



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**SIMULACIÓN DE EMISIONES DE GASES CRITERIO DE
UN VEHÍCULO PROPULSADO POR DIESEL 500,
BIODIESEL Y DIESEL UBA.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A :

JOSUÉ SAMUEL MEDINA COLÍN



MEXICO, D.F

2011



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: ANGEL ENRIQUE CHÁVEZ CASTELLANOS

VOCAL: Profesor: VICTOR MANUEL LUNA PABELLO

SECRETARIO: Profesor: ARÓN JAZCILEVICH DIAMANT

1er. SUPLENTE: Profesor: MARÍA RAFAELA GUTIERREZ LARA

2° SUPLENTE: Profesor: LANDY IRENE RÁMIREZ BURGOS

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: CENTRO DE CIENCIAS DE LA

ATMÓSFERA, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ASESOR DEL TEMA: _____
Dr. Aron Jazcilevich Diamant

SUSTENTANTE: _____
Josué Samuel Medina Colín

DEDICATORIA:

A Dios por permitirme finalizar esta etapa de mi vida y por darme la fuerza que creí no tener en los momentos más difíciles de mi vida.

A mi padre Eloy Medina Flores por haberme enseñado, con el ejemplo, a ser un hombre de bien y a vivir mi vida sin vicio alguno, por todos aquellos sacrificios que hacías por nosotros, por siempre haber estado ahí cuando lo necesitábamos. Gracias por todo lo que hiciste por mi madre, por mí y por mis hermanos. Éste y todos mis triunfos serán para ti hasta el día en que nos volvamos a ver.

A mi madre Julia Colín Arriaga por ser mi más grande apoyo, por el amor incondicional que siempre me has dado, por siempre estar ahí para tus hijos, por todos tus sacrificios, por creer siempre en mí. Porque tú eres la razón por la que me esfuerzo cada día para salir adelante. Éste triunfo es gracias a ti y hoy te lo dedico.

A mis hermanos Enrique, Antonio, David, Armando, Eleazar y Georgina. Gracias por todo su apoyo, porque siempre han estado conmigo en las buenas y en las malas, porque sin ustedes a mi lado no hubiera llegado hasta aquí.

A Carina por ser mi compañera, mi novia y mi mejor amiga. Porque juntos transitamos este camino y logramos salir adelante. Gracias por todos esos buenos momentos y por los que vendrán, te deseo lo mejor y recuerda que; ¡hay que apegarse al plan!

Agradecimientos

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

A la UNAM, y en especial a la Facultad de Química, por brindarme la oportunidad de formar parte de ella, por forjarme como profesionista y como ser humano.

Al Dr. Arón Jazcilevich Diamant, por todo su apoyo, en la elaboración de esta tesis, además de todas las oportunidades que me ha brindado para seguirme superando.

Al área de instrumentación del Centro de Ciencias de la Atmosfera, Ing. Wilfrido Gutiérrez López, Ing. Manuel García Espinoza, por su ayuda y asistencia técnica.

A FEMSA, Coca-Cola, por su aportación, en el préstamo del camión de transporte.

A Ulises Diego Ayala por su valiosa ayuda y las horas dedicadas a sacar adelante este proyecto

A Samuel Miguel Rico, Ulises Rojas Zamora, Brenda Valle, Hugo Barrera y Miguel de Coso, por su asistencia técnica.

CONTENIDO

LISTA DE GRÁFICAS.....	V
LISTA DE TABLAS	VI
LISTA DE IMÁGENES.....	VII
RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.2. OBJETIVO Y META.....	3
2. ANTECEDENTES.....	4
2.1 IMPORTANCIA DEL COMBUSTIBLE DIESEL.....	10
2.2 DIESEL CONVENCIONAL Y DIESEL 500	14
2.3 DIESEL DE BAJO AZUFRE (UBA).....	15
2.4 BIODIESEL.....	16
3. METODOLOGÍA	20
3.1 PEMS.....	20
3.2 MEDICIÓN DE EMISIONES.....	22
3.3 SIMULADOR VEHICULAR AVANZADO (ADVISOR)	24
3.3.1 INTRODUCCIÓN A ADVISOR.....	24
3.3.2 ESTRUCTURA DE ADVISOR.....	25
3.3.3 MAPAS TORQUE-RPM-EMISIÓN (T-R-E)	29
3.4 CAMPAÑAS DE MEDICIÓN.....	30
3.5 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS.....	35
3.5.1 EQUIPO AXION.....	35
3.5.2 INCLINÓMETRO HMR3000	39
3.6 CREACIÓN DE LOS MAPAS T-R-E.....	40
3.7 SIMULACIONES EN ADVISOR.	46
4. RESULTADOS	50
4.1 ANÁLISIS DESPUÉS DE ADVISOR	50

4.2 RESULTADOS DIESEL 500 PPM.....	52
4.4 RESULTADOS B20.....	61
4.5 RESULTADOS DIESEL ULTRA BAJO AZUFRE (UBA).....	66
5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	72
5.1 PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	73
5.1.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE CO ₂	73
5.1.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE NO _x	74
5.1.3 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE HC.....	75
5.1.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE CO.....	76
5.2 SIMULACIONES EN ADVISOR.....	77
5.2.1 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE CO ₂	77
5.2.2 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE NO _x	78
5.2.3 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE HC.....	79
5.2.4 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE CO.....	80
5.3 COMPARACION DE RESULTADOS EXPERIMENTALES Y SIMULADOS.....	81
5.3.1 COMPARACION ENTRE HC EXPERIMENTAL Y SIMULADO.....	82
5.3.2 COMPARACION ENTRE NO _x EXPERIMENTAL Y SIMULADO.....	83
5.3.3 COMPARACION ENTRE CO ₂ EXPERIMENTAL Y SIMULADO.....	84
5.3.4 COMPARACION ENTRE CO EXPERIMENTAL Y SIMULADO.....	85
5.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	86
6. CONCLUSIONES.....	87
7. BIBLIOGRAFÍA.....	89
ANEXO 1. NORMATIVIDAD MEXICANA PARA VEHÍCULOS DIESEL.....	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Representación general para una reacción de transesterificación ..	16
Figura 3.1 Diagrama de módulos de un PEMS para análisis y recolección de datos.	23
Figura 3.2 Diagrama de bloques de un arreglo de SIMULINK en ADVISOR ...	26
Figura 3.3 Diagrama de flujo de la simulación de un vehículo convencional en ADVISOR	27
Figura 3.4 Mapa TRE para un camión Mercedes Benz con motor de 5.9L.....	29
Figura 3.5 Mapa de torque y velocidad correspondientes a las mediciones de CO.....	41
Figura 3.6 Mapa completo de T-R-E con los datos experimentales	41
Figura 3.7 Datos interpolados en conjunto con los datos experimentales de torque y velocidad correspondientes a las mediciones de CO.....	42
Figura 3.8 Mapa completo T-R-E con datos interpolados y experimentales de las mediciones de CO	42
Figura 3.9 Identificación del automóvil	47
Figura 3.10 Definición del recorrido.....	48
Figura 3.11 Entrega de resultados en ADVISOR.	49
Figura 4.1 Resultados de la simulación de CO ₂ para el caso de diesel 500. ...	52
Figura 4.2 Resultados de la simulación de NO para el caso diesel 500.....	53
Figura 4.3 Resultados de la simulación de HC para el caso diesel 500.....	54
Figura 4.4 Resultados de la simulación de CO para el caso de diesel 500.....	55
Figura 4.5 Resultados de la simulación correspondiente a CO ₂ para el caso diesel.....	57
Figura 4.6 Resultados de la simulación correspondiente a NO para el caso diesel B10.....	58
Figura 4.7 Resultados de la simulación correspondiente a HC para el caso diesel B10.....	59
Figura 4.8 Resultados de la simulación correspondiente a CO para el caso diesel B10.....	60
Figura 4.9 Resultados de la simulación correspondiente a CO ₂ para el caso diesel B20.....	62

Figura 4.10 Resultados de la simulación correspondiente a NO para el caso diesel B20.....	63
Figura 4.11 Resultados de la simulación correspondiente a HC para el caso diesel B20.....	64
Figura 4.12 Resultados de la simulación correspondiente a CO para el caso diesel B20.....	65
Figura 4.13 Resultados de la simulación correspondiente a CO ₂ para el caso diesel UBA.....	67
Figura 4.14 Resultados de la simulación correspondiente a NO para el caso diesel UBA.....	68
Figura 4.15 Resultados de la simulación correspondiente a HC para el caso diesel UBA.....	69
Figura 4.16 Resultados de la simulación correspondiente a CO para el caso diesel UBA.....	70

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 2.1 Reservas anuales probadas en México (Miguel Rico 2010)	4
Gráfica 2.2 Producción anual de crudo en México (Miguel Rico 2010)	5
Gráfica 2.3 Producción anual de productos petrolíferos en México (Miguel Rico 2010)	6
Gráfica 5.1 Porcentajes de disminución en las emisiones respecto a diesel 500 de CO ₂ en las pruebas experimentales.....	73
Gráfica 5.2 Porcentajes de disminución en las emisiones respecto a diesel 500 de NO _x en las pruebas experimentales.....	74
Gráfica 5.3 Porcentajes de aumento y disminución en las emisiones respecto a diesel 500 de HC en las pruebas experimentales.	75
Gráfica 5.4 Porcentajes de disminución en las emisiones respecto a diesel 500 de CO en las pruebas experimentales.	76
Gráfica 5.5 Porcentajes de disminución en las emisiones respecto a diesel 500 de CO ₂ en las simulaciones.	77
Gráfica 5.6 Porcentajes de disminución en las emisiones respecto a diesel 500 de NO _x en las simulaciones.	78
Gráfica 5.7 Porcentajes de disminución en las emisiones respecto a diesel 500 de HC en las simulaciones.....	79
Gráfica 5.8 Porcentajes de disminución en las emisiones respecto a diesel 500 de CO en las simulaciones.....	80
Gráfica 5.9 Porcentajes combinados de disminución en las emisiones respecto a diesel 500 de HC experimentales y simulados.....	82
Gráfica 5.10 Porcentajes combinados de disminución en las emisiones respecto a diesel 500 de NO _x experimentales y simulados.	83
Gráfica 5.11 Porcentajes combinados de disminución en las emisiones respecto a diesel 500 de CO ₂ experimentales y simulados.....	84
Gráfica 5.12 Porcentajes combinados de disminución en las emisiones respecto a diesel 500 de CO experimentales y simulados.....	85

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Crecimiento de la flota vehicular en circulación, ZMVM-2006. (Ambiente, 2010).....	7
Tabla 2.2 Flota vehicular en la ZMVM, por tipo. (Ambiente, 2010)	7
Tabla 2.3 Factores de emisión por tipo de vehículo. (Ambiente, 2010).....	8
Tabla 2.4 Emisiones por sector en la ZMVM. (Ambiente, 2010)	8
Tabla 2.5 Consumo anual de combustibles en la ZMVM. (Ambiente, 2010).....	9
Tabla 2.6 Flota vehicular en la ZMVM, por tipo. (Ambiente, 2010).....	12
Tabla 2.7 Emisiones anuales por tipo de vehículo. (Ambiente, 2010).....	13
Tabla 2.8 Porcentaje anual de emisión por tipo de vehículo. (Ambiente, 2010)	14
Tabla 3.1 Datos del manual del propietario del camión Mercedes Benz utilizado en la prueba.	32
Tabla 3.2 Composición de las mezclas de combustible utilizado en las pruebas de campo.....	34
Tabla 4.1 Resultados de las emisiones experimentales y simuladas con su correspondiente error acumulado para el caso diesel 500.....	56
Tabla 4.2 Resultados de las emisiones experimentales y simuladas con su correspondiente error acumulado para el caso BIODIESEL B10.....	61
Tabla 4.3 Resultados de las emisiones experimentales y simuladas con su correspondiente error acumulado para el caso BIODIESEL B20.....	66
Tabla 4.4 Resultados de las emisiones experimentales y simuladas con su correspondiente error acumulado para el caso diesel UBA.	71
Tabla 5.1 Porcentaje de variación en las emisiones simuladas y experimentales con respecto a diesel 500.	81

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 3.1 Dinamómetro estático.....	20
Imagen 3.2 Sistema Portátil de Medición de Emisiones Axion.....	21
Imagen 3.3 Camión utilizado en las campañas de medición.....	30
Imagen 3.4 Recorridos dentro del campus de Ciudad Universitaria. Google Earth 2010.....	31
Imagen 3.5 Sistema utilizado para la sustitución del tanque de combustible...	34
Imagen 3.6 Adaptación realizada al inclinómetro para realizar mediciones.	35
Imagen 3.7 Equipo Axion utilizado en las campañas de medición.....	36
Imagen 3.8 Inclinómetro HMR3000 de Honeywell	39

RESUMEN

Se realizan estudios de mezclas de biodiesel y diesel de bajo contenido en azufre (UBA) para evaluar sus ventajas y desventajas en lo referente a emisiones. La metodología propuesta en este trabajo consistió en la utilización de un simulador vehicular en conjunto con un equipo portátil de medición de emisiones para medir, simular y comparar las emisiones de gases criterio y de efecto invernadero de un vehículo diesel con cuatro tipos de combustible; diesel 500, diesel UBA, diesel B10 y diesel B20.

Se probó que el diesel UBA resulta ser el combustible con menores emisiones de gases criterio y de CO₂. Se mostró que el proceso de simulación vehicular representa adecuadamente las emisiones experimentales. El simulador ofrece la ventaja de que las emisiones pueden ser evaluadas a priori, con bastante precisión, bajo diferentes condiciones y ciclos de manejo.

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se propone una metodología para evaluar ventajas y desventajas en cuanto a emisiones de gases criterio (CO, HC's, NOx) y CO₂ por el uso de mezclas de biodiesel y diesel de bajo contenido en azufre utilizados en un camión de reparto.

En este proyecto de tesis, la metodología propuesta consistió de dos partes: Primero, se utilizó un sistema portátil de medición de emisiones, (PEMS por sus siglas en inglés) para obtener datos experimentales de las emisiones criterio de un vehículo diesel en el que se utilizaron cuatro combustibles: diesel, diesel UBA, biodiesel B10 y biodiesel B20. En la segunda parte se utilizaron las mediciones para construir mapas Torque - RPM - Emisión (TRE) para realizar las simulaciones con el software del Advanced Vehicle Simulator (ADVISOR). De esta manera es posible obtener y evaluar las emisiones correspondientes bajo condiciones reales de manejo.

Entre las ventajas que se tienen al usar un simulador para obtener las emisiones se encuentran; la capacidad de obtener, segundo a segundo, las emisiones de un vehículo, relacionar las emisiones con una inclinación de terreno determinada, condiciones y tipo de manejo. Además se pueden modificar características del vehículo, como tamaño de rueda, transmisión, área frontal del vehículo, coeficiente de arrastre, peso y potencia del vehículo, para observar el efecto de estas modificaciones en las emisiones de gases criterio a la atmósfera.

Al realizar las simulaciones se encontró que el combustible más eficiente y que emite la menor cantidad de gases criterio y de gases de efecto invernadero es el diesel Ultra Bajo Azufre. En segundo lugar se ubicó el diesel B20, en tercer lugar el diesel B10, por último y con las emisiones más altas el diesel 500, que es el diesel que se comercializa en México.

Una vez que se obtiene la simulación del vehículo en base a los mapas TRE, se puede hacer un seguimiento segundo a segundo de sus emisiones realizando algún otro recorrido virtual y bajo diferentes condiciones de manejo.

1.2. OBJETIVO Y META

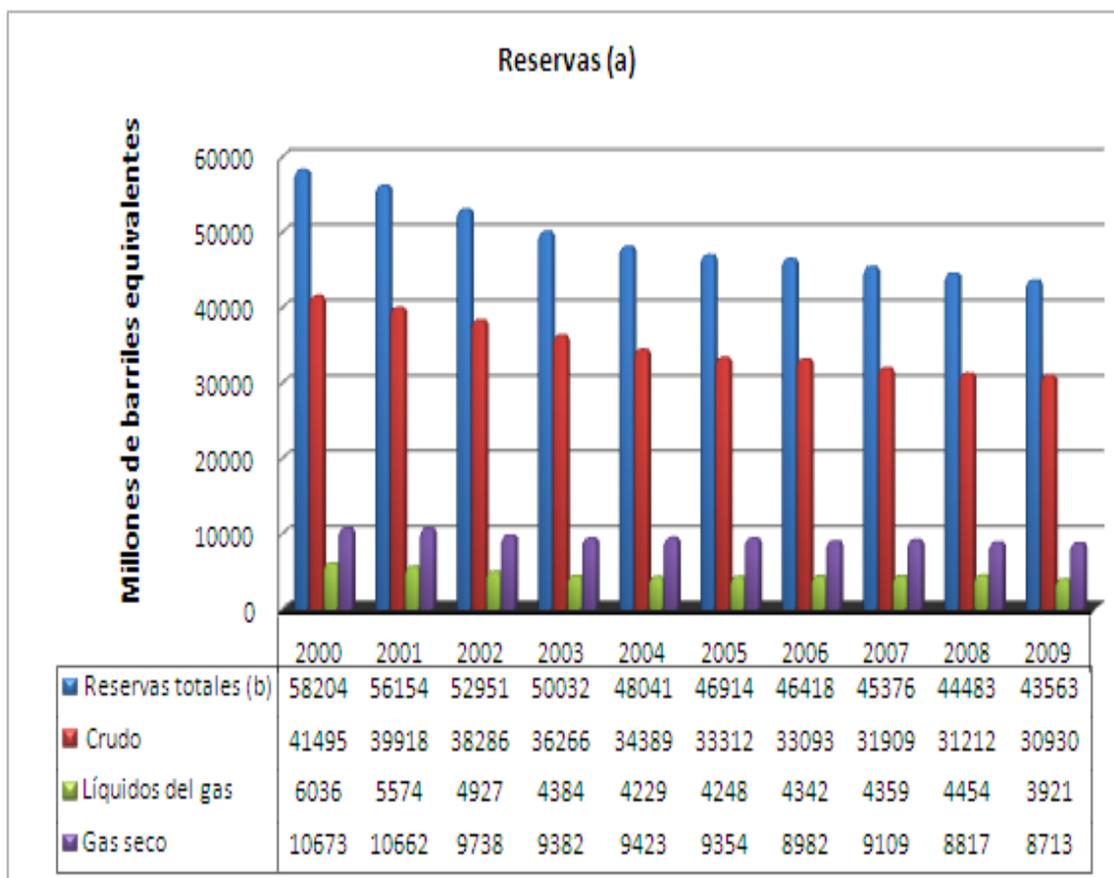
Objetivo: Medir, simular y comparar las emisiones de las diferentes mezclas de biodiesel, diesel UBA y diesel actualmente utilizado en la Ciudad de México.

