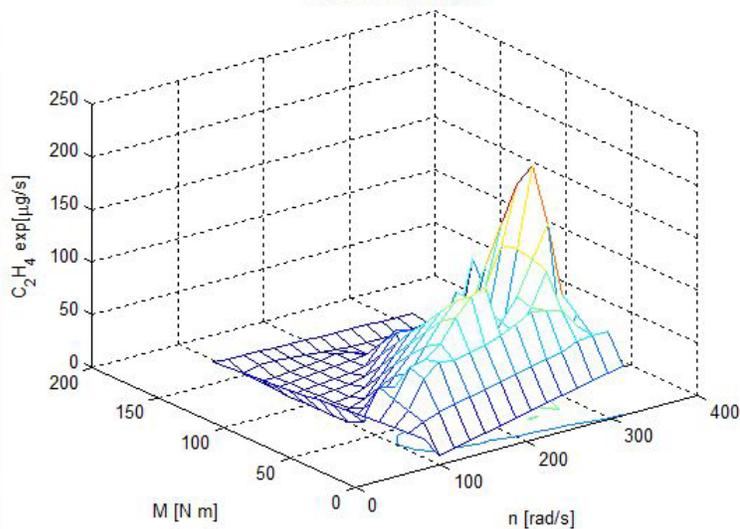
Chevy G's Emissions



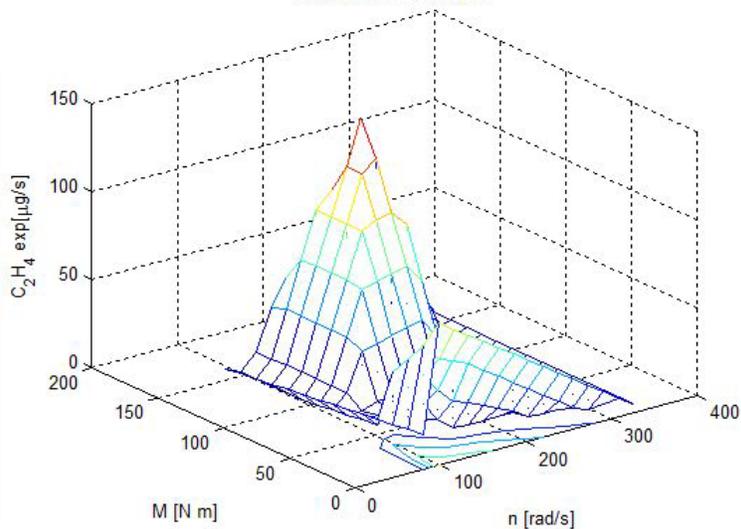
Chevy E6's Emissions



Sentra G's Emissions



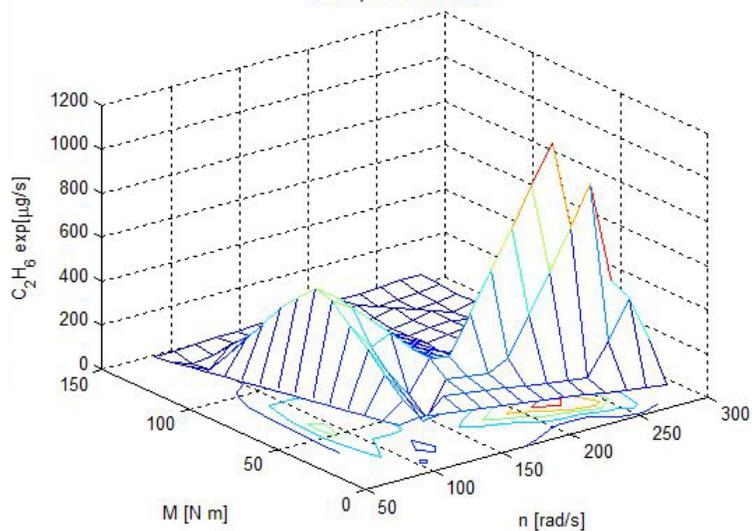
Sentra E6's Emissions



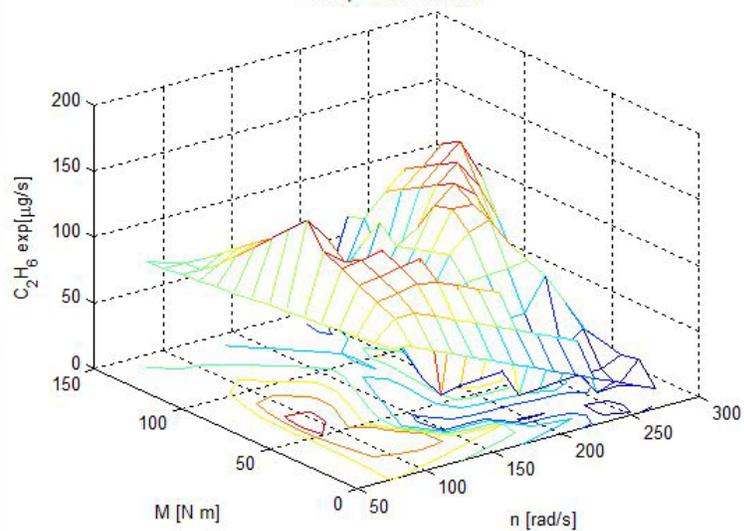
ANEXO A. Mapas 3D - EMISIONES NO REGULADAS - BIOETANOL

Etano

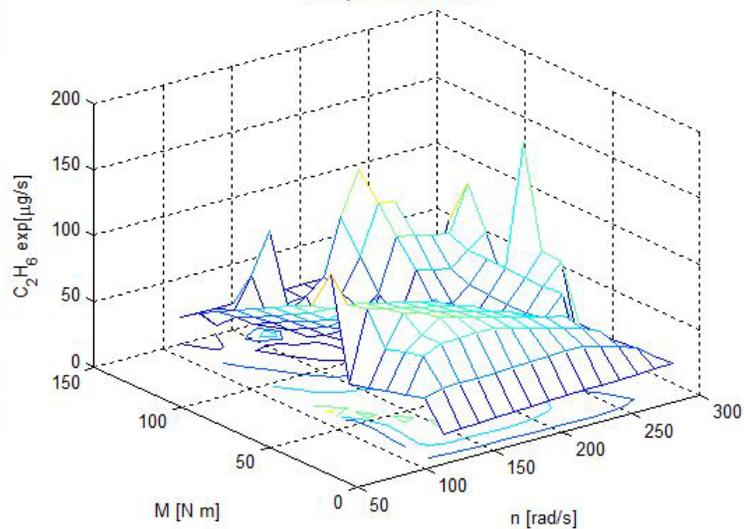
Estaq G's Emissions



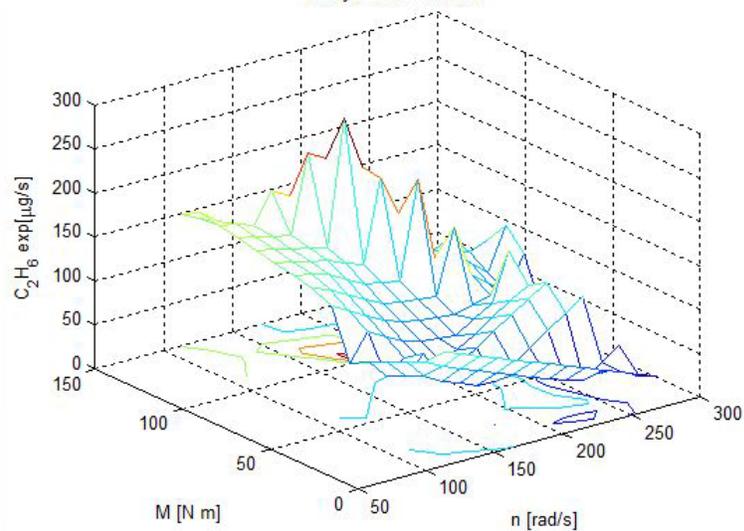
Estaq E6's Emissions



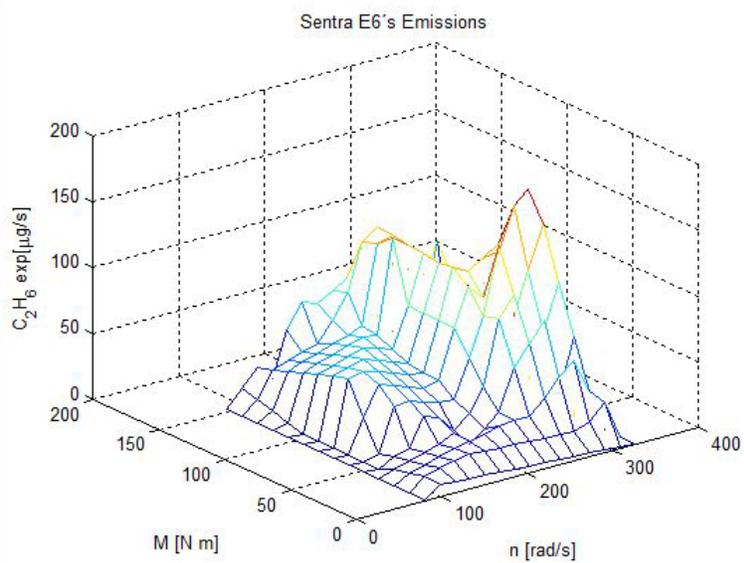
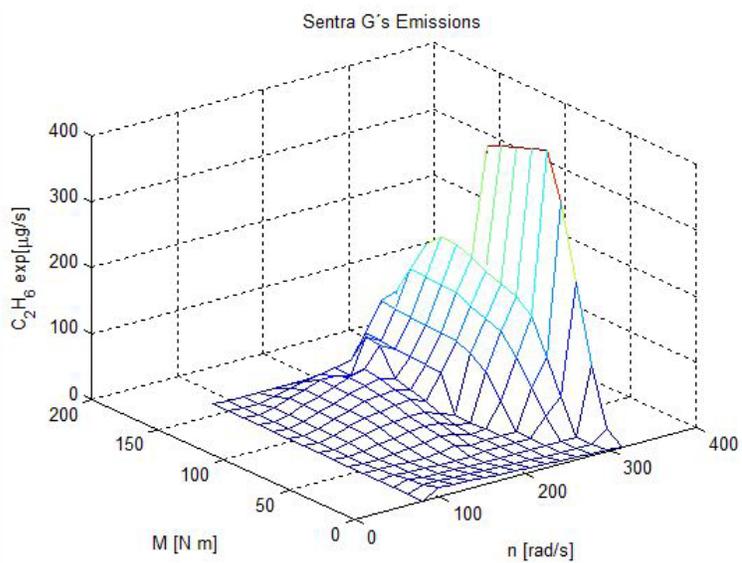
Chevy G's Emissions