Meta: Obtener, con el uso del simulador vehicular avanzado (ADVISOR), las emisiones de un vehículo de reparto diesel usando; biodiesel B10, biodiesel B20, diesel Ultra Bajo en Azufre y diesel 500ppm de contenido de azufre.

2. ANTECEDENTES

Debido a la disminución de las reservas de petróleo en México (Energía, 2008) y para disminuir los gases criterio, tóxicos y de efecto invernadero emitidos anualmente por los vehículos con motores de combustión interna (Ambiente, 2008), los biocombustibles ofrecen una posible alternativa para a los combustibles derivados del petróleo.

En la Gráfica 2.1 se puede observar la tendencia en la disminución de las reservas probadas de petróleo en México desde el año 2000 hasta el año 2009.



Gráfica 2.1 Reservas anuales probadas en México (Miguel Rico 2010)

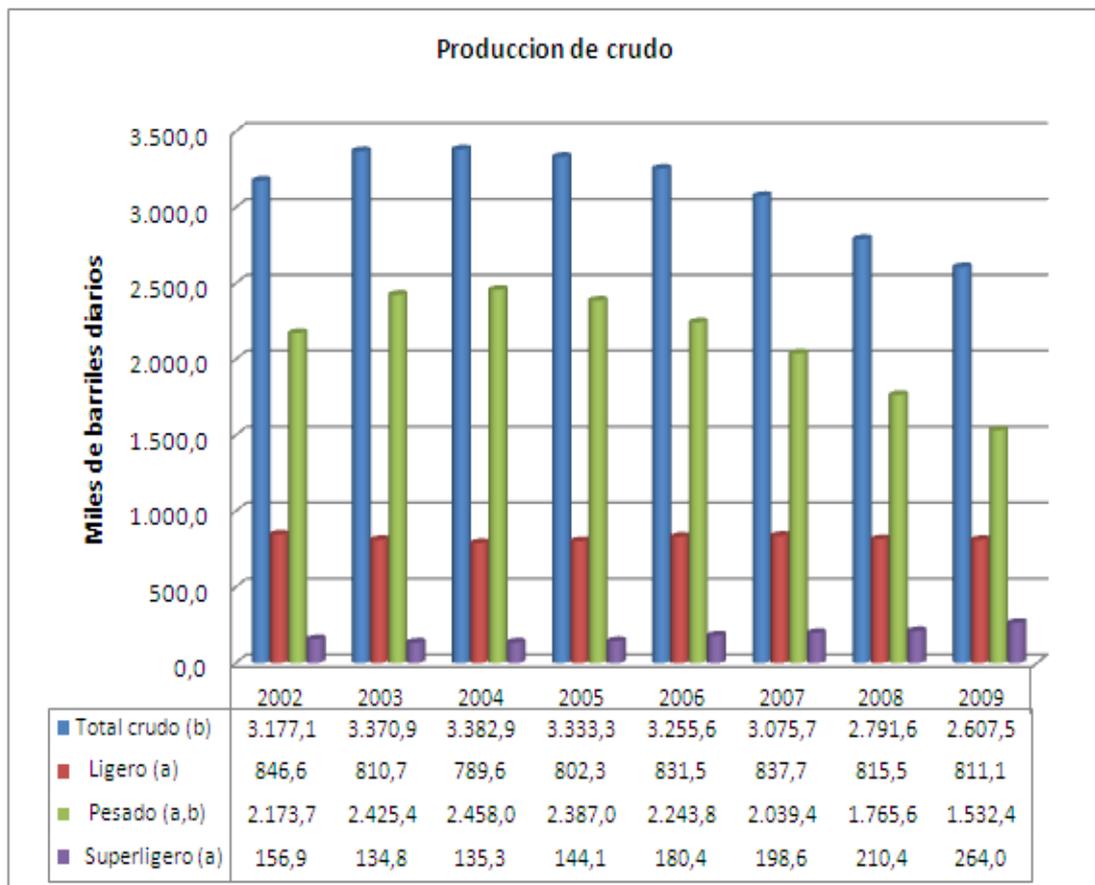
a. Cifras al 1° de enero de cada año.

b. Para la estimación de las reservas probadas, desde 2003 se emplearon las definiciones de la Securities and Exchange Commission (SEC) de Estados Unidos, para años anteriores las cifras fueron ajustadas.

Fuente: Sistema de Información Energética, con información de Petróleos Mexicanos.

Esta tendencia nos indica que es necesario buscar alternativas de largo y mediano plazos para satisfacer la demanda interna de combustibles, ya que la demanda de éstos, contrario a la producción, ha ido aumentando en los últimos años.

En la gráfica 2.2 se muestra cómo ha decrecido la producción de crudo mexicano a partir de 2004. La baja producción de crudo no ha alterado de gran manera la producción de diesel ya que la producción se ha mantenido estable en los últimos años. Esto es un aliciente para la posible introducción del biodiesel en el mercado y así disminuir la importación de diesel del extranjero.

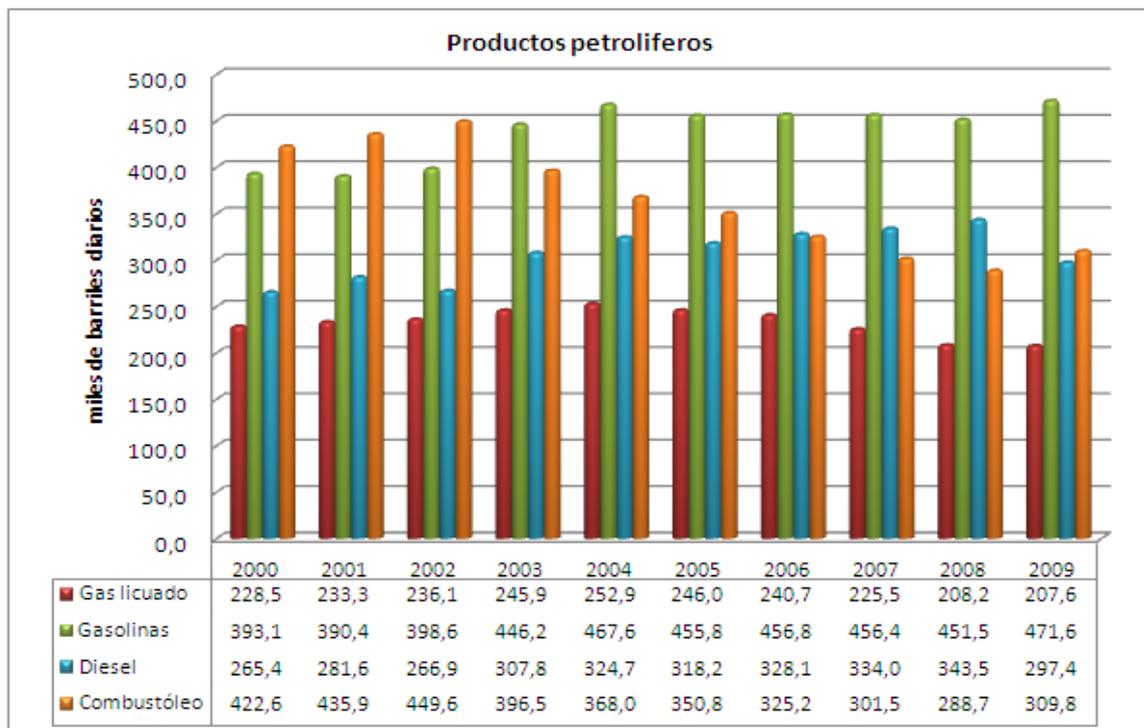


Gráfica 2.2 Producción anual de crudo en México (Miguel Rico 2010)

a A partir de 2004, el tipo de crudo se clasifica desde el pozo, situación que refleja desde 2002 para fines comparativos.
b El volumen de producción en diciembre de 2006, registra una baja debido al cierre de pozos por condiciones climatológicas adversas.

Fuente: Sistema de Información Energética, con información de Petróleos Mexicanos.

La gráfica 2.3 muestra la producción de gas licuado, diesel, gasolinas y combustóleo en México desde el año 2000 hasta el año 2009, con datos de Petróleos Mexicanos proporcionados por el Sistema de Información Energética.



Gráfica 2.3 Producción anual de productos petrolíferos en México (Miguel Rico 2010)

Aunado a la disminución de las reservas de petróleo, las emisiones de los vehículos que utilizan motores de combustión interna han sido señaladas como las principales causantes del cambio climático, además de enfermedades que afectan la salud pública (Etzal RA, 1999).

En la Ciudad de México y su zona conurbada las normas oficiales, establecen que las concentraciones de Ozono (O_3) y de material particulado menor a 10 micrómetros (PM_{10}) no deben superar las 0.11 ppm promedio por hora y $120\mu g/m^3$ percentil 98 anual respectivamente. Sin embargo los límites de dichas normas se sobrepasan en numerosas ocasiones a lo largo del año. En esta metrópolis se emiten a la atmósfera más de 2.5 millones de toneladas al año de contaminantes, de las cuales los vehículos automotores son responsables del 84% del total de emisiones. Como se mencionó esto

representa costos en salud pública por padecimientos respiratorios de la población más susceptible.

Como se aprecia en la tabla 2.1 la flota vehicular de uso particular ha ido creciendo de 2.1 millones en 1990 a 4.0 millones en el 2006. En la tabla 2.2 se observa la cantidad de vehículos; se clasifican por tipo y combustible que utilizan. Se puede ver que el 95% del total son vehículos de gasolina y aproximadamente el 4% son diesel. El resto lo conforman vehículos de Gas natural y LP. (Miguel Rico, 2010)

A pesar de que los vehículos diesel conforman tan sólo el 4% del total, son los que acumulan la mayor cantidad de emisiones de CO por kilómetro recorrido (ver tabla 2.3).

Año	1990	1992	1994	1996	1998	2000	2002	2004	2006
Vehículos (millones)	2.1	2.2	2.4	2.5	2.7	2.9	3.3	3.7	4.0

Tabla 2.1 Crecimiento de la flota vehicular en circulación, ZMVM-2006. (Ambiente, 2010).

Tipo de Vehículo	Número de vehículos					
	Gasolina	diesel	GLP	GNC	Total	Porcentaje
Autos particulares	3,684,015	6,728	2,578	30	3,693,351	81.4
Taxis	156,589	38	NA	NA	156,627	3.5
Vagonetas y Combis	29,021	822	20	NA	29,863	0.7
Microbuses	15,774	240	17,800	282	34,096	0.8
Pick Up	115,763	1,660	1,018	NA	118,441	2.6
Vehículos de hasta 3 ton	40,769	26,093	4,287	8	71,157	1.6
Tractocamiones	NA	71,055	NA	NA	71,055	1.6
Autobuses	2,283	41,353	70	NA	43,706	1.0
Vehículos de más de 3 ton	49,969	25,665	4,945	10	80,589	1.8
Motocicletas	237,808	NA	NA	NA	237,808	5.2
Metrobuses	NA	221	NA	NA	221	0.005
Total	4,331,991	173,875	30,718	330	4,536,693	100
Porcentaje	95.49	3.83	0.68	0.01	100	-

Tabla 2.2 Flota vehicular en la ZMVM, por tipo. (Ambiente, 2010)

Tipo de vehículo	Factores de emisiones [g/km]			
	NO _x	CO	PM ₁₀	COV
Autos particulares	0.654	1.175	0.143	0.306
Combis	0.842	1.682	0.139	0.535
Microbuses	1.007	1.850	0.135	0.765
Pick Up	0.788	1.672	0.136	0.483
Vehículos de hasta 3 ton	1.369	2.714	0.156	1.280
Tractocamiones	10.273	16.699	0.894	2.794
Autobuses	14.621	18.568	0.259	3.492
Vehículos de más de 3 ton	6.761	9.971	0.807	1.769
Metrobuses	17.360	5.510	0.480	3.161

Tabla 2.3 Factores de emisión por tipo de vehículo. (Ambiente, 2010)

La tabla 2.4 muestra las emisiones por sector en la zona metropolitana del valle de México. Se aprecia que las fuentes móviles son uno de los más importantes emisores de gases criterio a la atmósfera. Este sector incluye automóviles a gasolina, gas LP, gas natural y diesel.

SECTOR	CO ₂		CO		NO _x		PM ₁₀		COV	
	[ton/año]	[%]	[ton/año]	[%]	[ton/año]	[%]	[ton/año]	[%]	[ton/año]	[%]
Fuentes Puntuales	14,805,764	39.0	6,961	0.4	20,094	10.7	4,986	20.5	129,178	21.8
Fuentes aéreas			9,263	0.6	12,043	6.4	14,678	60.4	241,252	40.8
Fuentes móviles	22,290,505	58.7	1,552,204	99.0	154,919	82.4	3,902	16.1	185,384	31.3
Vegetación y suelos	889,249	2.3	NA	NA	1,031	0.5	730	3.0	35,585	6.0
Total	37,985,518	100	1,568,428	100	188,087	100	24,296	100	946,733	100

Tabla 2.4 Emisiones por sector en la ZMVM. (Ambiente, 2010)

El porcentaje con el que contribuyen los vehículos a la emisión total de CO₂ es del 58.7%, de CO en 99%, de NO_x en 82.4%, de PM₁₀ en 16.1% y de COV en 31.3%. En el caso de las PM₁₀ y COV, los vehículos no son el mayor productor

de estos, sin embargo, contribuyen de manera importante a la emisión total de esos gases a la atmósfera.

En cuanto al consumo de combustibles en la ZMVM, según la tabla 2.5, el combustible de mayor consumo es la gasolina Magna con un 39.7% siendo este el combustible de menor precio por litro. El consumo de diesel es del 13.9% y el diesel UBA sólo el 1.5%.

Tipo de Combustible	Consumo Anual [millones de barriles]	Consumo Anual [millones de litros]	Energía disponible	
			[PJ]	[%]
Gasolina Premium	5.0	797	25.2	4.4
Gasolina Magna	45.6	7,246	229	39.7
diesel Industrial bajo Azufre	1.3	201	7.1	1.2
PEMEX diesel	13.9	2,211	78.6	13.6
Gas Natural	22,057.6	3,506,880	124.2	21.5
Gas LP	26.7	4,244	112.3	19.5
Total ZMVM	22,150.1	3,521,579	576.4	100

Tabla 2.5 Consumo anual de combustibles en la ZMVM. (Ambiente, 2010)

De todos estos posibles sustitutos del petróleo, las tecnologías que son más viables a corto plazo son los biocombustibles. Como antecedentes se tiene al caso de Brasil en donde se ha demostrado que el cambio hacia los biocombustibles no sólo es una cuestión de protección al ambiente sino que es también una fuente de oportunidad económica para los productores de este tipo de combustibles. (Martínez, 2002)

Es por eso que se eligió evaluar las emisiones de cuatro combustibles tres de los cuales son mezclas de biodiesel.

2.1 IMPORTANCIA DEL COMBUSTIBLE DIESEL

Se le denomina combustible diesel a cualquier carburante utilizado en motores de ciclo diesel, el cual fue patentado en 1893 por Rudolf Diesel. Los motores diesel utilizan un sistema conocido como Compresión-Ignición, en el cual el combustible se inyecta en la parte superior de la cámara de combustión a gran presión mediante un inyector que atomiza el combustible con el aire produciéndose la combustión a alta temperatura y presión (entre 700 y 900 °C) Como resultado, la mezcla hace ignición muy rápidamente. Esta combustión ocasiona que el gas contenido en la cámara se expanda, impulsando el pistón hacia abajo.

En contraste los motores a gasolina se basan en el ciclo de Otto, en el cual una mezcla de aire y combustible entra en el cilindro para que una chispa provoque la ignición.

Los motores diesel tienen mayor rendimiento de combustible en comparación con los motores a gasolina. Sin embargo, debido a la constante ganancia de mercado de los motores diesel en automóviles desde la década de 1990, el precio de éste combustible ha superado al de la gasolina debido al aumento de la demanda.

Los motores diesel producen muy poco CO como resultado de la combustión. Esto se debe a que el combustible se quema con exceso de aire en la cámara de combustión. Sin embargo tienden a producir hollín ó más específicamente material particulado (PM). Éste material está constituido principalmente de compuestos de carbono como resultado de una combustión incompleta. Esto se debe principalmente a que existen bajas temperaturas locales dentro del cilindro donde el combustible no ha sido completamente atomizado. Estas bajas temperaturas se encuentran generalmente en las paredes del cilindro. En estas áreas la mezcla de combustible es rica y al existir menos aire y una menor temperatura, la combustión es incompleta depositando el carbón en las paredes del cilindro.