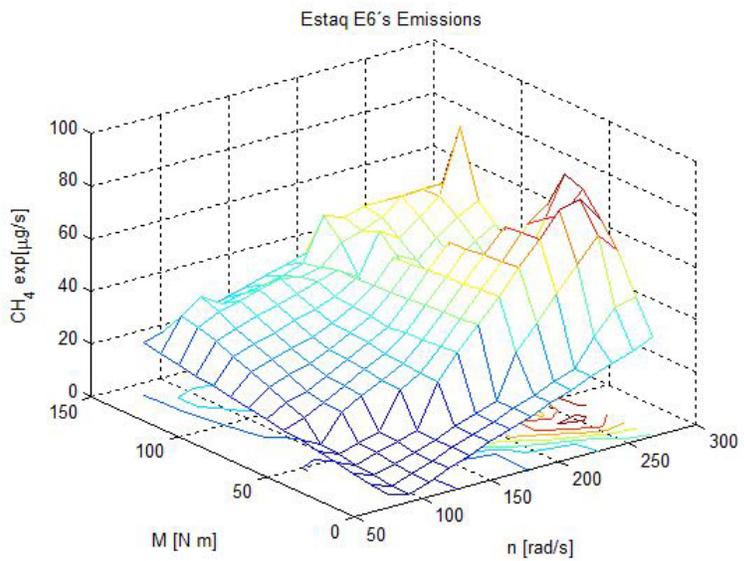
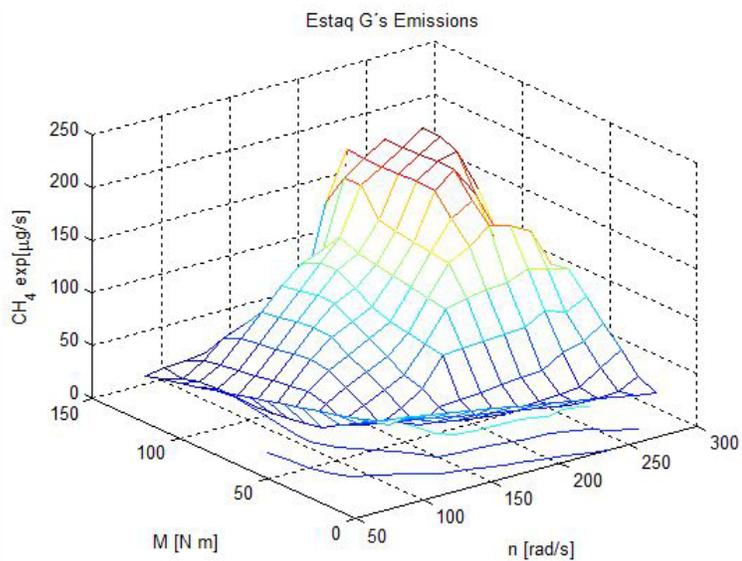
Chevy E6's Emissions