Para las aplicaciones comerciales que requieren de torque alto en la tracción, tales como la agricultura y transporte de mercancías pesadas, los motores diesel suelen ser la mejor opción ya que ofrecen mayor torque a bajas revoluciones (entre 1600 y 2000 rpm) lo que produce una conducción más suave con cargas pesadas y menor desgaste del motor. Además esto hace que se consuma una menor cantidad de combustible haciendo que estos motores sean más eficientes y económicos. (Perkins Engines, 2006)

En el caso de los automóviles de uso particular, el motor a diesel conserva muchas de las características de eficiencia y torque de los motores utilizados para cargas pesadas, haciendo que los automóviles particulares con motor diesel sean más potentes y duraderos que los de motores a gasolina. Sin embargo los costos y reparaciones de los vehículos diesel son mucho más altos que la versión a gasolina. (Siuro, 2007) Como ejemplo, en México un automóvil Volkswagen Jetta con motor diesel es en promedio un 22% más caro que el Jetta básico a gasolina (Volkswagen México, 2011) o una camioneta Nissan Urvan con motor diesel es en promedio 11% más cara que la Urvan a gasolina (Nissan México, 2011).

En la tabla 2.7 se presenta la flota vehicular en la ZMVM, por tipo de combustible. En este caso se observa que los autos particulares que utilizan diesel corresponden al 0.183% del total de vehículos particulares, mientras que en conjunto los vehículos diesel suman apenas el 3.83% del total de la flota vehicular en la ZMVM.

Los vehículos que consumen mayor cantidad de diesel son tractocamiones, autobuses, vehículos de más de 3 toneladas y metrobuses. Aunque la flota de automóviles particulares que usan diesel es pequeña hay que considerar que en el mercado actual la oferta de autos diesel se ha incrementado y posiblemente en algunos años la flota vehicular diesel sea más grande. Si se decidiera utilizar biodiesel como combustible alternativo al diesel mineral existirían menos automóviles dependientes del petróleo. Sin embargo, los

automóviles diesel preocupan por sus emisiones, y es lo que motiva este trabajo.

Tipo de Vehículo	Número de vehículos					Porcentaje
	Gasolina	diesel	GLP	GNC	Total	
Autos particulares	3,684,015	6,728	2,578	30	3,693,351	81.4
Taxis	156,589	38	NA	NA	156,627	3.5
Vagonetas y Combis	29,021	822	20	NA	29,863	0.7
Microbuses	15,774	240	17,800	282	34,096	0.8
Pick Up	115,763	1,660	1,018	NA	118,441	2.6
Vehículos de hasta 3 ton	40,769	26,093	4,287	8	71,157	1.6
Tractocamiones	NA	71,055	NA	NA	71,055	1.6
Autobuses	2,283	41,353	70	NA	43,706	1.0
Vehículos de más de 3 ton	49,969	25,665	4,945	10	80,589	1.8
Motocicletas	237,808	NA	NA	NA	237,808	5.2
Metrobuses	NA	221	NA	NA	221	0.005
Total	4,331,991	173,875	30,718	330	4,536,693	100
Porcentaje	95.49	3.83	0.68	0.01	100	

Tabla 2.6 Flota vehicular en la ZMVM, por tipo. (Ambiente, 2010)

Otro tema importante que se debe considerar es la antigüedad de la flota a diesel, ya que como se sabe, entre más viejo sea el motor, su rendimiento es menor y por lo tanto las emisiones son mayores.

De las unidades que utilizan diesel, alrededor del 38% son unidades modelo 1993 y anteriores, aproximadamente el 8% y cerca del 54% son vehículos que incorporan mejoras tecnológicas para cumplir con los estándares de emisión EPA 94 y EPA 98 respectivamente. (Miguel Rico, 2010)

Los cambios en la tecnología de los vehículos a diesel, han dado como resultado que los vehículos actuales tengan niveles de emisión más bajos a los modelos 1990 y anteriores. Actualmente, los motores diesel han evolucionado a tal punto, que han reducido las emisiones de los óxidos de nitrógeno en un 40% y las partículas PM₁₀ en un 77%. (Ambiente, 2010)

Para continuar con la reducción de estos contaminantes, se espera que los nuevos vehículos diesel que se comercialicen en México, cuenten con convertidores catalíticos y trampas de partículas, además de sistemas de tren de válvulas y tasa de compresión variable, lo cual permitirá una disminución de las emisiones contaminantes. (Miguel Rico, 2010)

La tabla 2.7 muestra las emisiones, en toneladas por año, según los inventarios del SMA. Los vehículos diesel conforman un sector importante en cuanto a la emisión de gases criterio a la atmósfera.

Tipo de Vehículo	Número de Vehículos	Emisiones [ton/año]				
		CO ₂	CO	NO _x	PM ₁₀	COV
Autos particulares	3,395,800	11,552,488	638,104	60,662	963	90,653
Taxis	155,126	2,191,517	190,259	20,995	183	14,362
Combis	239,746	535,185	114,161	5,868	49	7,585
Microbuses	36,056	1,626,482	106,237	10,923	52	14,063
Pick Up	133,352	762,710	106,005	4,930	68	9,526
Vehículos de hasta 3 ton	81,628	563,260	44,535	2,791	103	4,816
Tractocamiones	60,938	1,337,160	27,177	16,702	1,455	4,544
Autobuses	43,108	2,261,578	35,267	22,005	391	5,588
Vehículos de más de 3 ton	100,819	1,061,440	134,444	8,194	541	7,985
Motocicletas	180,701	380,453	155,951	1,648	91	26,225
Metrobuses	221	18,232	64	201	6	37
Total	4,427,495	22,290,505	1,552,204	154,919	3,902	185,384

Tabla 2.7 Emisiones anuales por tipo de vehículo. (Ambiente, 2010)

En la tabla 2.8 se muestran los datos de la tabla anterior como el porcentaje de emisión anual por tipo de vehículo. Se observa que a pesar de que éstos sólo conforman el 4% del total de vehículos que circulan en la zona metropolitana, emiten el 16% de emisiones de CO₂.

La normatividad para vehículos diesel en México está regulada por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y se presenta en el Anexo 1, al final de este trabajo.

Tipo de Vehículo	Número de Vehículos	Emisiones [%]				
		CO ₂	CO	NO _x	PM ₁₀	COV
Autos particulares	3,395,800.00	51.83	41.11	39.16	24.68	48.90
Taxis	155,126.00	9.83	12.26	13.55	4.69	7.75
Combis	239,746.00	2.40	7.35	3.79	1.26	4.09
Microbuses	36,056.00	7.30	6.84	7.05	1.33	7.59
Pick Up	133,352.00	3.42	6.83	3.18	1.74	5.14
Vehículos de hasta 3 ton	81,628.00	2.53	2.87	1.80	2.64	2.60
Tractocamiones	60,938.00	6.00	1.75	10.78	37.29	2.45
Autobuses	43,108.00	10.15	2.27	14.20	10.02	3.01
vehículos de más de 3 ton	100,819.00	4.76	8.66	5.29	13.86	4.31
Motocicletas	180,701.00	1.71	10.05	1.06	2.33	14.15
Metrobuses	221.00	0.08	0.004	0.13	0.15	0.02
Total	4,427,495.00	100	100	100	100	100

Tabla 2.8 Porcentaje anual de emisión por tipo de vehículo. (Ambiente, 2010)

2.2 DIESEL CONVENCIONAL Y DIESEL 500

El combustible diesel convencional, también llamado diesel 500 (por su contenido de 500ppm de azufre), se manufactura a partir de mezclas de gasóleos con querosinas y aceite cíclico ligero, el cual es producto del proceso de desintegración catalítica fluida, proceso en el que se alcanzan temperaturas de 250 °C y 300 atm de presión.

Anteriormente la manufactura de diesel involucraba utilizar lo que quedaba después de remover productos valiosos del petróleo. Hoy en día el proceso de fabricación del diesel es muy complejo ya que comprende escoger y mezclar diferentes fracciones de petróleo para cumplir con especificaciones precisas. La producción de diesel estable y homogéneo requiere de experiencia, respaldada por un estricto control de laboratorio.

El diesel está formado aproximadamente por 75% de hidrocarburos saturados (sobre todo parafina y cicloparafinas), y el 25% de hidrocarburos aromáticos (incluyendo naftalinas y alquilbencenos). La fórmula química para el diesel común es C₁₂H₂₃, aunque puede extenderse de C₁₀H₂₀ a C₁₅H₂₈.

El diesel, en comparación con la gasolina, resulta ser más económico al momento de refinarlo ya que tiene costos 20 a 25% menores. Además los automóviles con motor diesel también tienen consumos menores de combustible.(Fangrui, 1999)

2.3 DIESEL DE BAJO AZUFRE (UBA)

El azufre se encuentra naturalmente en el petróleo. Si éste no es eliminado durante los procesos de refinación, el diesel se encontrará contaminado con azufre. El azufre es el principal causante de las emisiones de material particulado (PM) a la atmósfera.

La reducción del límite de azufre en el diesel a 0.05 por ciento es una tendencia mundial. Este contenido es necesario para poder operar la nueva generación de motores diesel limpios.

Para poder cumplir con los requerimientos de niveles bajos de azufre, es necesario contar con equipos adicionales de desulfuración, además de unidades de hidrodésintegración.

Se ha probado que al reducir el contenido de azufre las emisiones de material particulado bajan. Sin embargo esta medida será insuficiente para mejorar la calidad del aire si antes no se renueva la flota diesel que en México circula ya que la mayoría de estos vehículos cuentan con motores viejos a los que se les da un pobre o nulo mantenimiento.(OLADE, 2008)

2.4 BIODIESEL.

El biodiesel es un combustible renovable sustituto del diesel convencional y proviene del procesamiento de aceites vegetales, tanto naturales como reciclados (soya, girasol, palma, etc.) y de grasas animales. Se obtiene mediante el proceso de transesterificación de los aceites por reacción química con el alcohol para formar ésteres grasos (biodiesel) y glicerina.

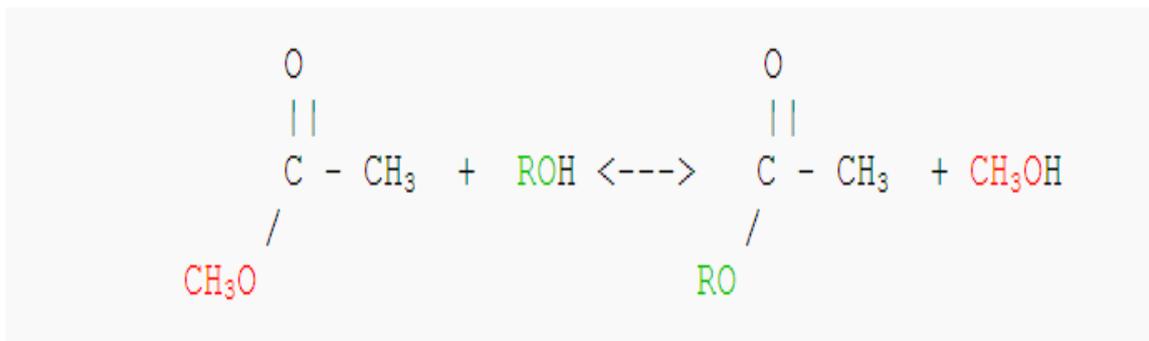


Figura 2.1 Representación general para una reacción de transesterificación

Se obtiene de dos fuentes principales:

Aceites vegetales:

Provenientes de todo tipo de plantas oleaginosas: palma africana, soya, higuera, girasol, colza, entre otros.

- *Palma africana:* El aceite de palma se extrae de la pulpa; el rendimiento de un racimo oscila entre el 17 y el 27%. El biodiesel obtenido del aceite de palma tiene mayor estabilidad oxidativa que el biodiesel de aceite de soya.
- *Soya:* Es el cultivo oleaginoso de mayor importancia a nivel mundial, Estados Unidos, Brasil y Argentina son los principales productores. Contiene el 18% de aceite (85% no saturado) y 38% de proteína.
- *Higuera:* El aceite se extrae de la semilla y es considerado el mejor para producir biodiesel, por ser el único soluble en alcohol y el proceso de obtención

de biodiesel no requiere calor y el consecuente gasto de energía que exigen otros aceites vegetales en su transformación a combustible.

Grasas animales:

Se pueden obtener como subproductos del faenamiento de ganado vacuno, porcino, etc. (OLADE, 2008)

El proceso de obtención de biodiesel se muestra en la figura 2.2

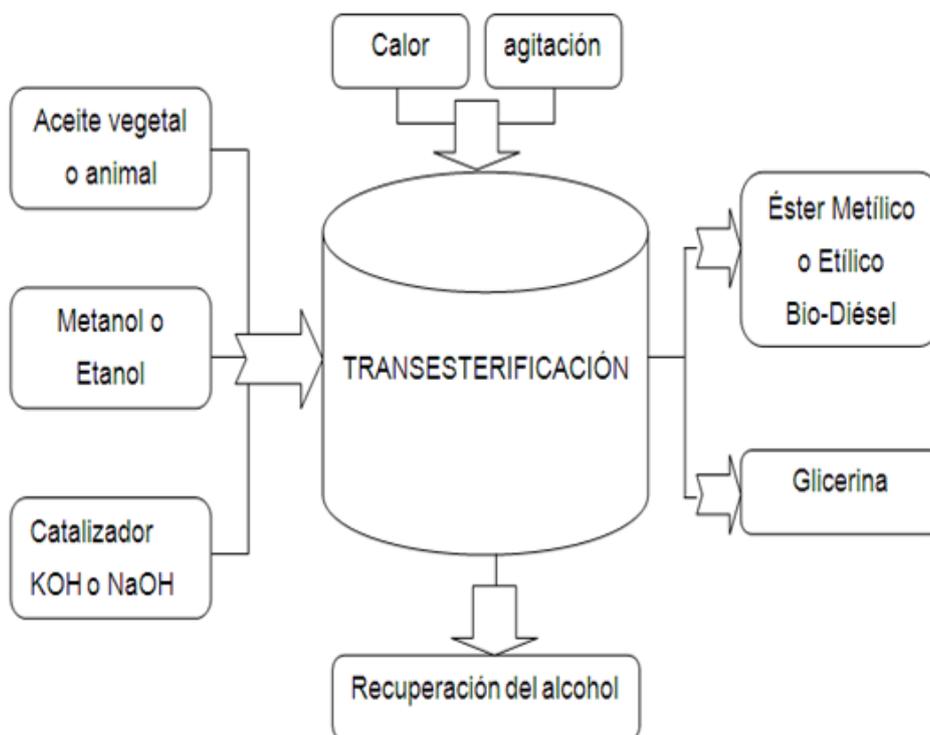


Figura 2.2 Representación general para una reacción de transesterificación

Entre las ventajas del biodiesel con respecto al diesel convencional, se tiene que:

- Es menos volátil, más seguro de transportar y manipular, debido a que tiene un punto de inflamación (punto de flasheo) relativamente alto (150°C).

- Contiene 11% de oxígeno en peso y no contiene azufre, disminuyendo las emisiones de las partículas sólidas. Asimismo mejora la lubricidad del combustible, aumentando la vida útil de los motores.
- Es altamente biodegradable en el agua, por lo que en caso de derrame se degrada más rápidamente que el diesel convencional.
- No es tóxico, es aproximadamente 10 veces menos tóxico que la sal común.
- Emite menos CO₂ en su ciclo de vida, que el fijado mediante el proceso de fotosíntesis por las plantas usadas para producirlo.
- Tiene una combustión más completa que el diesel, disminuye en un 90% la cantidad de hidrocarburos no quemados y en 80% la cantidad de los aromáticos.

Entre las desventajas del biodiesel con respecto al diesel convencional se tiene que:

- Tiene una escasa estabilidad hidrolítica y oxidativa, por lo que, si es almacenado por un tiempo prolongado (más de 6 meses) sus cualidades técnicas pueden ser alteradas.
- Su costo depende de la materia prima que se utilice para su elaboración.
- A bajas temperaturas puede empezar a solidificarse y formar cristales los cuales pueden obstruir los conductos del combustible.

El biodiesel puede ser utilizado en cualquier motor de diesel convencional sin necesidad de realizar modificaciones. Sin embargo los fabricantes de motores recomiendan que se empleen mezclas con diesel convencional hasta un 20% del biodiesel. En el caso que se utilice biodiesel como combustible en motores de inyección directa, se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- Cuando se utiliza biodiesel puro (B100), el aceite lubricante se contamina, debido a la menor viscosidad del biodiesel en comparación con el aceite lubricante.
- Las emisiones de óxidos de nitrógeno generalmente aumentan, como consecuencia de las mayores presiones y temperaturas que se alcanzan en cámara de combustión, pero esto se compensa por la menor generación de CO₂. (OLADE, 2008)

3. METODOLOGÍA

3.1 PEMS

Un PEMS o Sistema Portátil de Medición de Emisiones es, a grandes rasgos un laboratorio de peso ligero utilizado para medir o evaluar las emisiones de fuentes móviles. Se puede utilizar en automóviles, camiones, equipos de construcción, generadores, trenes, grúas, entre otros. Estos equipos son de gran ayuda para propósitos de legislación, regulación y toma de decisiones por lo que algunas entidades gubernamentales como la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés) han comenzado a utilizar estos sistemas para reducir los costos y el tiempo dedicado a la investigación en el rubro de las emisiones vehiculares.