ANEXO A. Mapas 3D - EMISIONES NO REGULADAS - BIOETANOL

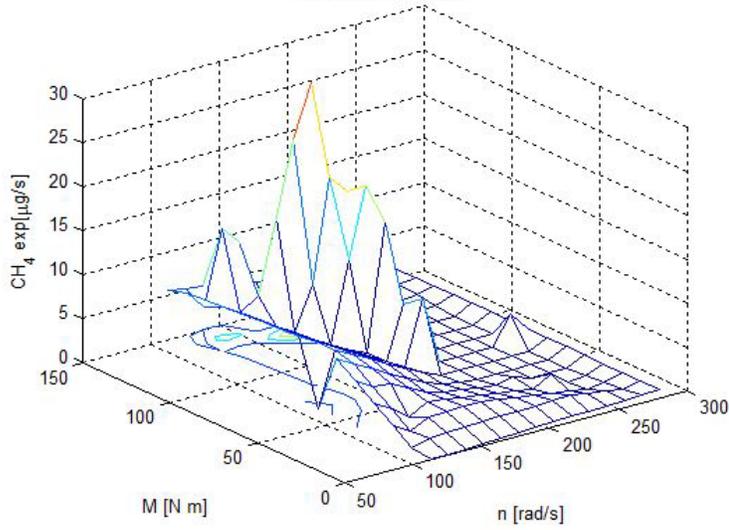


Metano

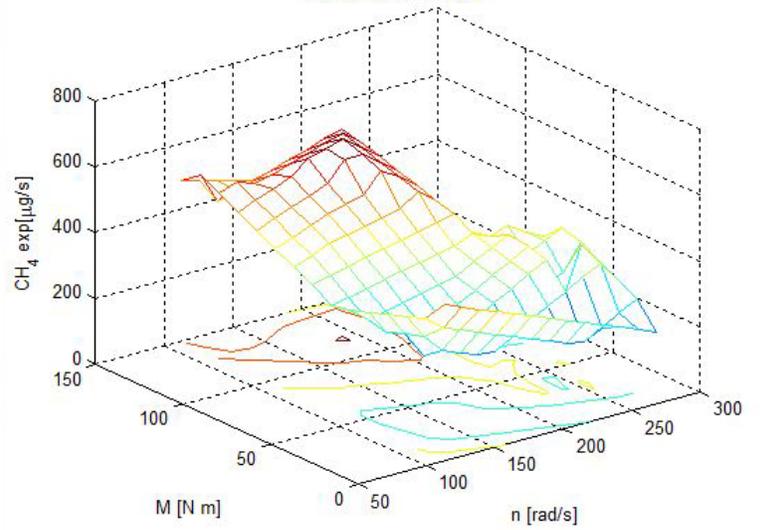


ANEXO A. Mapas 3D - EMISIONES NO REGULADAS - BIOETANOL

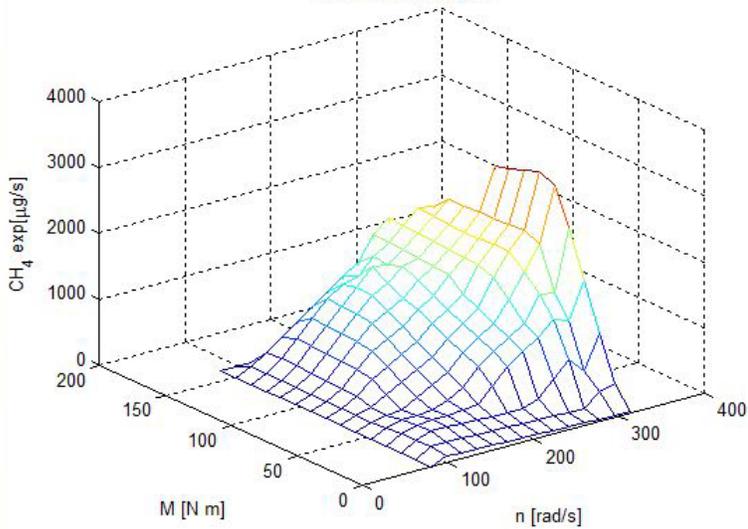
Chevy G's Emissions



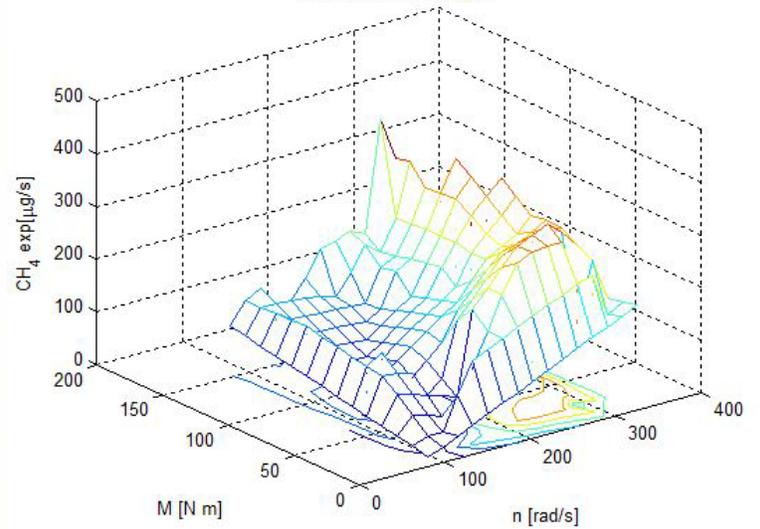
Chevy E6's Emissions



Sentra G's Emissions



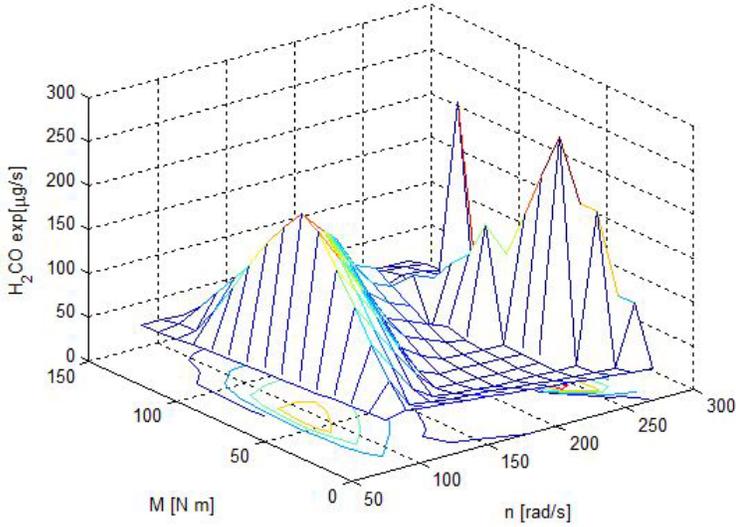
Sentra E6's Emissions



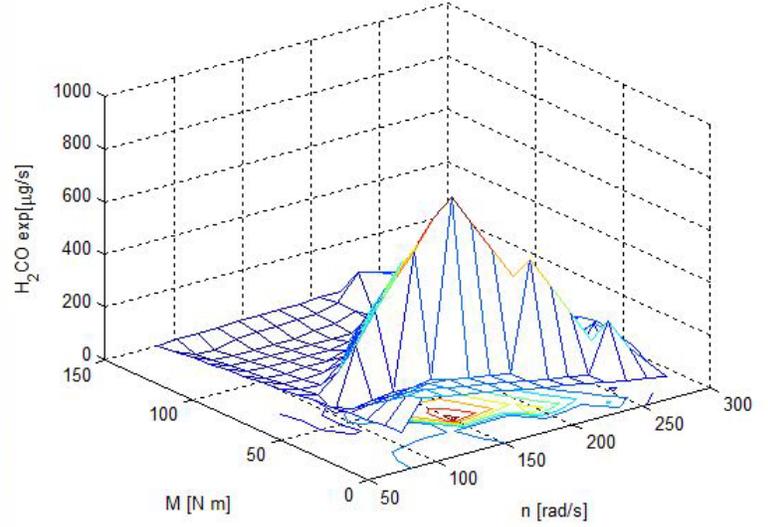
ANEXO A. Mapas 3D - EMISIONES NO REGULADAS - BIOETANOL

Formaldehido

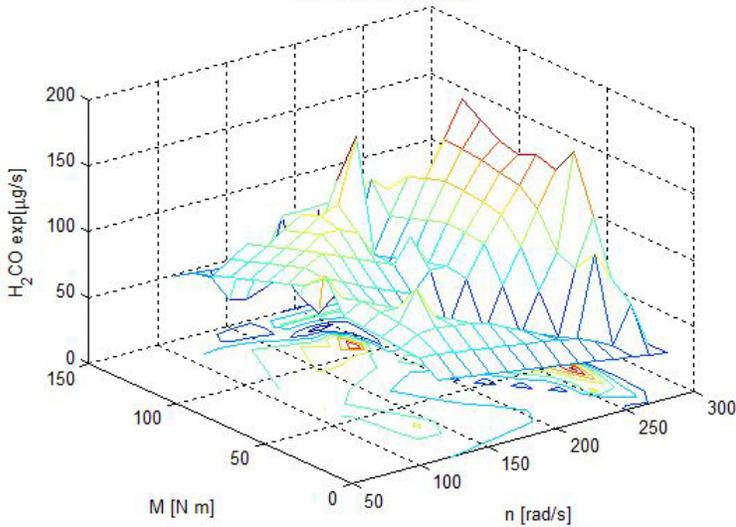
Estaq G's Emissions



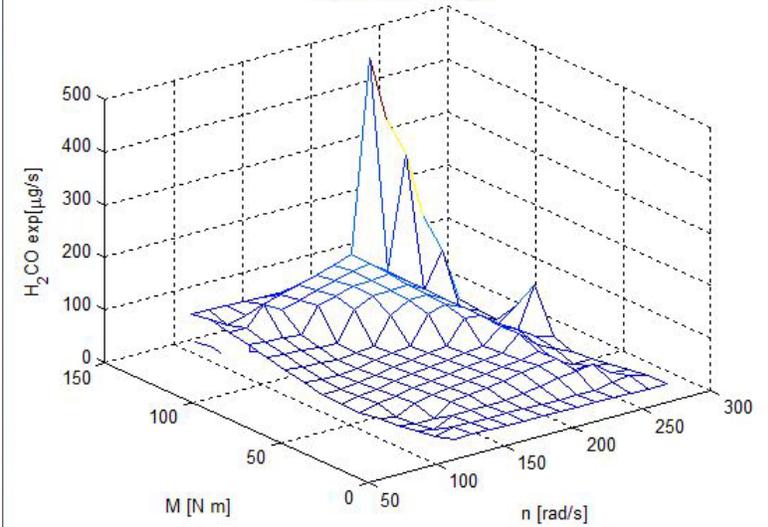
Estaq E6's Emissions



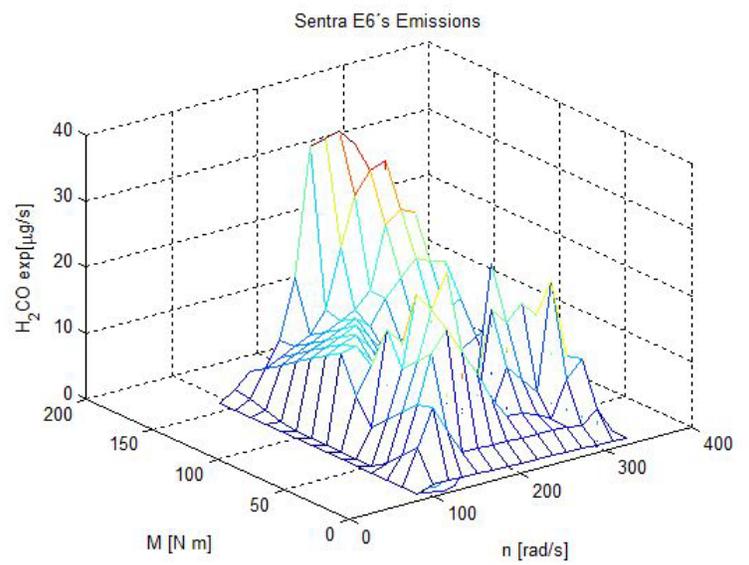
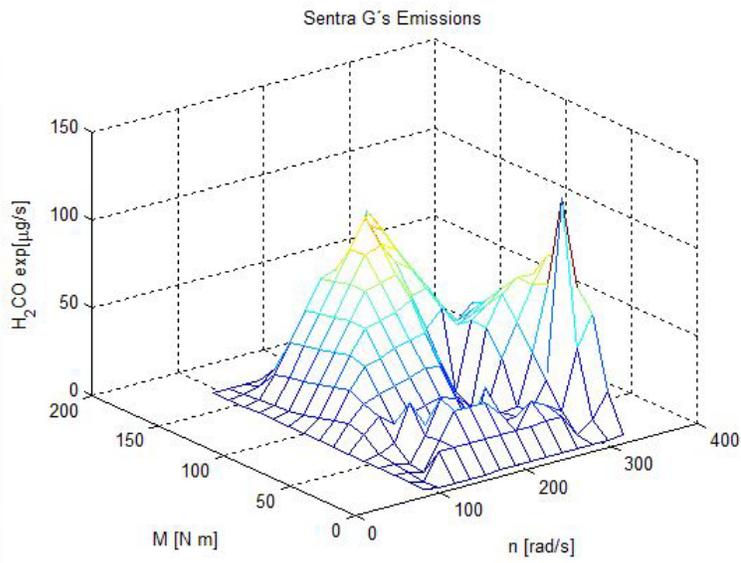
Chevy G's Emissions



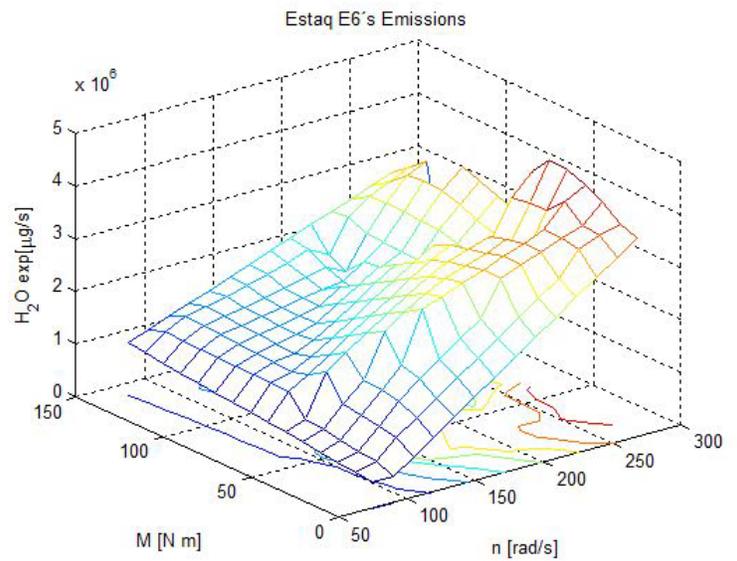
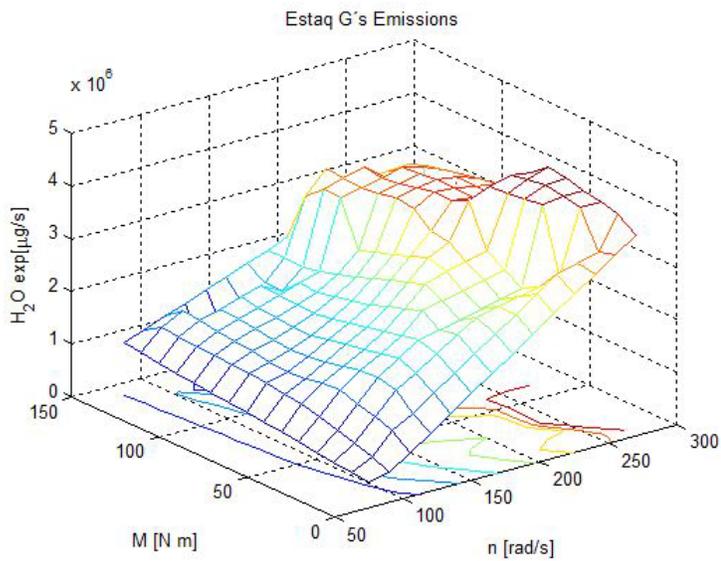
Chevy E6's Emissions



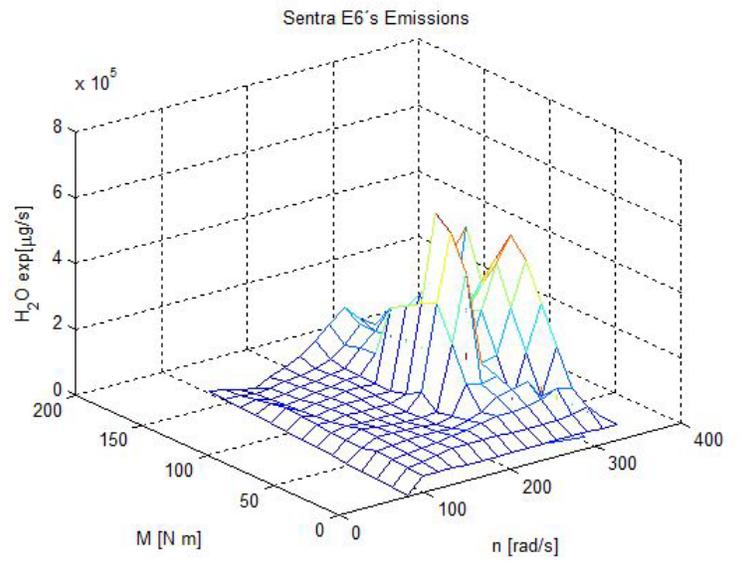
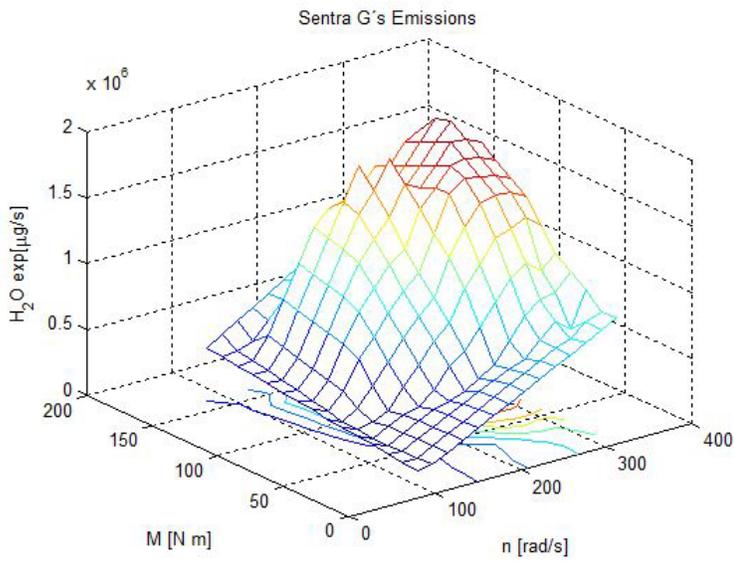
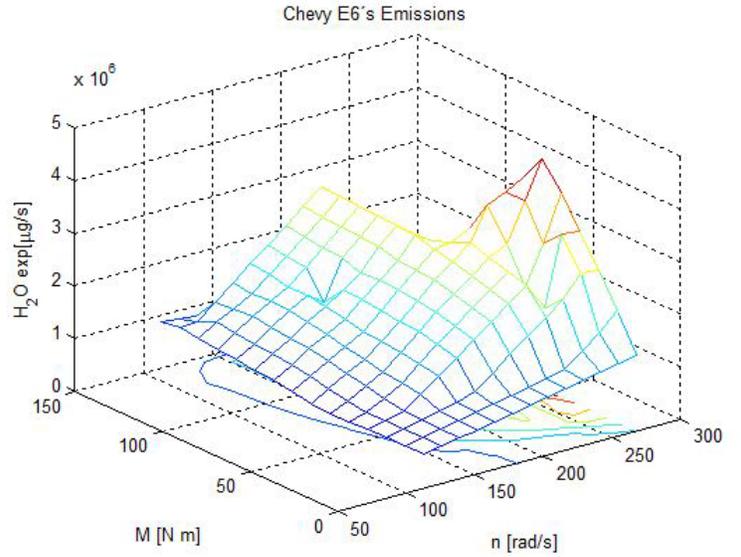
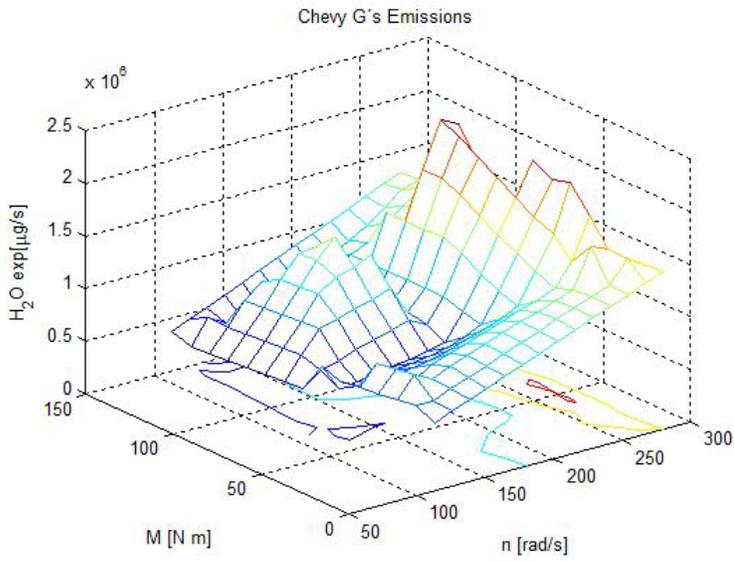
ANEXO A. Mapas 3D - EMISIONES NO REGULADAS - BIOETANOL



Agua



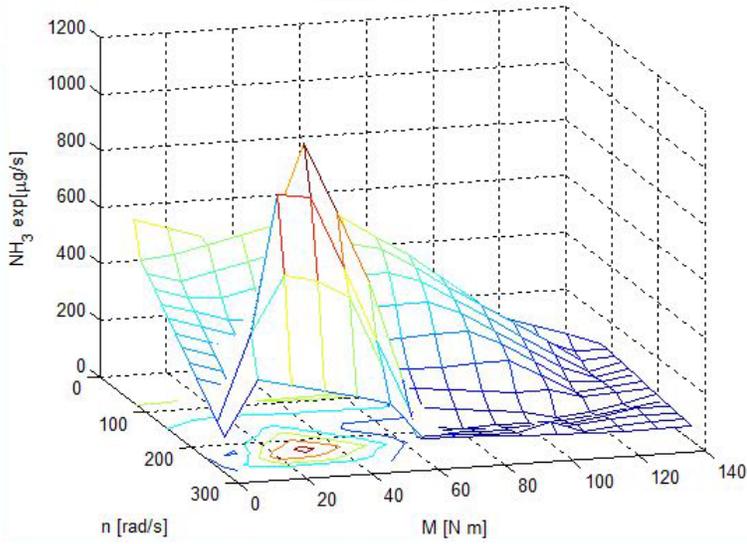
ANEXO A. Mapas 3D - EMISIONES NO REGULADAS - BIOETANOL



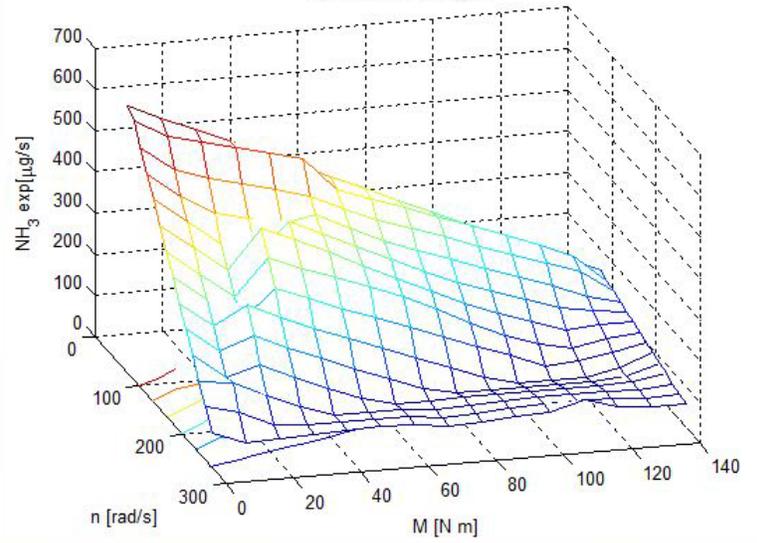
ANEXO A. Mapas 3D - EMISIONES NO REGULADAS - BIOETANOL