Los Sistemas Portátiles de Medición de Emisiones han sido desarrollados desde 1990 para facilitar la obtención de datos experimentales de emisión de gases de escape en vehículos de combustión interna en condiciones reales de manejo, complementando los datos experimentales se obtienen en dinamómetros estáticos montados en laboratorios. (USEPA, 2008).



Imagen 3.1 Dinamómetro estático.

Una ventaja de los PEMS con respecto a los dinamómetros estáticos es que en éstos existen pérdidas de potencia debido a la fricción en sus partes móviles; además de que no se toma en cuenta el efecto de la resistencia aerodinámica del vehículo y la fricción de las llantas con el pavimento, las inclinaciones y pendientes del terreno. Todos estos factores intervienen al relacionar las revoluciones por minuto (rpm), la potencia del vehículo y las emisiones, factores que son determinantes en la creación de mapas de emisión para que posteriormente sean analizados y simulados.



Imagen 3.2 Sistema Portátil de Medición de Emisiones Axion

Las pruebas de emisión en dinamómetros han sido siempre muy costosas, han requerido retirar los vehículos de su uso común por largos periodos y los datos arrojados por dichas pruebas han demostrado que no son representativos de las condiciones de manejo real.

Actualmente la implementación de los PEMS es fundamental para realizar mediciones de emisión bajo condiciones reales de manejo en un vehículo de combustión interna. Sin embargo, esto implica la medición de algunas variables extras que deben ser medidas cuidadosamente para el desarrollo más preciso de los modelos matemáticos de emisión.

El enfoque de los PEMS para la medición de los gases de escape se basa en el establecimiento de relaciones entre los parámetros de operación del motor mediante sensores de uso común y las emisiones del escape. De tal manera

que los PEMS son algoritmos computarizados que describen las relaciones entre los parámetros de operación y la razón de emisión.

Los PEMS han sido desarrollados para medir con una frecuencia de 1Hz las concentraciones de salida de gases tales como; oxígeno (O_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), hidrocarburos (HC), material particulado (PM) y óxidos de nitrógeno (NO_x).

3.2 MEDICIÓN DE EMISIONES.

Los sistemas portátiles de medición de emisiones constan de analizadores de gases y medidores de partículas colocados en un espacio reducido. Son capaces de funcionar con energía autónoma o proveniente del vehículo a prueba. Los PEMS utilizan comúnmente dos tipos de sensores para gases y un sistema de medición de partículas.

- a) Para hidrocarburos, dióxido y monóxido de carbono se utilizan sensores del tipo infrarrojo no dispersivo (NDIR, por sus siglas en inglés), el cual es un dispositivo espectroscópico que funciona con una fuente de rayos infrarrojos, una cámara de muestra o tubo de luz, un filtro de longitud de onda y un detector de infrarrojos. El gas se difunde en la cámara de muestreo y la concentración de gas se mide con un dispositivo óptico mediante la absorción de luz con una determinada longitud de onda dentro del dispositivo receptor de infrarrojos. La luz infrarroja se dirige a través de la cámara de la muestra hacia el detector.

Paralelamente existe una cámara con un gas de referencia cerrado, por lo general de nitrógeno. El detector tiene un filtro óptico enfrente de ella que elimina toda la luz, excepto aquella con longitud de onda que las moléculas de gas seleccionado pueden absorber. (www.intl-lighttech.com).

- b) Para medir las emisiones de óxidos de nitrógeno y de oxígeno se utilizan sensores electroquímicos. Estos sensores se basan en el mismo principio que las celdas electroquímicas y por lo tanto están conformados por un cátodo, un ánodo y con conductor iónico, ya sea de iones de oxígeno o nitrógeno según sea el caso del sensor. (Jasinski, 2006)
- c) Para la medición de material particulado (PM) se utilizan sistemas de dispersión de un haz de luz; en general estos sistemas funcionan con un emisor de alguna forma de radiación (en este caso un láser) y uno o varios receptores en el otro extremo, con esto se obtienen concentraciones en mg/cm^3 .

Los PEMS funcionan en forma general con cuatro módulos en los cuales se hace desde la recolección de datos hasta su análisis y medición, dichos módulos se muestran en la figura 3.1

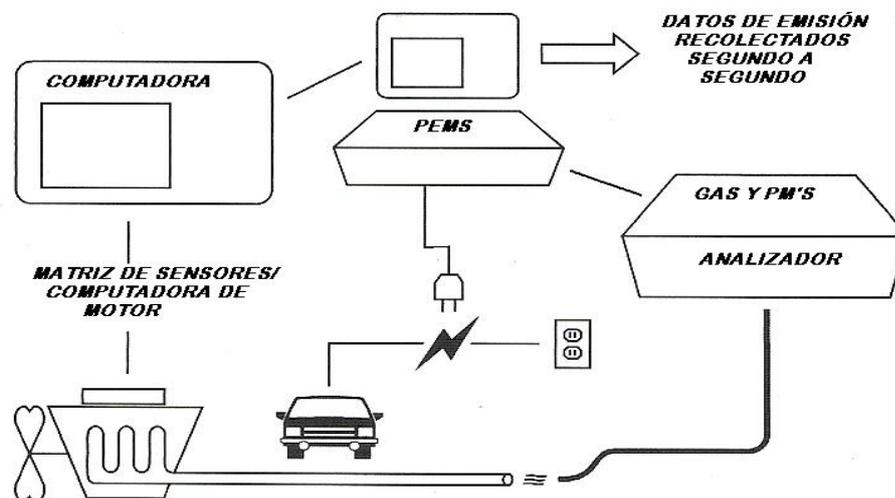


Figura 3.1 Diagrama de módulos de un PEMS para análisis y recolección de datos.

3.3 SIMULADOR VEHICULAR AVANZADO (ADVISOR)

3.3.1 INTRODUCCIÓN A ADVISOR

El Simulador Vehicular Avanzado fue originalmente desarrollado en noviembre de 1994 por el Departamento de Energía de los Estados Unidos, en el ambiente abierto programable de MATLAB/Simulink. El simulador es ideal para hacer estudios paramétricos, útiles para la investigación y desarrollo de vehículos híbridos eléctricos. Este programa fue impulsado por la Asociación Para el Desarrollo de Vehículos de Nueva Generación PNGV¹ por sus siglas en inglés. (Wipke, 1999)

A medida que ADVISOR, como herramienta de diseño y mejora, se volvió más flexible y avanzada fue posible su utilización para estudiar más a fondo las interacciones de los componentes de los vehículos híbridos con los componentes del vehículo a gasolina.

ADVISOR fue diseñado para analizar los trenes de potencia del vehículo, centrándose en el flujo de potencia en cada uno de los componentes. Cuando es utilizado para seguir un ciclo de manejo ADVISOR proporciona el consumo total de combustible y las emisiones del escape del vehículo. Además puede simular determinadas circunstancias de manejo tales como la máxima aceleración de 0-100KPh, el máximo grado de inclinación que el vehículo puede subir a una velocidad sostenida, la emisión máxima de los gases de escape a determinadas condiciones de manejo. También se pueden simular los efectos sobre las emisiones cuando se modifican los materiales con los que se fabrica el automóvil para reducir peso.

De acuerdo al diseño de ADVISOR es posible aproximar el comportamiento continuo de un vehículo como una serie de pasos discretos. Durante cada paso los componentes son considerados en estado estacionario, esto es que, en

¹ Partnership for New Generation of Vehicles

cada paso los cambios en la corriente, potencia, voltaje o revoluciones por minuto son inocuos. Esta consideración permite la utilización de mapas de eficiencia y emisión obtenidos a partir de datos de laboratorio o de campo, mediante la utilización de un PEMS.

3.3.2 ESTRUCTURA DE ADVISOR

La programación de ADVISOR se basa principalmente en la segunda ley de Newton, referente al movimiento de cuerpos sólidos e incluye las fuerzas específicas que típicamente actúan en los vehículos. Esto se enuncia en la ecuación 3.1

$$F = m_v g C_u + \frac{1}{2} \rho C_D A_{VEH} V^2 + m_v a + m_v g \text{ sen } (\theta) \quad (3.1)$$

donde:

F	Fuerza tractiva requerida en las ruedas del vehículo, N
m_v	Masa del vehículo, kg
g	Aceleración local de la gravedad, m/s^2
C_u	Coef. de resistencia al rodamiento entre las ruedas y la superficie
ρ	Densidad del aire ambiente, kg/m^3
C_D	Coef. de arrastre aerodinámico del vehículo, m/s
A_{VEH}	Área transversal frontal del vehículo, m^2
V	Magnitud de la velocidad del vehículo en la dirección de viaje, m/s
a	Aceleración del vehículo, m/s^2
θ	Ángulo de inclinación de la superficie de rodamiento

El software ADVISOR calcula la demanda de energía en las ruedas, en periodos determinados, utilizando los perfiles de velocidad obtenidos experimentalmente para posteriormente determinar la energía requerida por cada componente.

Los diagramas de bloques empleados por SIMULINK que conforman la programación de ADVISOR se pueden observar en la figura 3.2

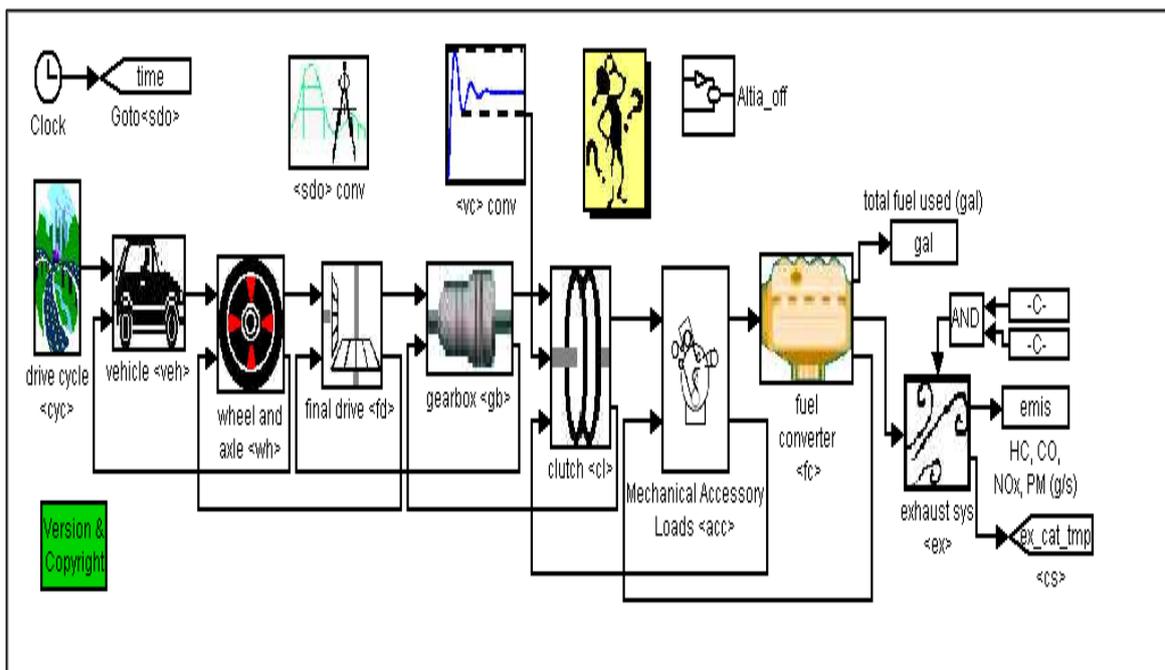


Figura 3.2 Diagrama de bloques de un arreglo de SIMULINK en ADVISOR

La figura 3.2 representa un vehículo convencional usando componentes de ADVISOR. La mayoría de los bloques tienen dos entradas y dos salidas. Por cada bloque pasa y se transforma un torque y una velocidad requerida y cada bloque ejecuta, al mismo tiempo, el torque y velocidad actual.

Los bloques muestran, mediante el uso de vectores, la transformación que sufre el torque y la velocidad requerida. El ciclo de manejo exige una velocidad de entrada y cada bloque, entre el ciclo de manejo y el torque provisto, en este caso el motor, calcula su entrada requerida dada su demanda de salida, aplicando pérdidas, multiplicadores o reductores de velocidad, además de límites de funcionamiento para cada componente. (García Fragoso, 2008)

A continuación se muestra un diagrama de flujo para describir la secuencia de los bloques más importantes de la simulación de un vehículo convencional, la descripción de cada bloque se hará más adelante.

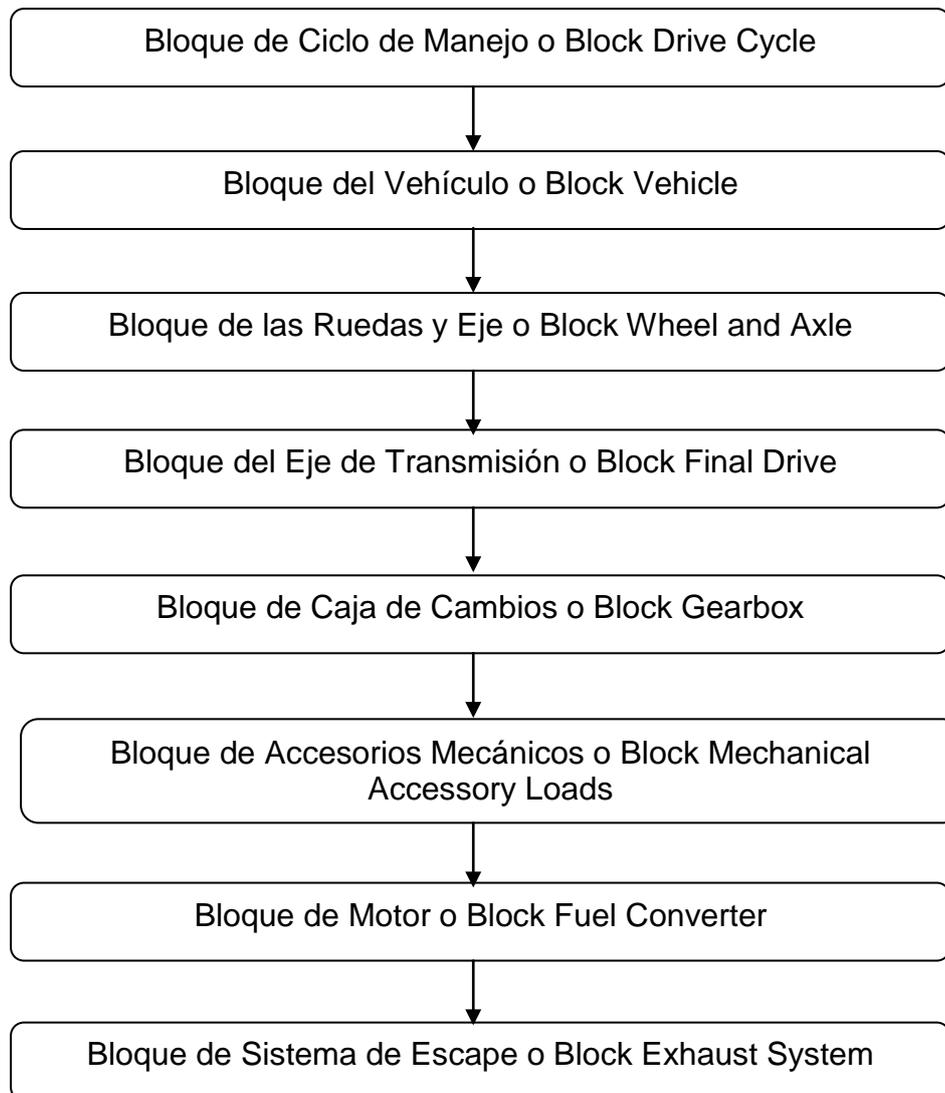


Figura 3.3 Diagrama de flujo de la simulación de un vehículo convencional en ADVISOR

El bloque de ciclo de manejo calcula las velocidades y aceleraciones promedio del vehículo durante un periodo determinado, tomando en cuenta la velocidad requerida en el ciclo de manejo y la velocidad en el paso anterior.

El bloque del vehículo calcula la fuerza tractiva neta con la ecuación 3.1. Esta fuerza toma en cuenta las características físicas del vehículo (peso, tamaño de ruedas, resistencia aerodinámica, etc.) y el perfil de velocidad requerido.

El bloque de las ruedas calcula la velocidad y el torque, tomando en cuenta el radio de las llantas y la transmisión de torque permisible a la superficie de rodamiento.

El bloque de la transmisión calcula el torque y la velocidad, tomando en cuenta las pérdidas de potencia y la relación en la caja de cambios.

El bloque de la caja de cambios, calcula la velocidad y el torque en la caja tomando en cuenta las pérdidas y la relación de transmisión actual, la velocidad en la caja de cambios se calcula en el bloque de control estratégico.

El bloque de accesorios mecánicos incluye cualquier tipo de accesorio que se agregue antes de calcular los requerimientos finales de potencia al motor.

El bloque de motor de combustión interna (fuel converter) calcula la velocidad y torque en el motor tomando en cuenta las condiciones de operación (en particular el torque máximo alcanzable) , mediante el uso de mapas de Torque-RPM-Emisión. La creación de estos mapas fue posible gracias a las horas de programación realizados en MATLAB para proyectos anteriores del Centro de Ciencias de la Atmósfera.

El bloque del sistema de escape calcula el flujo y concentración de gases emitidos a la atmósfera, tomando en cuenta el convertidor catalítico y sus condiciones de operación, en particular la temperatura.