Amoniaco

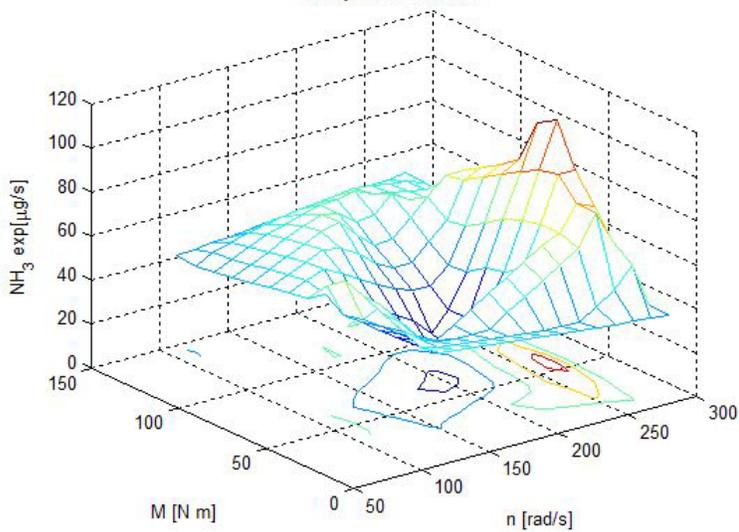
Estaq G's Emissions



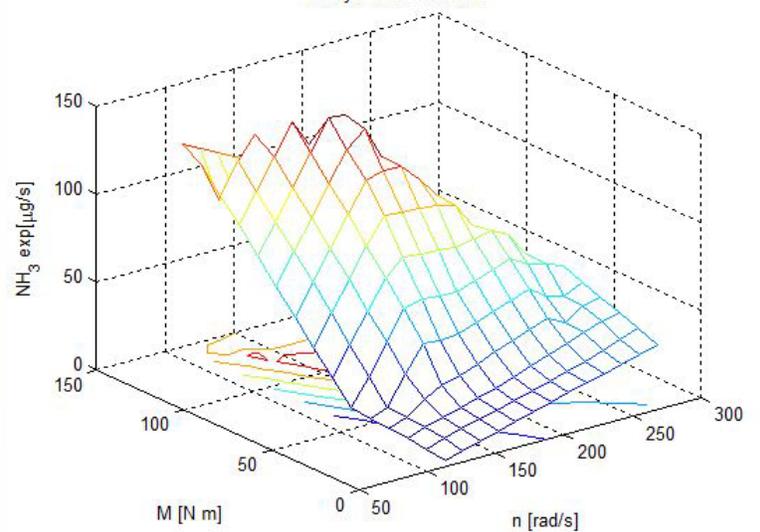
Estaq E6's Emissions



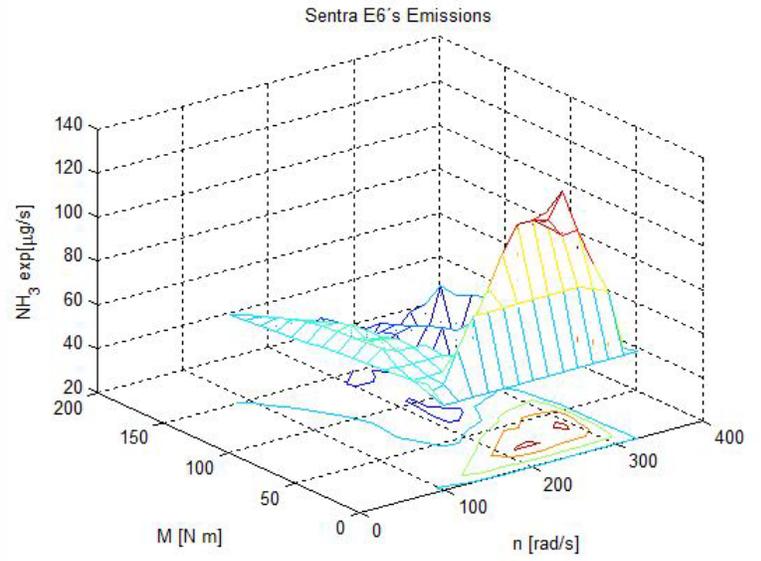
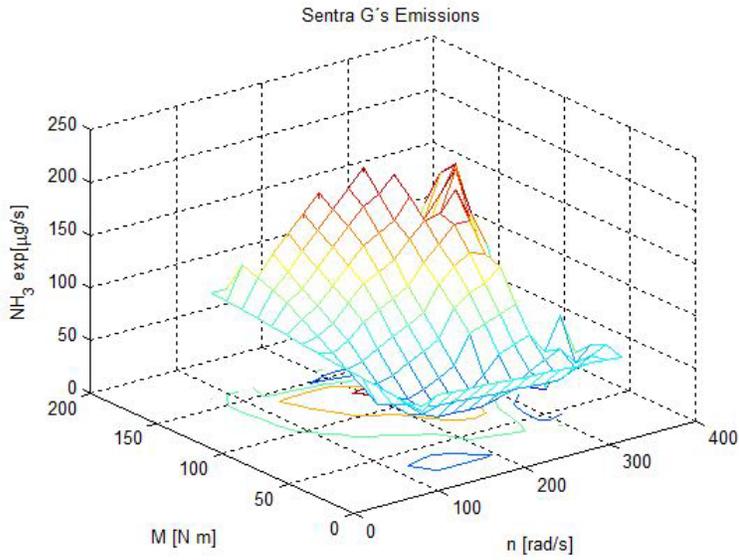
Chevy G's Emissions



Chevy E6's Emissions



ANEXO A. Mapas 3D - EMISIONES NO REGULADAS - BIOETANOL



ANEXO B.

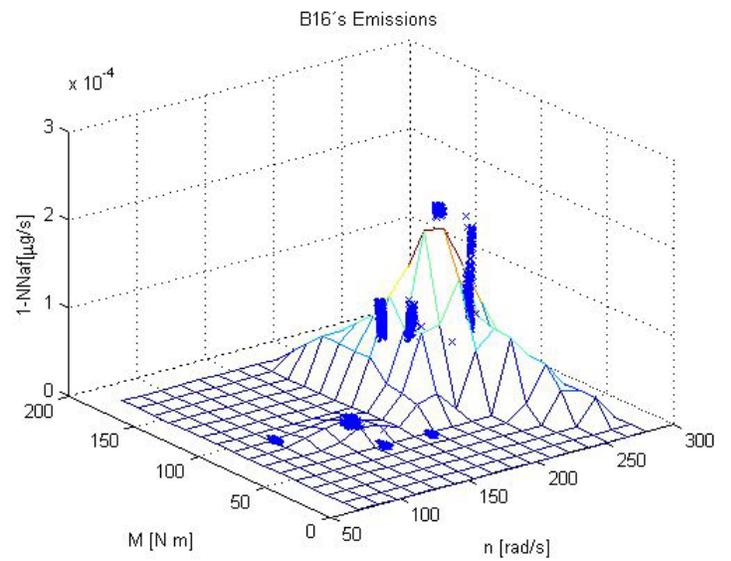
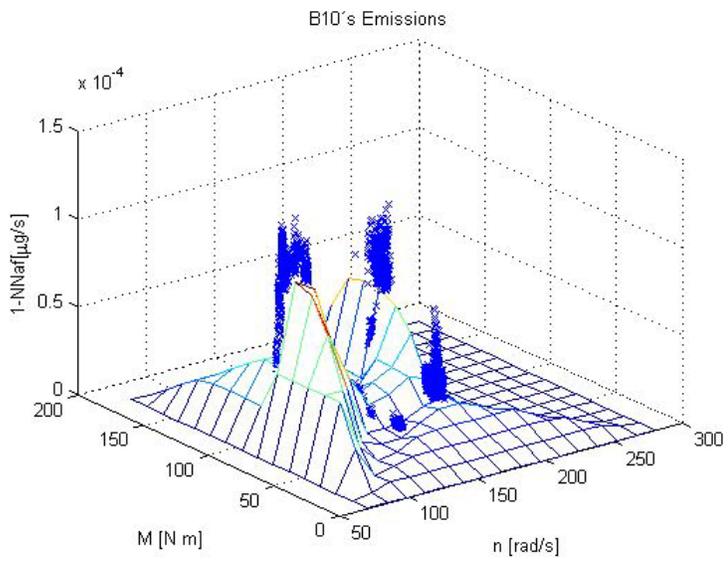
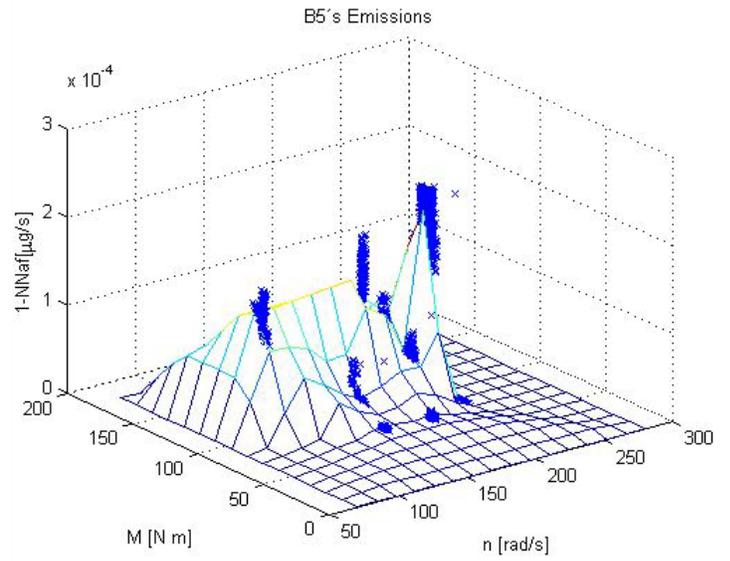
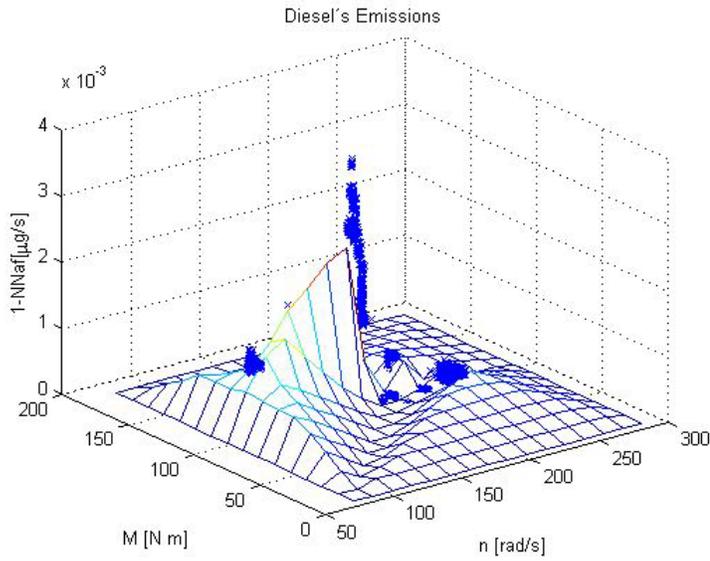
MAPAS 3D

EMISIONES NO REGULADAS

BIODIÉSEL

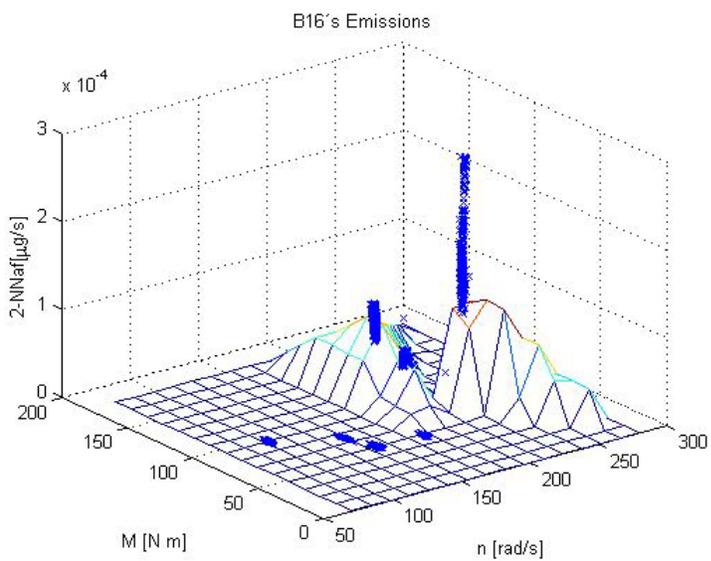
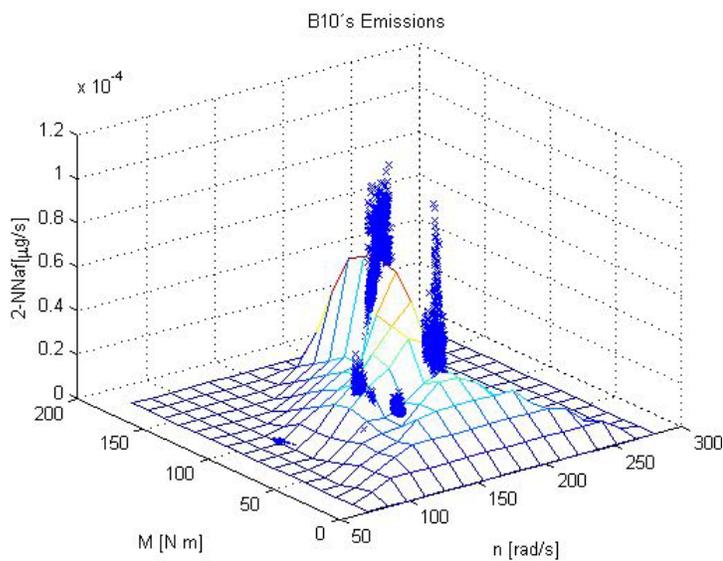
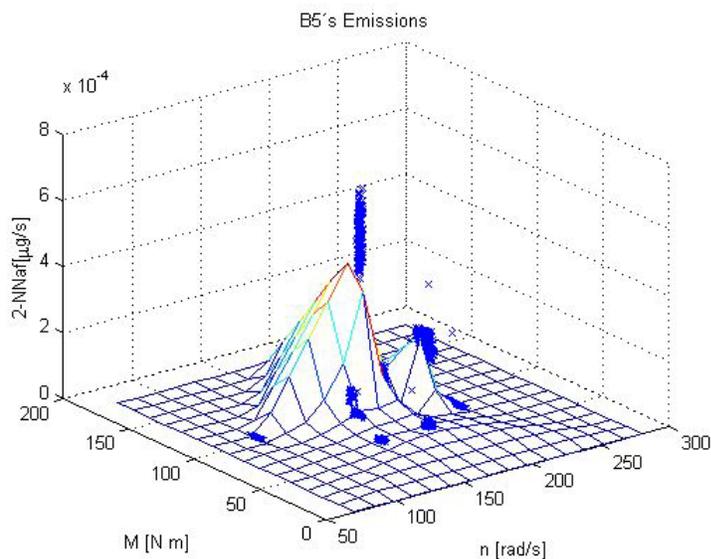
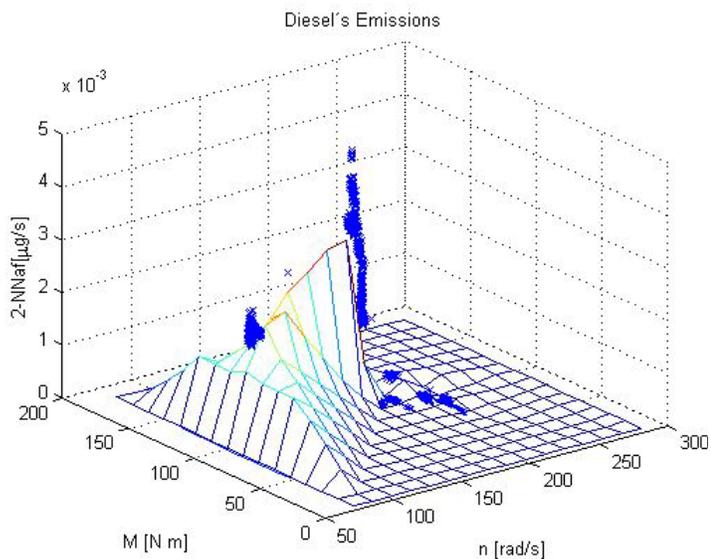
ANEXO B. Mapas 3D - EMISIONES NO REGULADAS - BIODIÉSEL

1-Nitronaftaleno



ANEXO B. Mapas 3D - EMISIONES NO REGULADAS - BIODIÉSEL

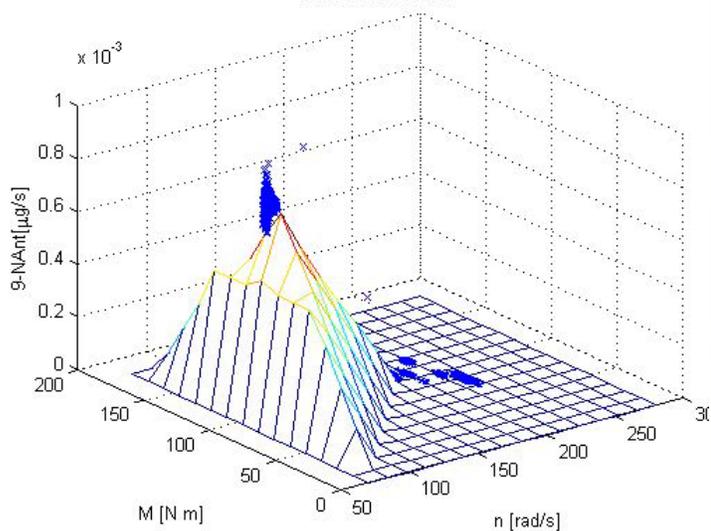
2-Nitronaftaleno



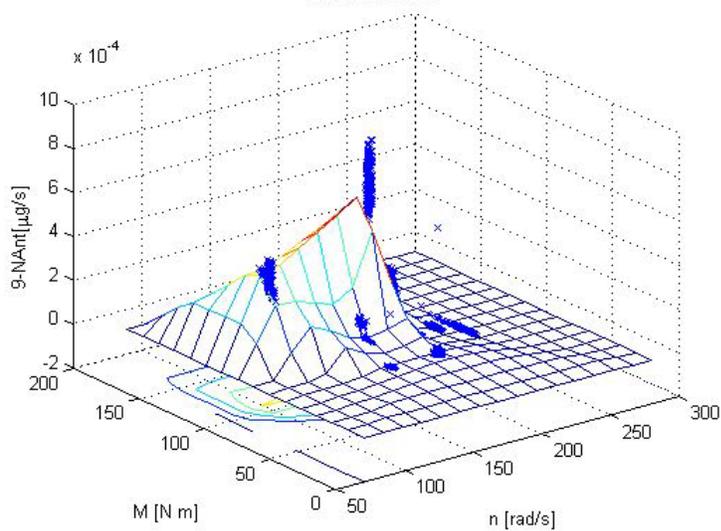
ANEXO B. Mapas 3D - EMISIONES NO REGULADAS - BIODIÉSEL