3.3.3 MAPAS TORQUE-RPM-EMISIÓN (T-R-E)

Para la obtención de las emisiones de CO₂, CO, NO_x y HC generados por los vehículos de combustión interna, el simulador ADVISOR utiliza mapas que relacionan las emisiones con el torque y la velocidad requeridos por el motor. Estos mapas (TRE) se obtienen mediante la interpolación lineal de los datos obtenidos en las mediciones de campo con un PEMS o en laboratorio usando un dinamómetro.

Para fines de este trabajo, las emisiones experimentales fueron obtenidas mediante el uso de un PEMS de la marca Clean Air Technologies modelo Axion. Este equipo nos proporcionó además las RPM y los perfiles de velocidad del vehículo.

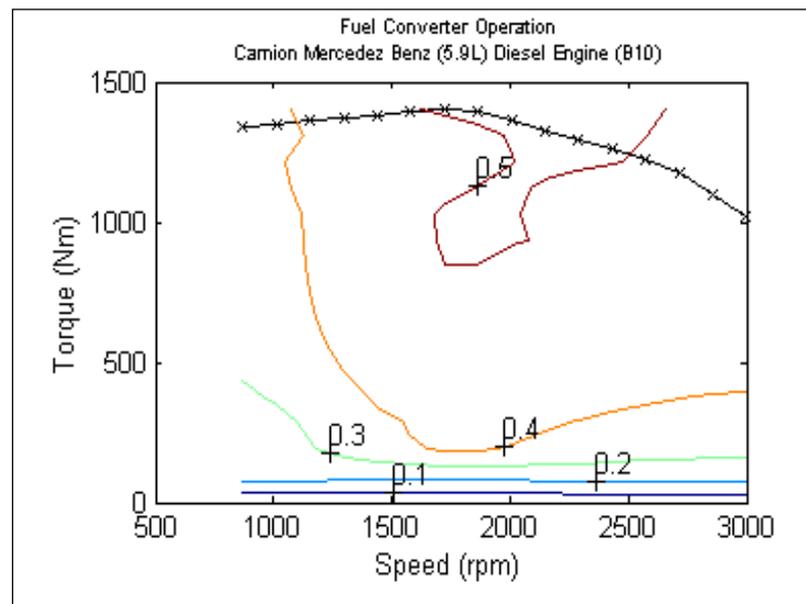


Figura 3.4 Mapa TRE para un camión Mercedes Benz con motor de 5.9L

La figura 3.4 muestra un mapa T-R-E de la operación de un motor Mercedes Benz de 5.9L alimentado con diesel B10 (10% biodiesel, 90% diesel convencional), los mapas muestran la velocidad del motor en revoluciones por minuto (RPM) y el torque en Newton-metro. Éste último se obtiene mediante la ecuación 3.1.

Para crear estos mapas fue necesario diseñar un recorrido que incluyera perfiles de velocidad en donde se contemplen altas y bajas velocidades, paros, arranques, aceleraciones y desaceleraciones e inclinaciones.

3.4 CAMPAÑAS DE MEDICIÓN

Para obtener emisiones e información experimental se utilizó un sistema portátil de medición de emisiones (PEMS) modelo Axion, marca Clean Air. Se realizaron pruebas dentro del circuito de Ciudad Universitaria del 9 de febrero al 5 de marzo 2010, - para examinar la actividad e influencia en las emisiones de los combustibles; B10, B20, diesel UBA y el diesel convencional utilizado en la Ciudad de México-. Posteriormente se realizaron las simulaciones de los recorridos con cada combustible utilizado.

El vehículo para realizar las pruebas fue un camión repartidor proporcionado por Coca-Cola. El camión de la marca Mercedes Benz fue un 1619 del año 1995 con motor diesel OM366LA de 5.9 Litros.



Imagen 3.3 Camión utilizado en las campañas de medición

Todos los programas para el análisis previo de los datos, hasta su simulación, se realizaron en MATLAB y su derecho de autor está en trámite.

Las campañas de medición se realizaron entre el 9 de febrero y el 5 de marzo de 2010, constaron de recorridos idénticos de 7.8 km dentro del circuito de Ciudad Universitaria. Los recorridos fueron cuidadosamente seleccionados en función de las condiciones del terreno ya que debían incluir aceleraciones, desaceleraciones, paros, arranques, pendientes pronunciadas y también pendientes mínimas, para recrear las condiciones reales de manejo en la Ciudad de México.



Imagen 3.4 Recorridos dentro del campus de Ciudad Universitaria. Google Earth 2010

El camión utilizado se cargó con producto de Coca-Cola hasta un 79% de su capacidad para igualar las condiciones en las que generalmente operan estos camiones dentro de su uso diario. Además la empresa Coca-Cola nos proporcionó un conductor para que realizara los recorridos. Al usar un solo

conductor, el manejo es un poco más homogéneo y así las mediciones de cada combustible, en cada recorrido, son más representativos.

Para la medición de emisiones se instaló el equipo Axion dentro de la cabina del conductor, cabe señalar que este equipo cuenta con equipos de medición que se instalan de manera no invasiva.

Los datos del camión se muestran en la tabla 3.1

Marca	Mercedes-Benz
Año	1995
Modelo	1619
Modelo Motor	OM366LA
Desplazamiento	5.9L
Turbo cargado	SI
Configuración	6 Cilindros en Línea
Transmisión	5 Velocidades, Manual
HP @ RPM	190
Peso	10 Toneladas
Peso con Carga	19 Toneladas

Tabla 3.1 Datos del manual del propietario del camión Mercedes Benz utilizado en la prueba.

El equipo Axion cuenta con dos sondas para coleccionar los gases de escape, se colocan a la salida del escape del vehículo. Una de éstas lleva los gases a los sensores de hidrocarburos y de gases criterio (CO_2 , CO , NO_x), la segunda sonda lleva los gases al sensor de PM_{10} .

Los sensores se colocaron de la siguiente forma:

- Temperatura: Se colocó en la tubería de entrada del aire, después de pasar por el turbocargador, a 30cm a la entrada de la cámara de combustión.
- Presión: Se colocó en la tubería de entrada de aire, después de pasar por el turbocargador, a 40cm de la entrada a la cámara de combustión, aproximadamente.
- RPM: Éste se midió por medio de un refractómetro; como se muestra en la imagen se colocaba una cinta reflectora en la banda del motor.

Los sensores de RPM y temperatura se conectan a un transductor el cual convierte la información en datos para ser ingresado a la computadora del equipo Axion.

Para realizar las pruebas se hizo una adaptación en los conductos que llevan el combustible no usado de la cámara de combustión al tanque, con la finalidad de no contaminar el tanque de combustible o alterar las concentraciones de la mezcla. Además esto hizo más fácil la sustitución de cada combustible.

El tanque se desconectó y las líneas de combustible se reubicaron en los contenedores que suministraban los diferentes combustibles utilizados, B10, B20, diesel UBA y diesel convencional.



Imagen 3.5 Sistema utilizado para la sustitución del tanque de combustible

El combustible de las pruebas fue entregado en contenedores de plástico de 50 litros; el combustible venía preparado con las concentraciones de B10 y B20 para que fuesen inyectados al motor.

Los combustibles utilizados tienen las siguientes características:

	Composición			Densidad [g/L]	Capacidad Calorífica [kJ/kg]
	C [%masa]	H [%masa]	O [%masa]		
diesel convencional	86.4	13.6	0.0	845	44,730
diesel UBA	86.4	13.6	0.0	845	44,730
B10	85.4	13.4	1.2	849	44,230
B20	84.4	13.3	2.3	852	43,700

Tabla 3.2 Composición de las mezclas de combustible utilizado en las pruebas de campo

Para obtener datos de inclinación y pendientes se utilizó un inclinómetro de la marca Honeywell modelo HMR3000, el cual se colocó en una de las ventanillas del camión, mediante una adaptación realizada por personal del Centro de Ciencias de la Atmósfera.



Imagen 3.6 adaptación realizada al inclinómetro para realizar mediciones.

3.5 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS

3.5.1 EQUIPO AXION

El equipo AXION permite medir O_2 , HC, CO, CO_2 , NO_x y PM_{10} , fue adquirido por la UNAM por medio del Centro de Ciencias de la Atmósfera.

Axion puede ser utilizado, según el fabricante, en vehículos ligeros y pesados, que tengan o no un sistema electrónico del control de combustión y emisiones. Por lo cual puede ser usado casi en cualquier vehículo propulsado por diesel, biodiesel, gas natural o gas LP, así como cualquier tipo de gasolina.

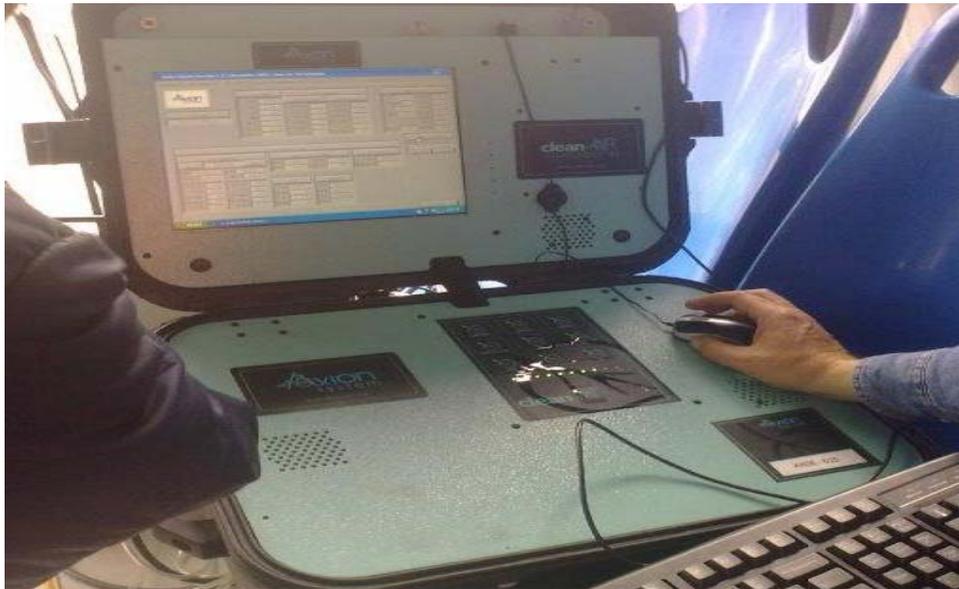


Imagen 3.7 Equipo Axion utilizado en las campañas de medición

Las técnicas usadas por Axion para realizar mediciones son:

- a) HC, CO, CO₂ usando infrarrojo no dispersivo (NDIR).
- b) Para medir NO se utiliza una celda electroquímica. En la mayoría de los vehículos, NO_x se puede deducir de NO. En los motores diesel con trampas CRT, NO, CO₂, NO_x puede ser inferida por la medida simultánea de NO antes y después de la trampa.
- c) PM₁₀ se mide mediante la dispersión de un haz de luz.

La medición del flujo de salida del escape se determina de forma indirecta mediante parámetros del motor; se puede conocer el motor y las propiedades de los combustibles, además de las concentraciones de gases de escape. Parámetros de la operación del motor son adquiridos a través del puerto disponible de la unidad de control de diagnóstico o por un conjunto de sensores conectados al motor.

El equipo está diseñado para medir las emisiones durante la utilización del vehículo en su funcionamiento diario. Es intrínsecamente seguro y se ha utilizado en escuelas, automóviles y en autobuses de pasajeros durante su funcionamiento regular con pasajeros a bordo. El equipo reporta los resultados con un porcentaje de error similar a los de un dinamómetro estático, por lo que es un equipo muy confiable.

Axion normalmente no requiere ninguna modificación en el vehículo. Las únicas excepciones son la inserción de un sensor de presión en un vacío existente o la presión de sobrealimentación del turbocompresor de línea o de los accesorios. Es alimentado mediante la corriente del vehículo, necesita 12V de corriente directa (DC) del sistema eléctrico, la cual puede ser tomada del encendedor de cigarrillos o directamente de la batería. El consumo de energía es de 5-8 amperios a 13,8 V DC. 24V DC y 240 o 110 VAC, el equipo cuenta con los convertidores de corriente que se necesiten.

El equipo se puede calibrar usando una muestra obtenida localmente (smog), el gas de calibración es una mezcla de propano, CO, CO₂ y NO. Los datos de laboratorio con varios vehículos y combustibles muestran que cuando Axion se utiliza simultáneamente el sistema de laboratorio, la diferencia, en masa acumulada, suele ser inferior a 10% para los NO_x y CO₂. La precisión de las mediciones de CO y HC depende del combustible utilizado y de los niveles de emisión. La exactitud de la medición de PM no se ha cuantificado aún. Los datos de la EPA en el Laboratorio de Ann Arbor, Michigan, también muestra que la diferencia entre el sistema de transporte y dos sistemas de laboratorio (modelo y muestras con bolsas) es similar a las diferencias entre los dos sistemas de laboratorio.

Todos los parámetros se graban en una base de datos con frecuencia de 1 Hz, las mediciones que se registran son las siguientes:

- Velocidad
- Revoluciones por minuto del motor
- Presión de entrada de aire (turbo o MAP)
- Posición del acelerador
- Carga del motor
- Temperatura del aire de admisión
- Las concentraciones de los contaminantes medidos
- El flujo de escape
- La relación aire-combustible
- El consumo de combustible
- La masa de los contaminantes medidos.

Toda la información se guarda en archivos de texto, después pueden ser exportados a diferentes programas para su evaluación, el usuario puede definir el comienzo y el final de los segmentos de diferentes análisis, así como para ingresar banderas definidas por el usuario (es decir, encontrar una condición de tráfico determinado). El tiempo total, distancia, consumo de combustible y las emisiones se calculan para cada segmento de prueba definido.

El sistema cuenta con un sistema GPS (Global Positioning System), de la marca Garmin, los datos se registran y pueden determinar la velocidad, así como la posición del vehículo.

3.5.2 INCLINÓMETRO HMR3000

El HMR3000 es un dispositivo digital que proporciona el grado de inclinación, oscilación y rotación. Estas mediciones son importantes para obtener una navegación más precisa.



Imagen 3.8 Inclinómetro HMR3000 de Honeywell

Para estas mediciones el HMR3000 cuenta con tres sensores magnéticos, que se orientan en direcciones ortogonales, además de un sensor líquido para medir la inclinación. El conjunto de estos sensores se utiliza para medir los componentes vectoriales del campo magnético de la Tierra y una referencia gravitacional.

La recolección de datos se hace mediante un sensor que transforma las señales magnéticas en señales eléctricas; esta señal posteriormente es digitalizada en un microcontrolador para que finalmente sea recibida en un computador que despliega segundo a segundo los vectores correspondientes a la rotación, oscilación e inclinación del dispositivo. (Honeywell International, 2006).

3.6 CREACIÓN DE LOS MAPAS T-R-E

Para la elaboración de los mapas de Torque-Emisión-RRM es necesario contar con información de los perfiles de velocidad y RPM, obtenidos a partir de mediciones de campo con un equipo PEMS. Los datos se registran en hojas de Excel. Los datos necesarios para realizar los mapas son los siguientes:

- Tiempo transcurrido desde el inicio de la prueba, en segundos
- Revoluciones por minuto
- Velocidad del vehículo, en km/h
- Latitud (del GPS)
- Longitud (del GPS)
- Pendiente experimental, en porcentaje de inclinación
- Emisiones de CO₂ en g/s
- Emisiones de CO en mg/s
- Emisiones de HC en mg/s
- Emisiones de NO en mg/s
- Emisiones de O₂ en g/s
- Emisiones de PM en g/s

Los pasos de la programación en MATLAB se realizan en archivos “.m” en los cuales se graban las rutinas a seguir por MATLAB. Para la creación de los mapas se necesitan dos archivos “.m”.

En el primer archivo “.m” se recolecta la información desde las hojas de Excel, se cambian las unidades de las emisiones (CO, HC, NO) de miligramos a gramos, se obtiene el torque con la ecuación 3.1 con datos de RPM, velocidad y características de un vehículo existente en la base de datos de ADVISOR. Estos nuevos datos se guardan en forma de vectores en archivos “.mat”, los cuales son archivos que contienen matrices o vectores para su posterior utilización en MATLAB.

En el segundo archivo “.m” se leen las matrices y vectores creados en la rutina anterior para elaborar las gráficas en 3D.

Las gráficas contienen en el eje de las ordenadas, la información del Torque en Newton-metro. En el eje de las abscisas la información de la Velocidad del motor en radianes por segundo y en el eje de las alturas corresponde la emisión en gramos por segundo. Estos mapas se crean a partir de los datos existentes (ver figuras 3.5 y 3.6).

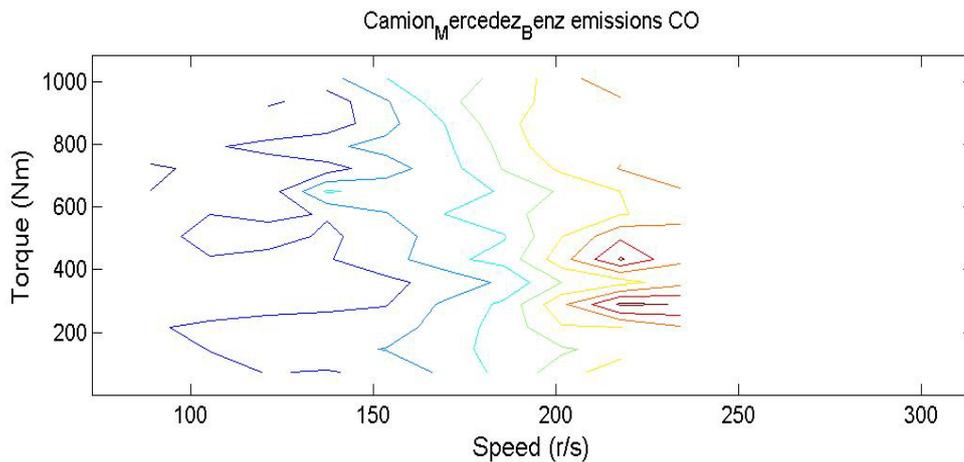


Figura 3.5 Mapa de torque y velocidad correspondientes a las mediciones de CO.