9-Nitroantraceno

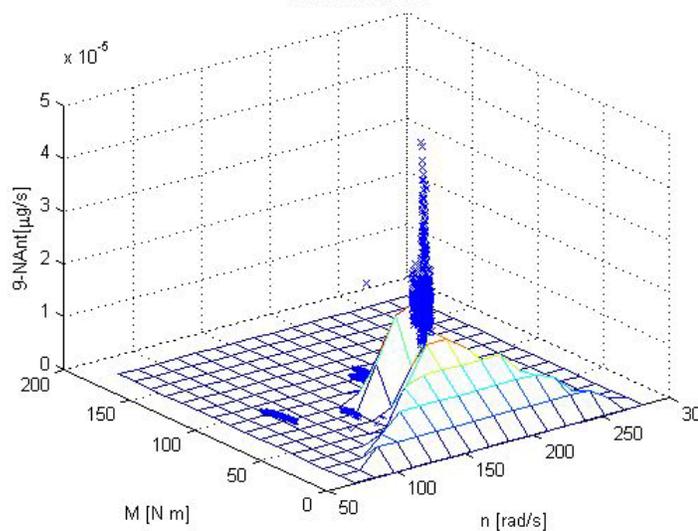
Diesel's Emissions



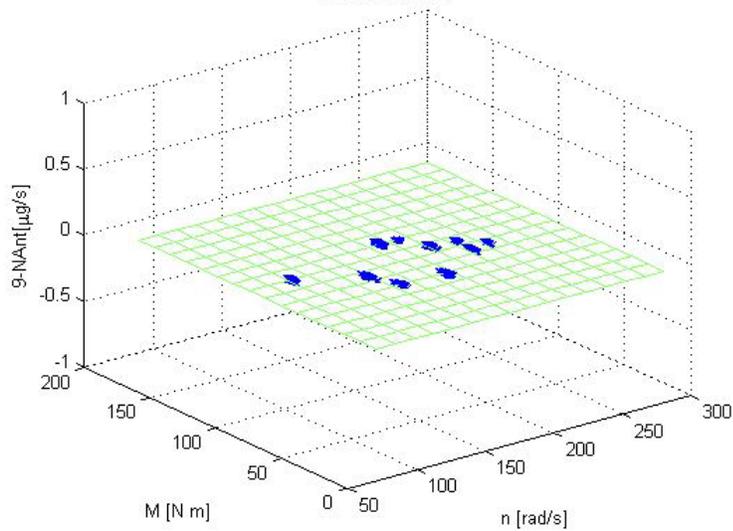
B5's Emissions



B10's Emissions

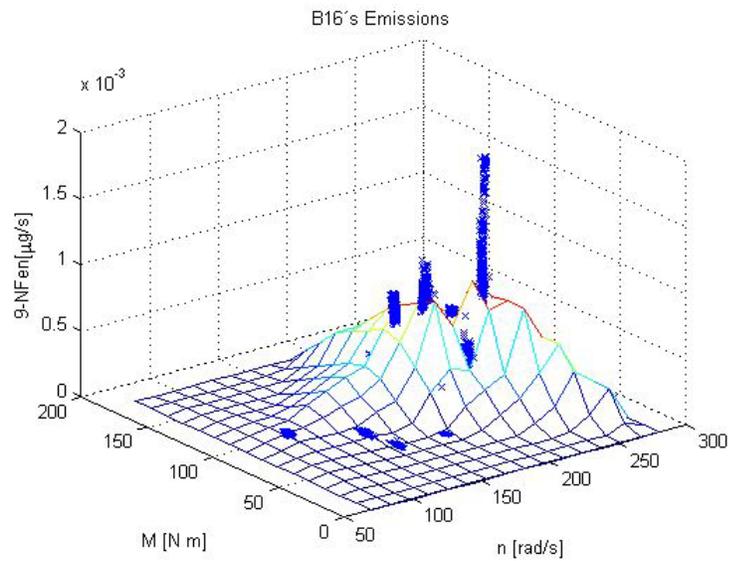
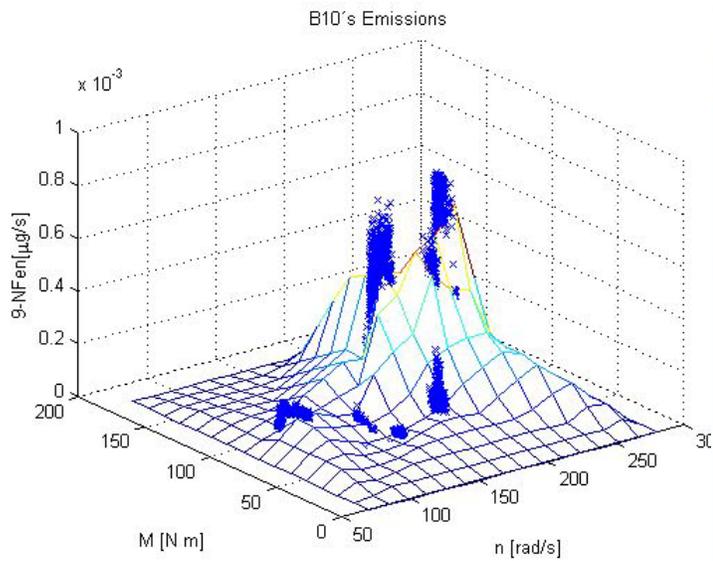
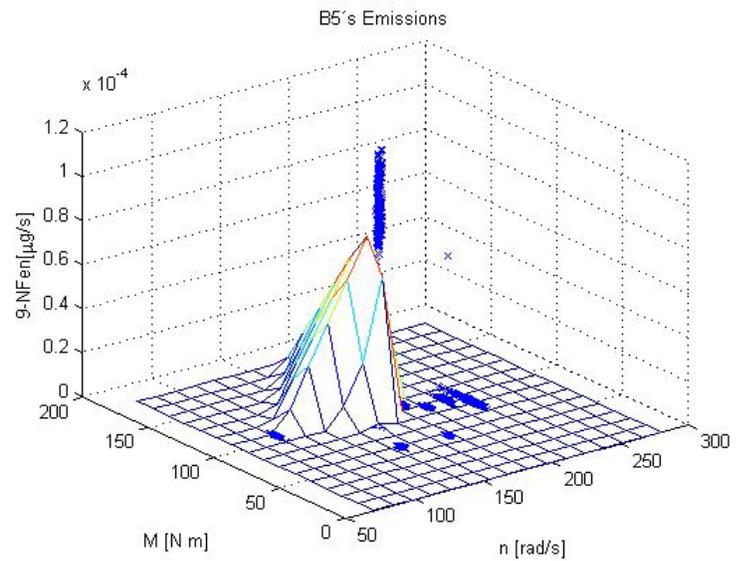
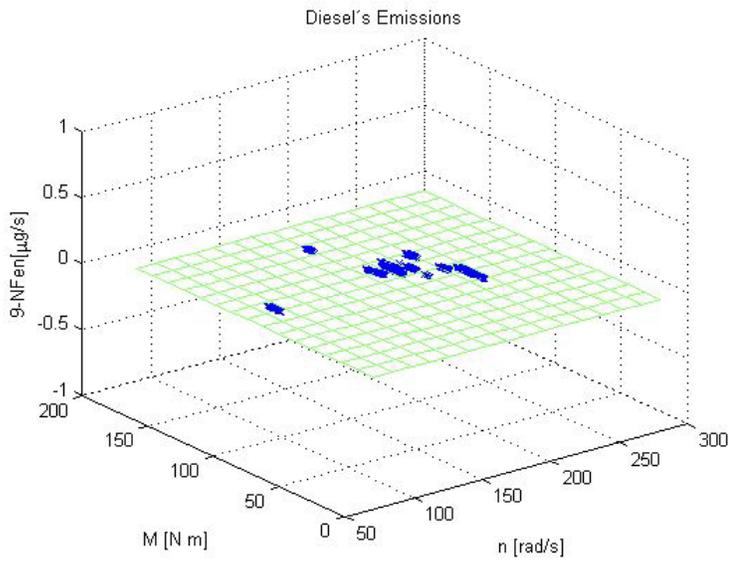