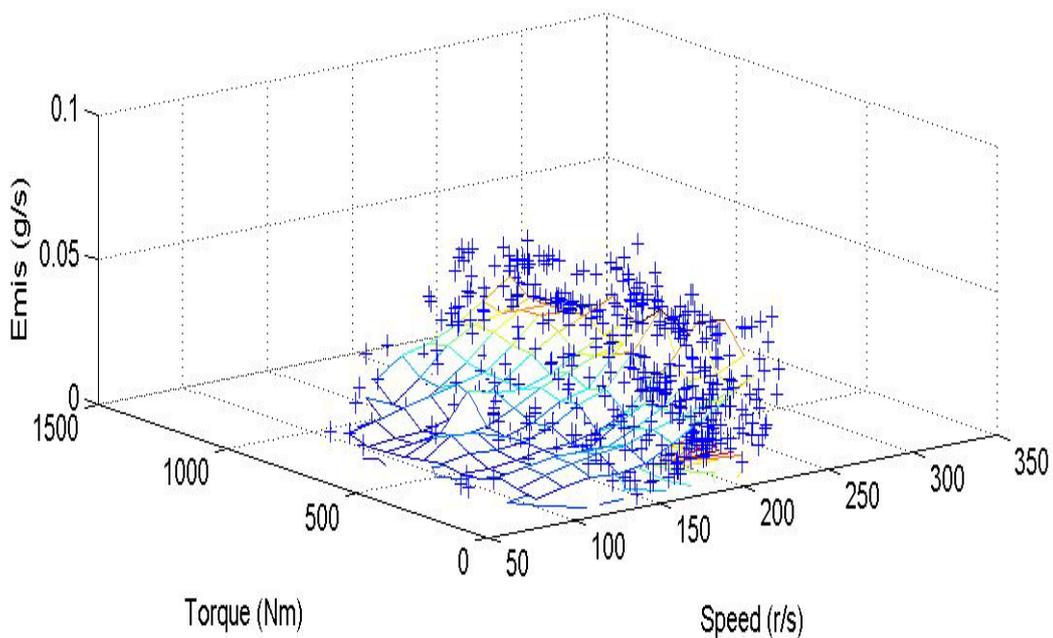


Figura 3.6 Mapa completo de T-R-E con los datos experimentales

Para efectos de una simulación es necesario extender los mapas hacia los valores ubicados en los extremos de cada eje, para esto las rutinas interpolan linealmente los valores intermedios. Para las interpolaciones en las esquinas es necesario colocar manualmente valores en el extremo de cada eje para que se interpole entre los valores experimentales y los supuestos, de esta manera se obtiene un plano (ver figuras 3.7 y 3.8) de datos, con los que ADVISOR realizará la simulación correspondiente.

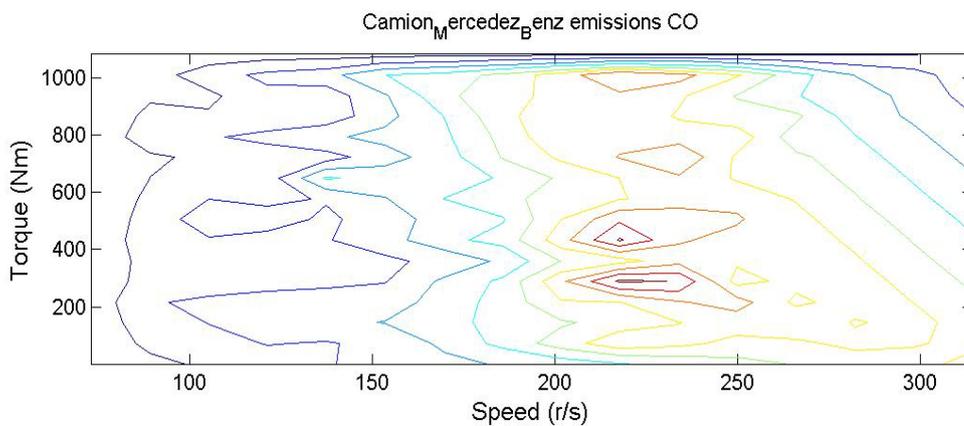


Figura 3.7 Datos interpolados en conjunto con los datos experimentales de torque y velocidad correspondientes a las mediciones de CO.

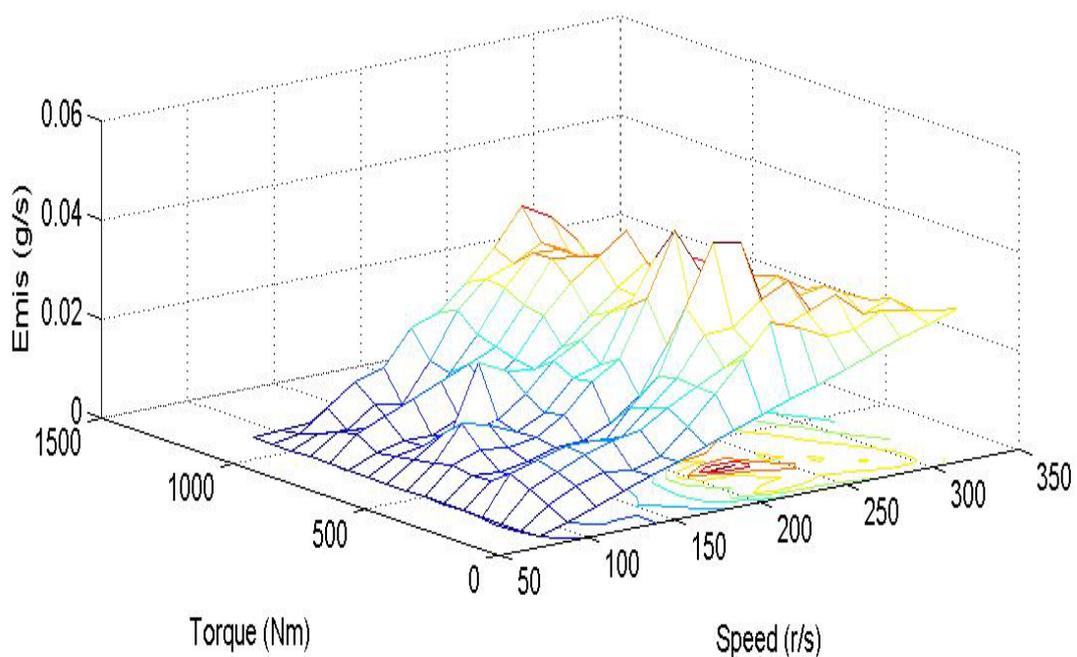


Figura 3.8 Mapa completo T-R-E con datos interpolados y experimentales de las mediciones de CO

A continuación se representa en metalenguaje el procedimiento que realizan las rutinas de MATLAB para crear los mapas en 3D.

El primer archivo “.m” que se utilizó lleva el nombre “Obtaining torque and speed in fuel converter” y aquí se realiza lo siguiente.

Entrada:

- Leer “Key for vehicles.exe”
- Leer “data -nombre del vehiculo- .exe”
- Leer RPM
- Leer emisiones en g/s (CO₂)
- Leer misiones en mg/s (HC, NO, CO)
- Leer tiempo en s
- Leer velocidad del vehículo en km/h
- Leer pendiente experimental
- Leer “Prev_sim -nombre del vehiculo- .mat”

Cálculos:

- Se suprimen los valores negativos y los menores que cero (Emisiones, tiempo, RPM y velocidad del vehículo).
- Se cambian las unidades de velocidad, emisiones (HC, NO y CO) y RPM, de km/h a m/s, mg/s a g/s y RPM a radianes por segundo. Respectivamente.
- Mediante la ecuación 3.1 se calcula el torque en N*m

Salida:

- Se guardan los vectores y matrices que contienen los datos de emisión, RPM, torque, tiempo y pendiente experimental
- Los vectores y matrices se guardan en “info_used_for_maps - nombre del vehículo- .mat”

El segundo archivo “.m” que se utilizó lleva el nombre “Defining corners.m” y aquí se realiza lo siguiente.

Entrada:

- Leer “Key for vehicles.exe”
- Leer “info_used_for_maps -nombre del vehículo- .mat”

Cálculos:

- Interpolar los datos para crear las matrices y el mapa en 3D para su utilización en ADVISOR.
- En la línea 12 de la rutina “Defining corners.m” colocar los números que indican que mapa se va a crear; CO es el número 2, el número 3 para NO, el número 4 para HC, el número 5 para CO₂. Al colocar el número 6 se crean todos los mapas y se guardan los valores insertados en las esquinas.
- Iterar el procedimiento realizado en “Key for vehicles.exe”. Los valores que más se ajusten a los datos experimentales en las cuatro esquinas del mapa para cada emisión se colocan en las celdas en que van desde P3 hasta AI3.

Salida:

- Si los valores de las esquinas ya se han ajustado y coinciden con los datos experimentales se procede a guardar las matrices como un archivo .mat
- Esas matrices se tienen que guardar manualmente en el directorio de archivos de ADVISOR específicamente en el archivo “FC - nombre del vehículo- . emis”
- “Defining corners.m” guarda automáticamente una referencia a esas matrices como “grids emis matrix for FC -nombre del vehículo- emis”.

Por último y para visualizar los resultados de las simulaciones, hay una rutina que los compara contra los datos experimentales. Esta rutina es muy útil, ya que ésta sirve de apoyo para saber si hay que realizar más iteraciones en las

esquinas o en algún procedimiento para que las simulaciones sean más precisas.

El archivo que realiza las comparaciones lleva el nombre "Creating maps in advisor.m" y aquí se hace lo siguiente.

Entrada:

- Leer "Key for vehicles.exe"
- Leer "Prev sim –nombre del vehículo-.mat"
- Leer "grids emis matrix for FC -nombre del vehículo- .emis"

Cálculos:

- Se hace la comparación segundo a segundo de los datos experimentales y los datos obtenidos en la simulación para cada gas y se muestra un porcentaje de error de las simulaciones.

Salida:

- "Creating maps in advisor.m" muestra como salida 11 gráficas que contienen información acerca de los datos experimentales y los datos simulados. Además hace las gráficas con las que se pueden presentar y analizar los resultados de las simulaciones.

3.7 SIMULACIONES EN ADVISOR.

Para realizar una simulación en ADVISOR es necesario completar 3 etapas, en las cuales se realiza lo siguiente:

Etapa 1, identificación del vehículo.

Aquí se seleccionan los diferentes componentes del vehículo que se va a simular, estos valores también se pueden modificar desde los archivos que se encuentran en la base de datos de ADVISOR para crear un nuevo automóvil. La forma más sencilla de crear un automóvil, es precisamente, utilizar uno de estos archivos como una plantilla desde la cual se pueden introducir nuevos diseños.

Desde el menú principal pueden ser seleccionadas diversas configuraciones, incluyendo vehículos híbridos, eléctricos, y convencionales entre los que se pueden simular vehículos a gasolina o diesel.

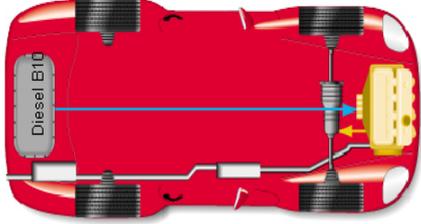
En este menú se ingresan ciertas características del vehículo tales como, tipo de motor, potencia, transmisión, neumáticos, controles y accesorios, además de la característica más importante, el Fuel Converter, que es el archivo en el que se incluyen los mapas T-R-E para simular algún vehículo en particular.

Los datos de transmisión, potencia, neumáticos, controles de tren de potencia y accesorios, se obtienen mediante datos proporcionados por el fabricante del vehículo, o del manual del vehículo. Los datos del Fuel Converter se obtienen de los mapas T-R-E, creados a partir de los datos de emisión de gases criterio obtenidos en las campañas de medición.

Vehicle Input--ADVISOR 2002

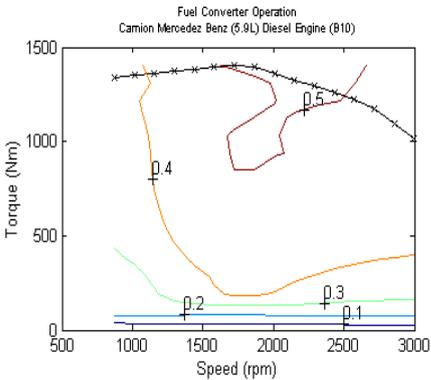
File Edit Units Help

Vehicle Input



Component Plot Selection
fuel_converter fc_efficiency

Fuel Converter Operation
Camion Mercedes Benz (5.9L) Diesel Engine (B10)



Load File: Camion_Mercedes_Benz_in

Drivetrain Config: conventional

Auto-Size

			Scale Components		
	version	type	max pwr (kW)	peak eff	mass (kg)
<input checked="" type="checkbox"/>	Vehicle	?			5806
<input checked="" type="checkbox"/>	Fuel Converter	ic	334	0.52	1186
<input checked="" type="checkbox"/>	Exhaust Aftertreat	?			87
<input type="checkbox"/>	Energy Storage	?			
<input type="checkbox"/>	Energy Storage 2	?			
<input type="checkbox"/>	Motor	?			
<input type="checkbox"/>	Motor 2	?			
<input type="checkbox"/>	Starter	?			
<input type="checkbox"/>	Generator	?			
<input checked="" type="checkbox"/>	Transmission	man	0.92		333
<input type="checkbox"/>	Transmission 2	?			
<input type="checkbox"/>	Clutch/Torq. Conv.	?			
<input type="checkbox"/>	Torque Coupling	?			
<input checked="" type="checkbox"/>	Wheel/Axle	Crr			0
<input checked="" type="checkbox"/>	Accessory	Const			
<input type="checkbox"/>	Acc Electrical	?			
<input checked="" type="checkbox"/>	Powertrain Control	conv			

#of mod V nom

Cargo Mass: 9072

Calculated Mass: 16484

override mass: 1

View Block Diagram: BD_CONV

Variable List:

Component: fuel_converter Edit Var.

Variables: fc_acc_mass 205.5074

Save Help
Back Continue

Figura 3.9 Identificación del automóvil

Etapa 2. Definición del recorrido

En esta etapa se selecciona un ciclo de manejo específico. Este consiste de una gráfica de velocidad contra tiempo, en el cual se incluye también la inclinación y pendiente de la carretera. ADVISOR también cuenta con una base de datos de diversos ciclos con inclinaciones y pendientes distintas, aceleraciones o desaceleraciones fuertes, además las veces que el ciclo deba ser repetido y las condiciones iniciales, como temperatura del motor, del ambiente y del convertidor catalítico también pueden ser modificadas desde este menú.

Los ciclos se crean a partir de los datos obtenidos en las campañas de medición por el inclinómetro HMR3000, en conjunto con los datos del GPS de posición y velocidad del vehículo,

La figura 3.10 muestra la definición del recorrido en la etapa 2 de la programación en ADVISOR.



Figura 3.10 Definición del recorrido

Etapa 3. Entrega de resultados.

ADVISOR entrega los resultados en forma de vectores, los cuales son fácilmente interpretados por algún software que maneje el lenguaje vectorial como MATLAB o Excel.

El software utiliza los mapas T-R-E para que, mediante un ciclo de manejo específico, se obtenga un torque y una emisión a una determinada velocidad, de esta forma se puede cambiar el ciclo de manejo y se obtiene un perfil de emisiones bajo estas nuevas condiciones de manejo. La figura 3.11 muestra la entrega de resultados en la etapa 3 de la simulación.

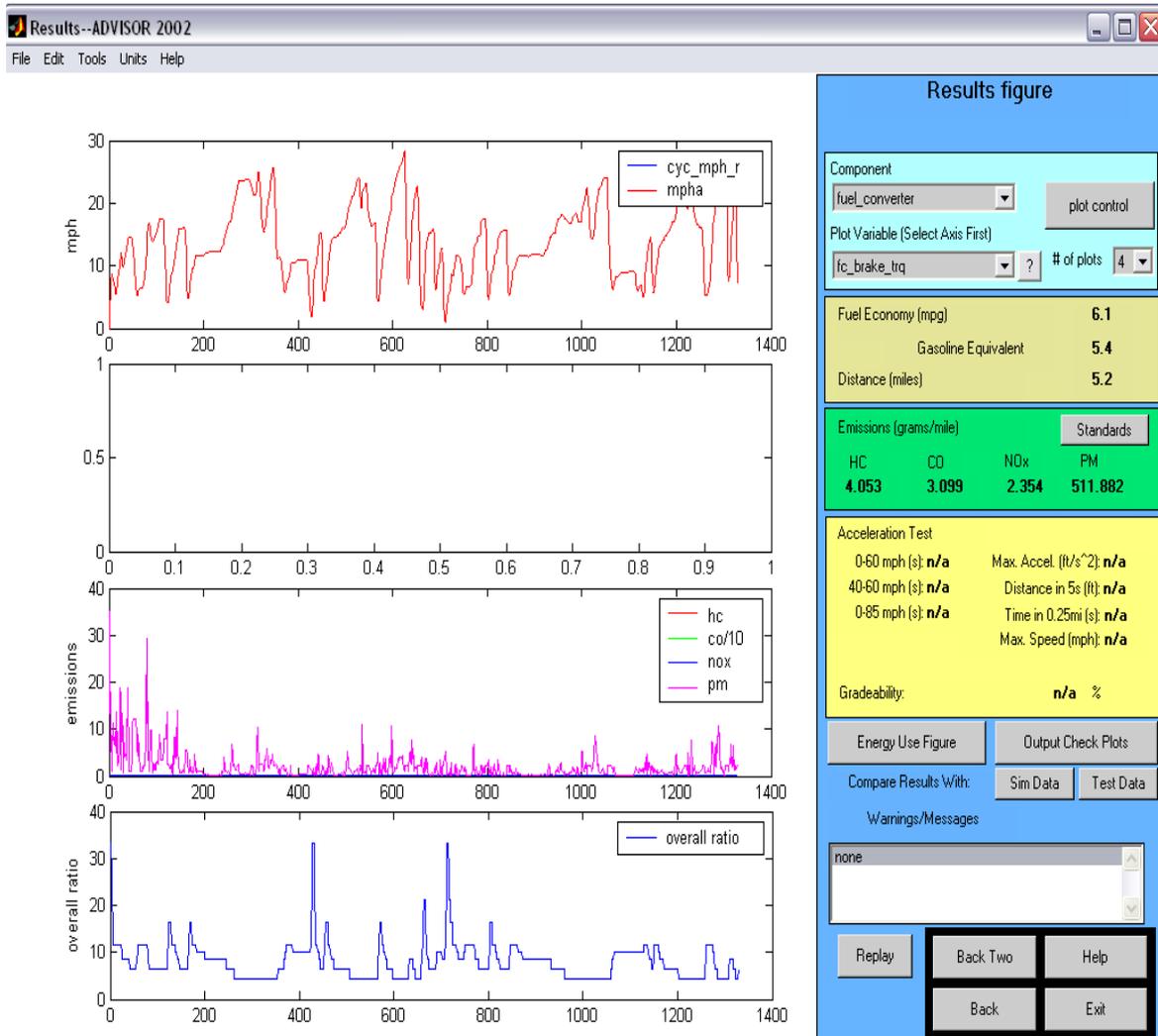


Figura 3.11 Entrega de resultados en ADVISOR.

4. RESULTADOS

4.1 ANÁLISIS DESPUÉS DE ADVISOR

Una vez que se ha realizado la simulación en ADVISOR se procede al análisis y comprobación de resultados. Esto se realiza con una rutina creada en MATLAB, la cual compara las emisiones experimentales con las simuladas segundo a segundo. Los datos de emisiones simuladas se comparan con las mediciones bajo las mismas condiciones y ciclos de manejo con la finalidad de evaluar la calidad de las simulaciones realizadas. El porcentaje de error que se mostrará en las siguientes figuras se calcula con la ecuación 4.1.

$$Error (\%) = \left(\frac{Emisión\ simulada - Emisión\ experimental}{Emisión\ experimental} \right) \cdot 100 \quad (4.1)$$

Las figuras 4.1 a 4.16 muestran cuatro gráficas por cada figura. La primera corresponde a la emisión (gramos por segundo) contra el tiempo (segundos) de duración de la prueba. La segunda gráfica corresponde a la velocidad del motor del vehículo (radianes por segundo) obtenidos experimentalmente y en la simulación, se adjunta también el torque (Newton-metro) obtenido en la simulación. La tercera gráfica muestra la velocidad del motor (rad/s) después de colocar todas las características (tamaño de ruedas, transmisión, etc.) que requiere el simulador.

Por último, la cuarta gráfica muestra el porcentaje de error acumulado que se tiene entre las emisiones obtenidas experimentalmente y las emisiones simuladas. Este procedimiento se realiza para cada gas en estudio. Se muestran los resultados en el siguiente orden:

- CO₂,
- NO_x,
- HC
- CO

Las emisiones se ordenan por prueba, primero la de diesel 500, después la de biodiesel B10, biodiesel B20 y por último los resultados de diesel UBA.

4.2 RESULTADOS DIESEL 500 PPM.

A continuación se presentan las gráficas que corresponden a la comparación de resultados experimentales y simulados del diesel 500. Los parámetros más importantes para la revisión de los resultados en estas figuras son las emisiones y el porcentaje de error, ya que en el seguimiento de la velocidad de giro del motor no presentó ningún problema y en la totalidad de las simulaciones la diferencia entre la experimentación y la simulación fue mínima.

Como se puede ver en la figura 4.1 las emisiones de CO₂ simuladas (verde) siguen la tendencia de los datos experimentales (azul) y la diferencia entre ambas no varía más de 5% a lo largo del recorrido. Al final la diferencia en las emisiones promediadas totales fue de un 0.5%.

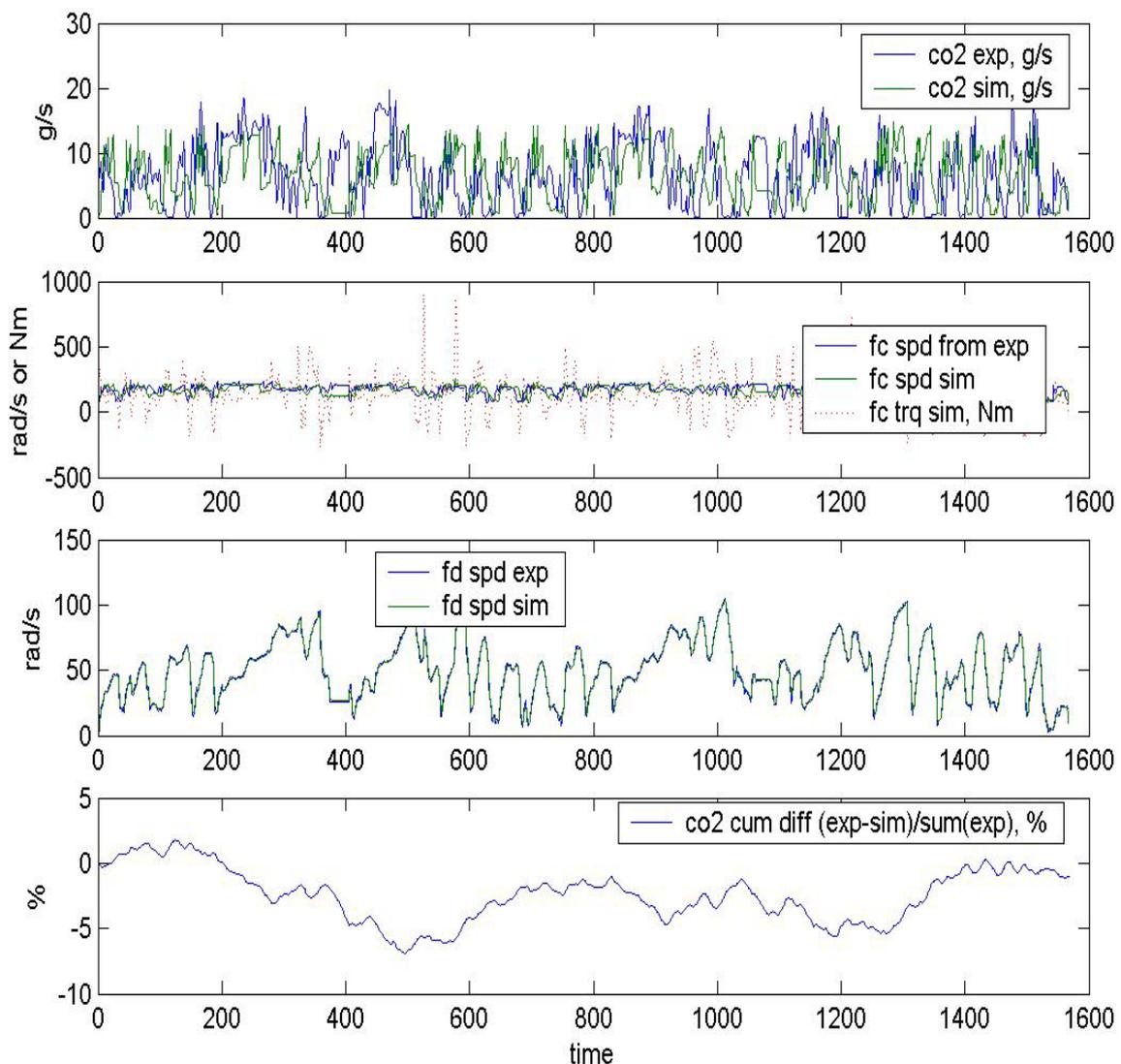


Figura 4.1 Resultados de la simulación de CO₂ para el caso de diesel 500.

La figura 4.2 muestra los resultados de las emisiones de NO, en este caso el error a lo largo del recorrido varía no más de 8% y al final las emisiones promediadas totales difieren en un 5%.

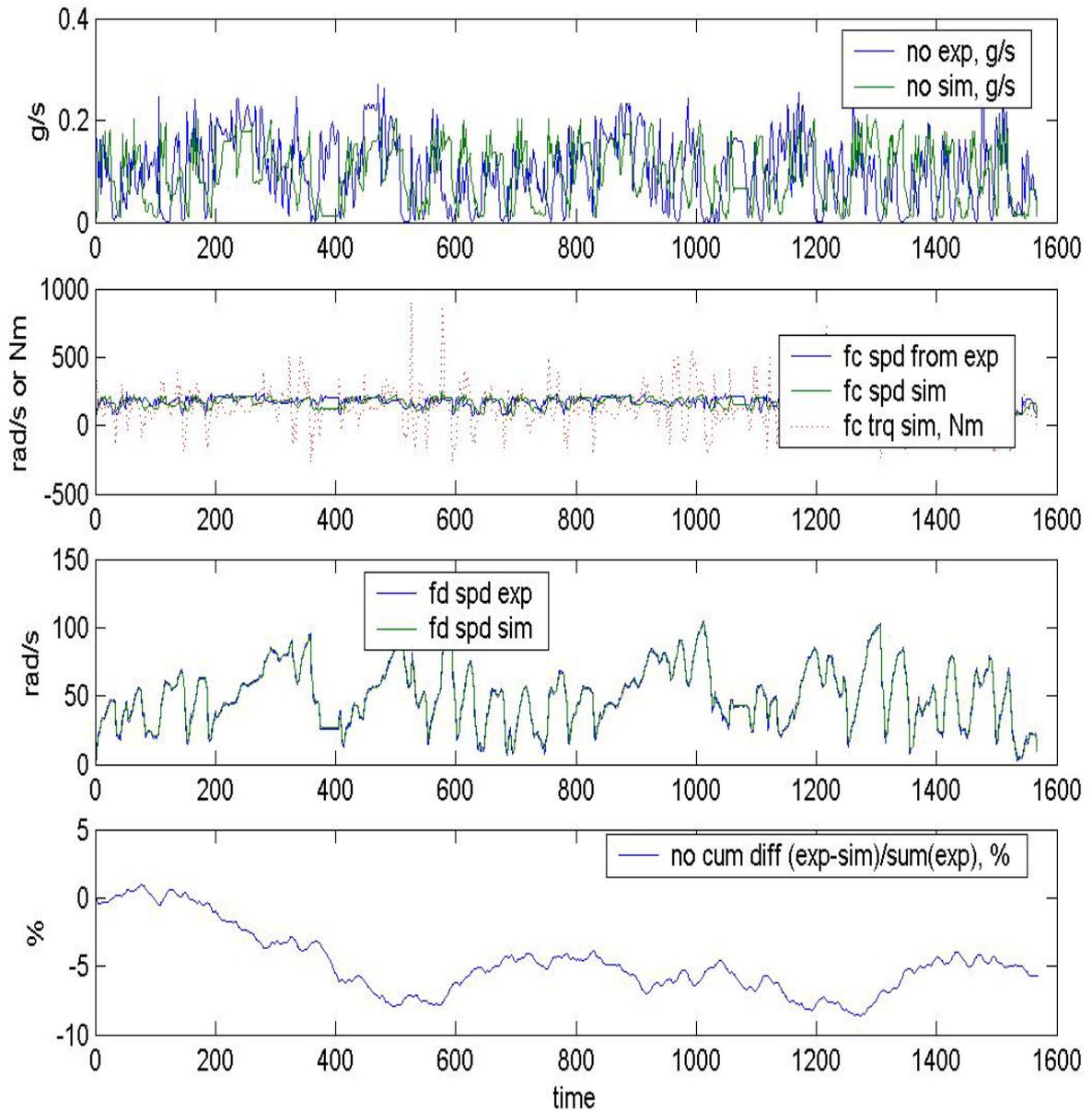


Figura 4.2 Resultados de la simulación de NO para el caso diesel 500

En las figuras siguientes (4.3 y 4.4) se observa que las emisiones simuladas presentan una buena precisión ya que en el caso de la figura 4.3 que corresponde a las emisiones de HC el error no varía más de 5% a lo largo del recorrido y al final las emisiones promediadas totales sólo difieren en un 1% con respecto a las experimentales.

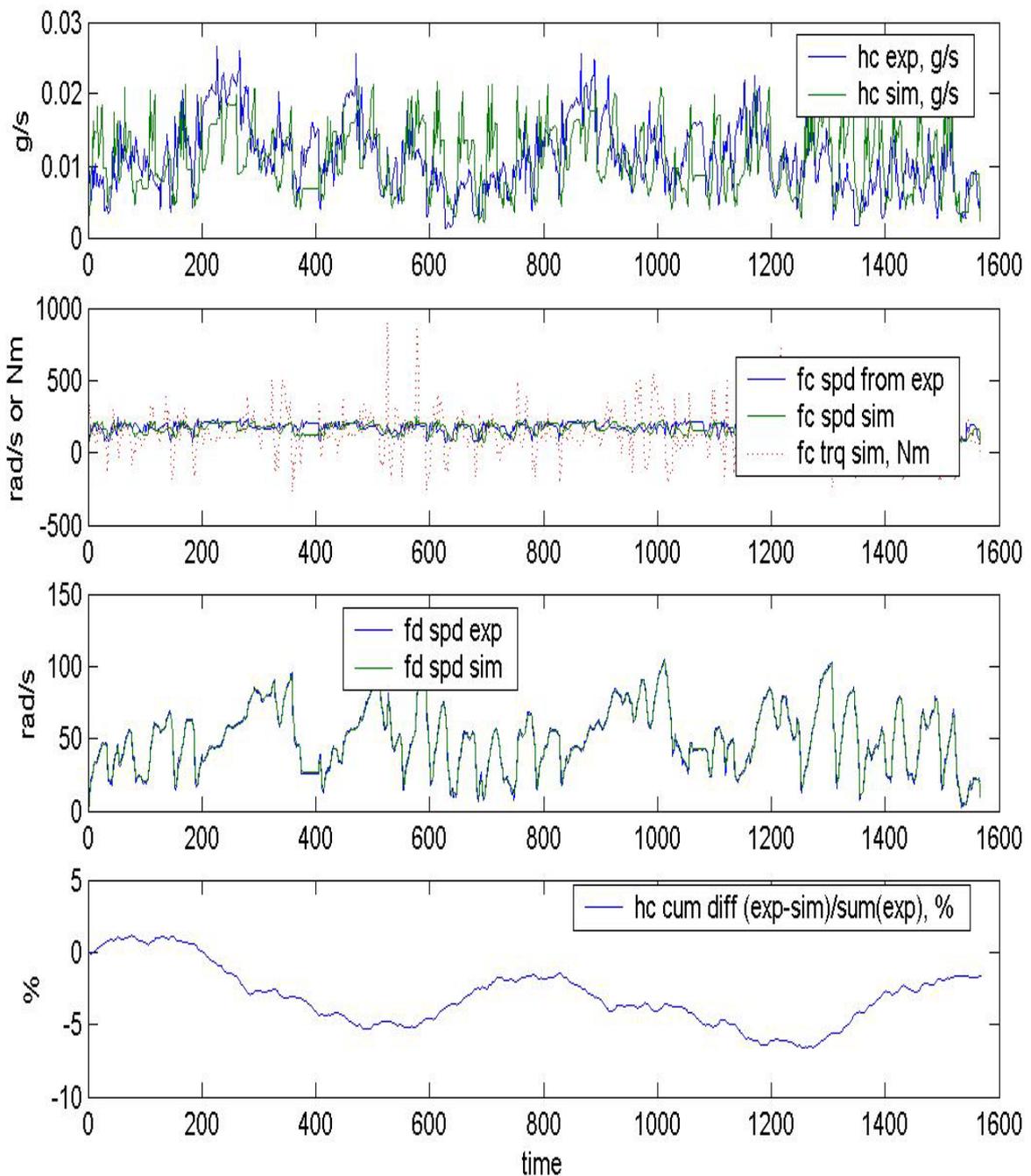


Figura 4.3 Resultados de la simulación de HC para el caso diesel 500.

En el caso de la figura 4.4 las emisiones simuladas de CO se ajustan mejor a los datos experimentales que en los casos anteriores ya que en este caso el error a lo largo del recorrido es mucho menor a 5% y las emisiones promediadas totales sólo difieren en un 0.01%.