B16's Emissions



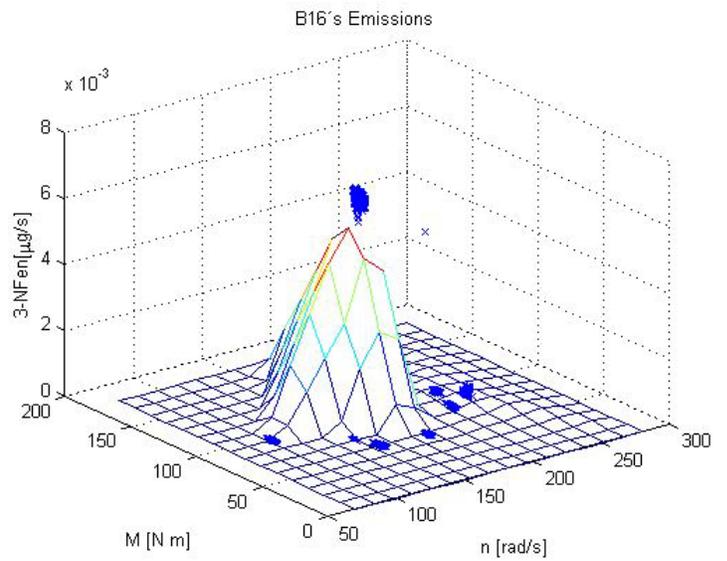
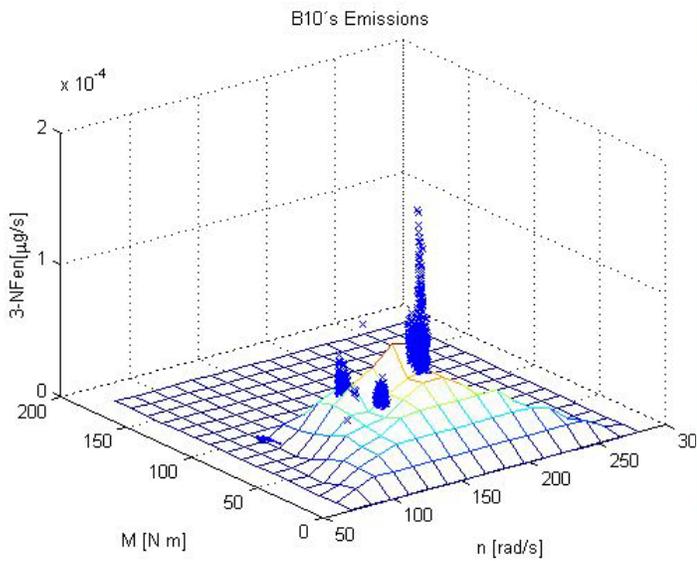
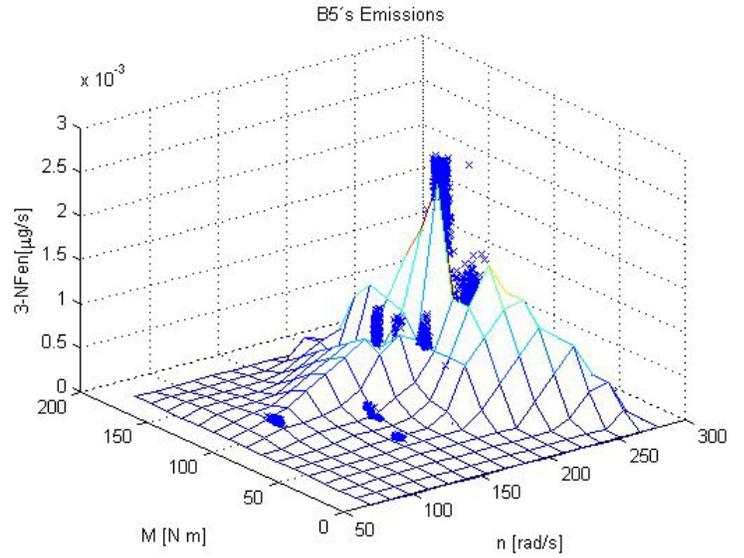
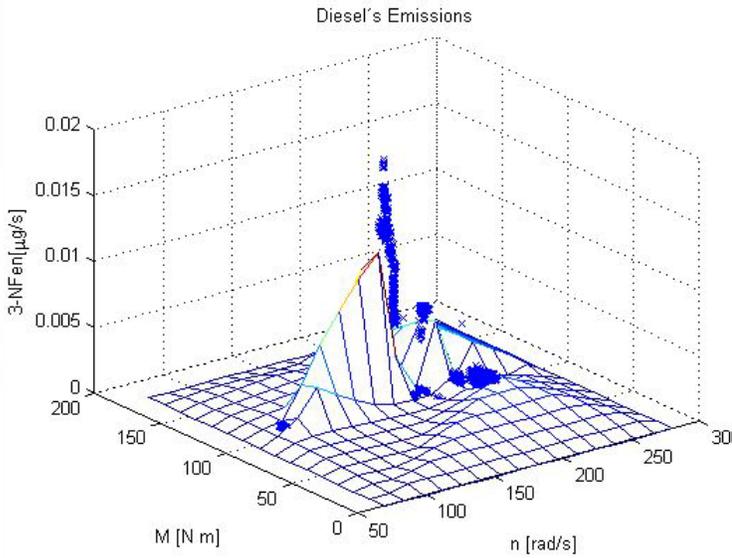
ANEXO B. Mapas 3D - EMISIONES NO REGULADAS - BIODIÉSEL

9-Nitrofenantreno



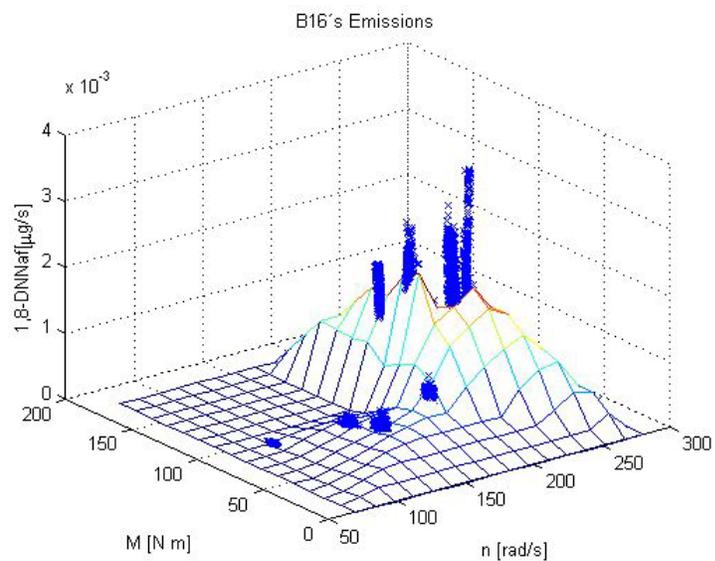
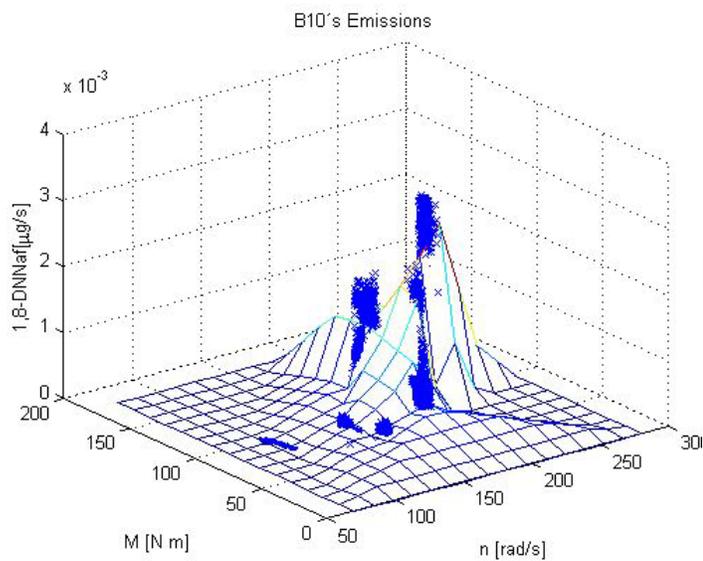
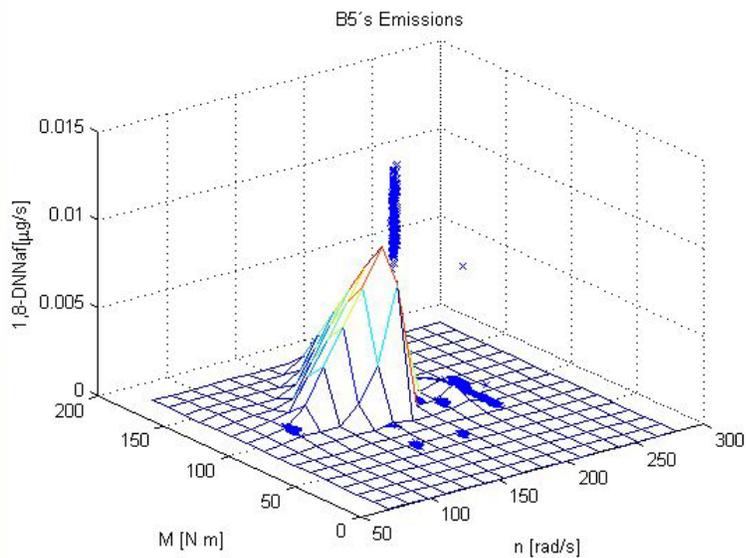
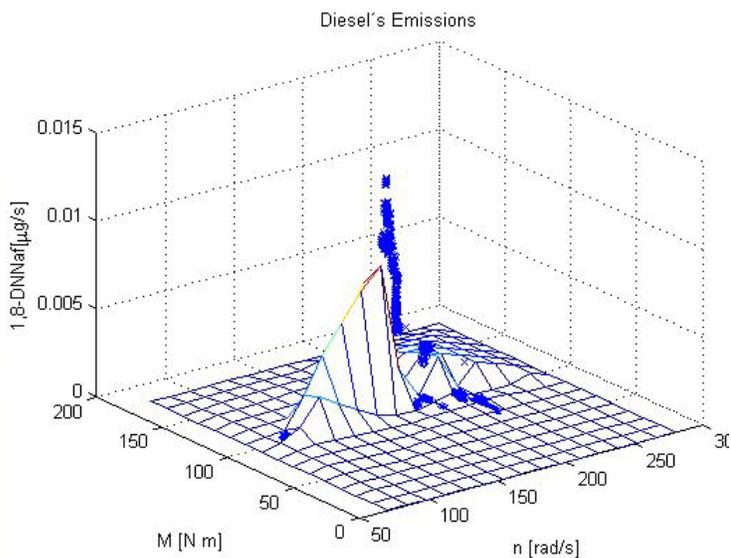
ANEXO B. Mapas 3D - EMISIONES NO REGULADAS - BIODIÉSEL

3-Nitrofenantreno



ANEXO B. Mapas 3D - EMISIONES NO REGULADAS - BIODIÉSEL

1,8-DiNitronaftaleno



ANEXO B. Mapas 3D - EMISIONES NO REGULADAS - BIODIÉSEL

1-Nitropireno