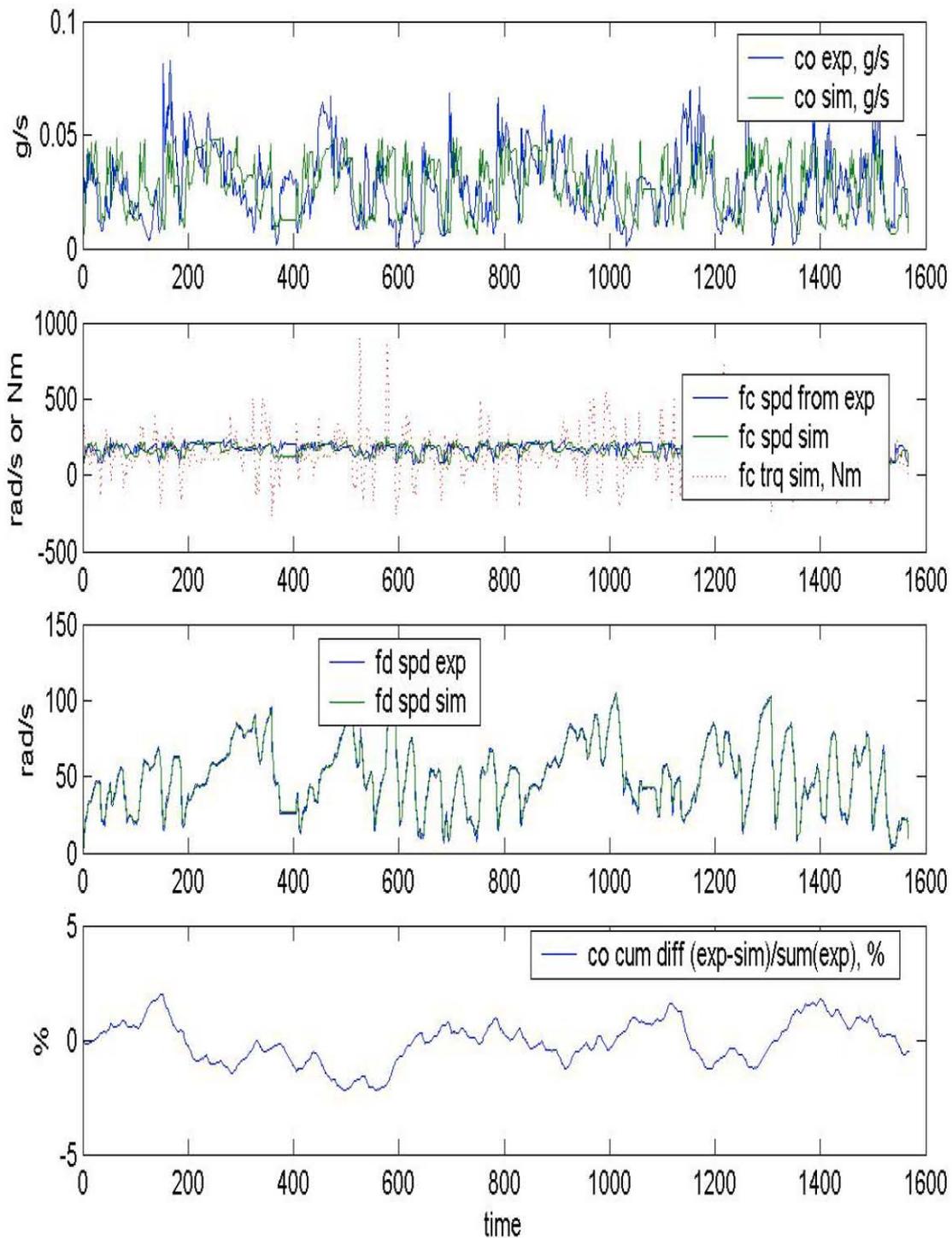


Figura 4.4 Resultados de la simulación de CO para el caso de diesel 500.

En la tabla 4.1 se resumen los resultados de las emisiones obtenidas, tanto experimentalmente como en las simulaciones. Se puede ver que, de todos los gases simulados, el que presentó mayor problema fue el de NO_x aún así, el error no fue significativo.

diesel 500ppm de azufre	Emisión experimental (g/km)	Emisión simulada (g/km)	Error acumulado (%)
HC	1.9845	1.9609	-1.1878
CO	4.9748	4.9739	-0.0189
NO	17.9133	16.9768	-5.2283
CO ₂	1170.5072	1164.2495	-0.53462

Tabla 4.1 Resultados de las emisiones experimentales y simuladas con su correspondiente error acumulado para el caso diesel 500.

4.3 RESULTADOS B10

En la figura 4.5 se observa que los resultados de la simulación de CO₂ presentan algunos lapsos en los que las emisiones simuladas van por debajo (pero con la misma tendencia) de las experimentales como se aprecia en la vecindad de los 200 y los 900 segundos. Esto se puede deber a la suavización que se realiza en la interpolación para la obtención de los mapas.

Las emisiones de CO₂ simuladas con diesel B10 muestran que el error que se tiene con las experimentales osciló entre 2 y -3% a lo largo del recorrido. Al final las emisiones promediadas totales presentaron una diferencia de 0.87% con respecto a las emisiones de CO₂ experimentales.

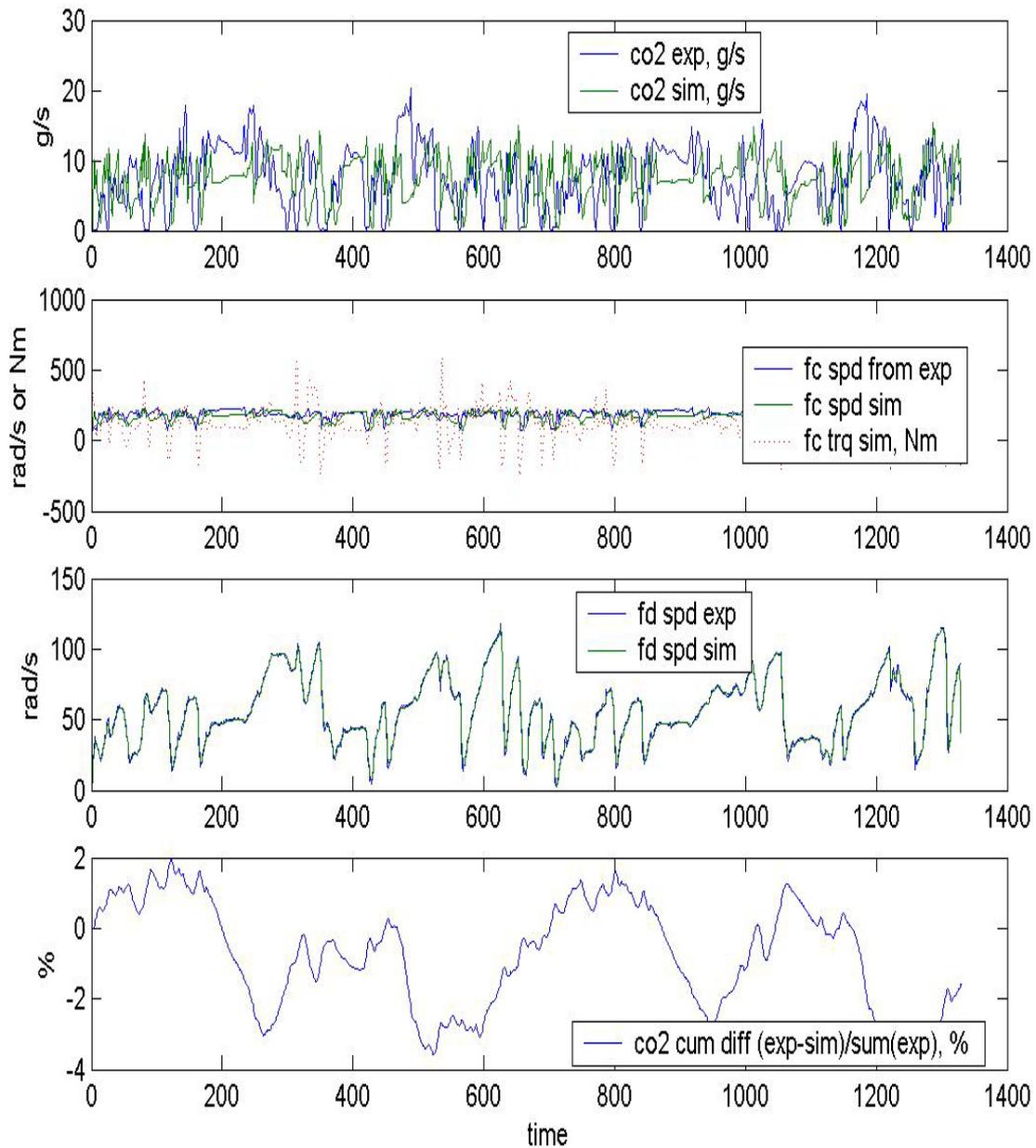


Figura 4.5 Resultados de la simulación correspondiente a CO₂ para el caso diesel

La figura 4.6 presenta los resultados de la simulación de NO_x con el combustible B10. A diferencia de las simulaciones con diesel 500 esta muestra que las emisiones de NO_x son muy precisas y muy cercanas a las emisiones obtenidas en la experimentación. Es importante remarcar que las simulaciones dependen en gran medida de la calidad de los datos experimentales. En algunas ocasiones hubo problemas en las mediciones, debido a que los sensores dejaban de funcionar por unos segundos lo que provocó que los datos experimentales presenten saltos en las emisiones, esos saltos son los causantes de que las simulaciones no sean tan precisas en algunos puntos.

Las emisiones simuladas de NO_x para el caso B10 presentan un error que oscila entre 3% y -3% a lo largo del recorrido. Al final las emisiones promediadas totales de la simulación difieren en un 1.1% con respecto a las experimentales.

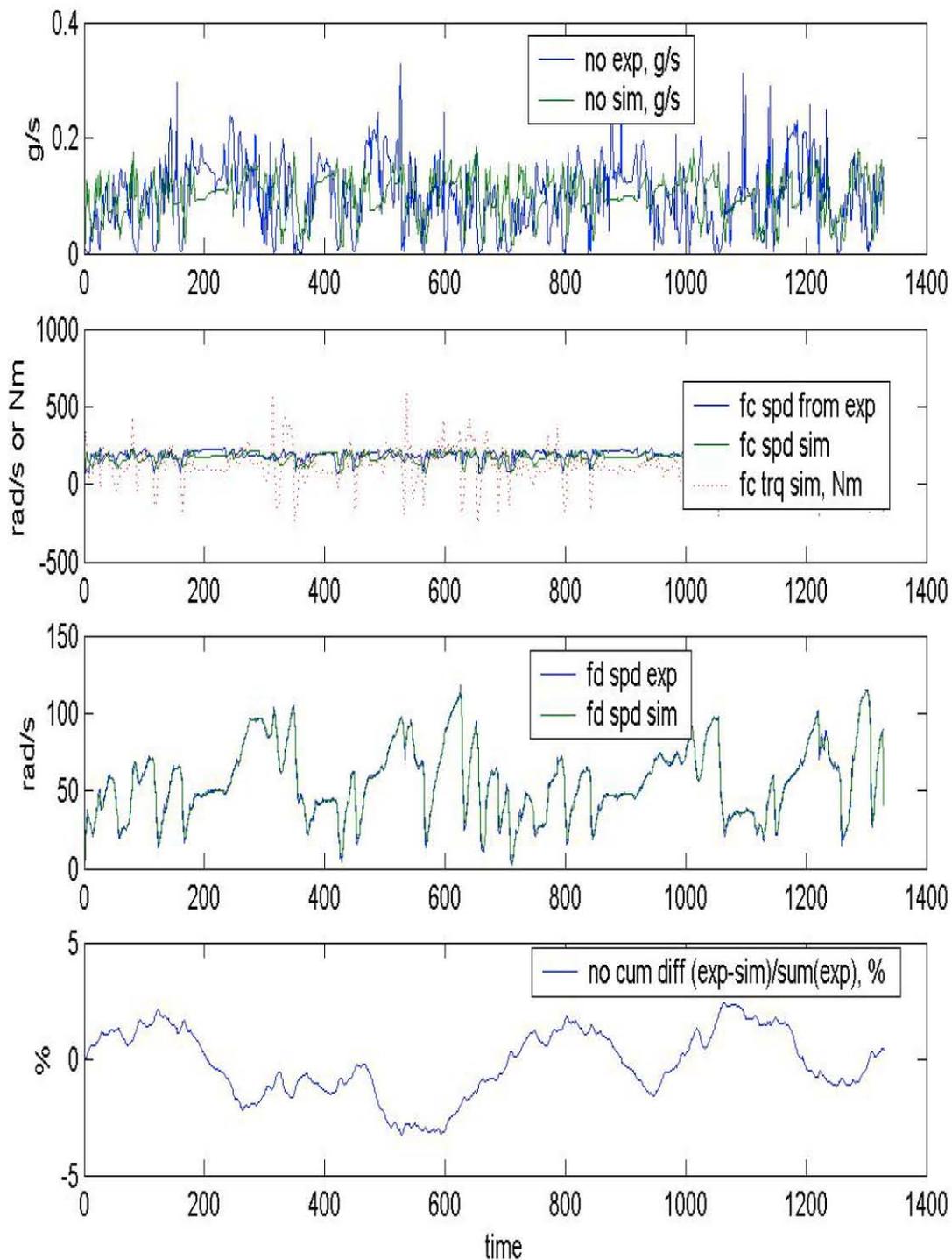


Figura 4.6 Resultados de la simulación correspondiente a NO para el caso diesel B10.

La figura 4.7 presenta los resultados de HC. Se puede ver que las simulaciones de HC presentaron un mayor error a lo largo del recorrido con un porcentaje que casi siempre se mantuvo en -5% y en el total de emisiones promediadas se tiene que diferir en un 5% con respecto a las experimentales.

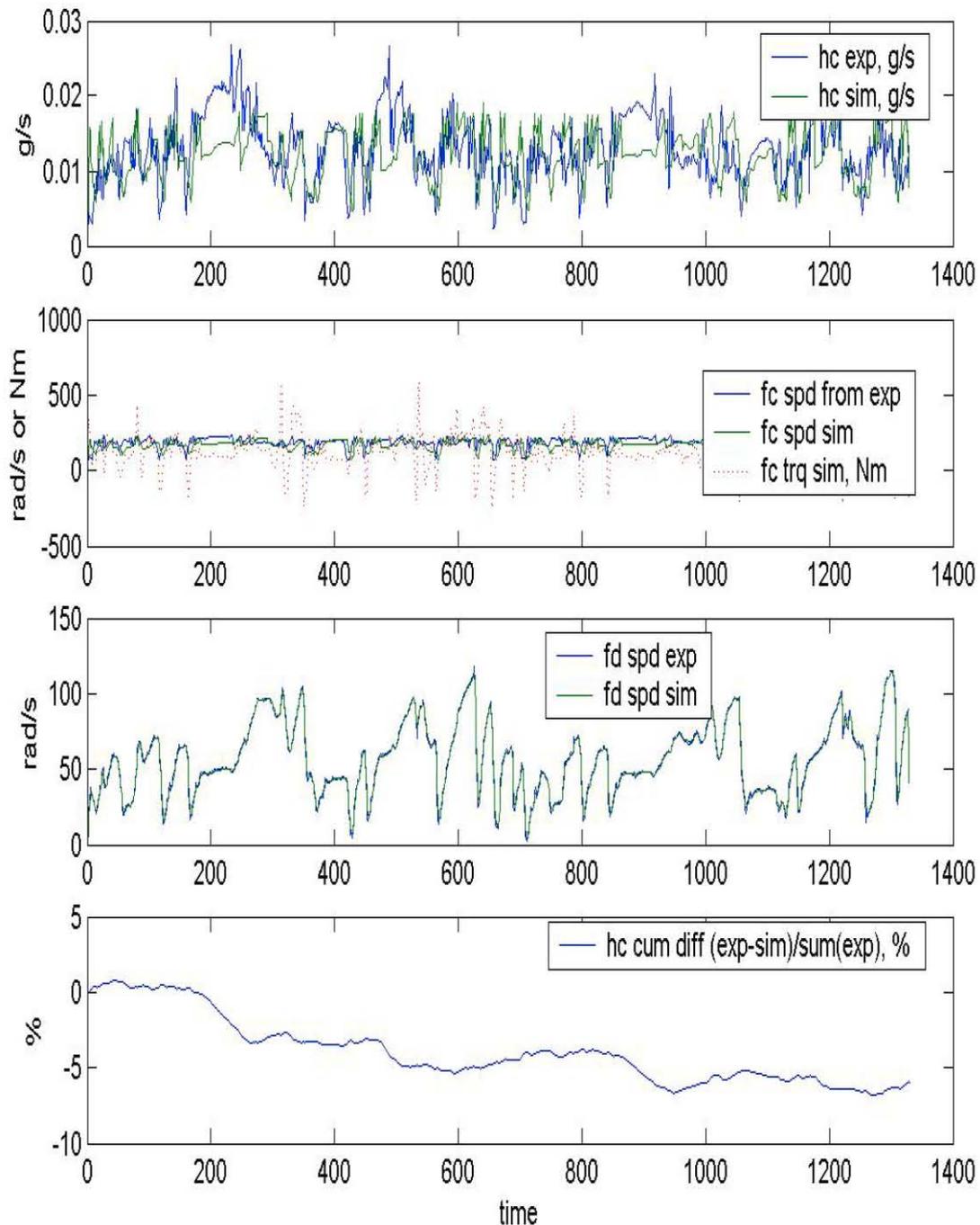


Figura 4.7 Resultados de la simulación correspondiente a HC para el caso diesel B10.

En la figura 4.8 se puede ver que las simulaciones de CO se acercaron más a las emisiones experimentales que en los casos anteriores. A lo largo del recorrido la diferencia con los datos experimentales osciló entre 1% y -3%. Al final las emisiones totales promediadas sólo difieren en un 0.49%.

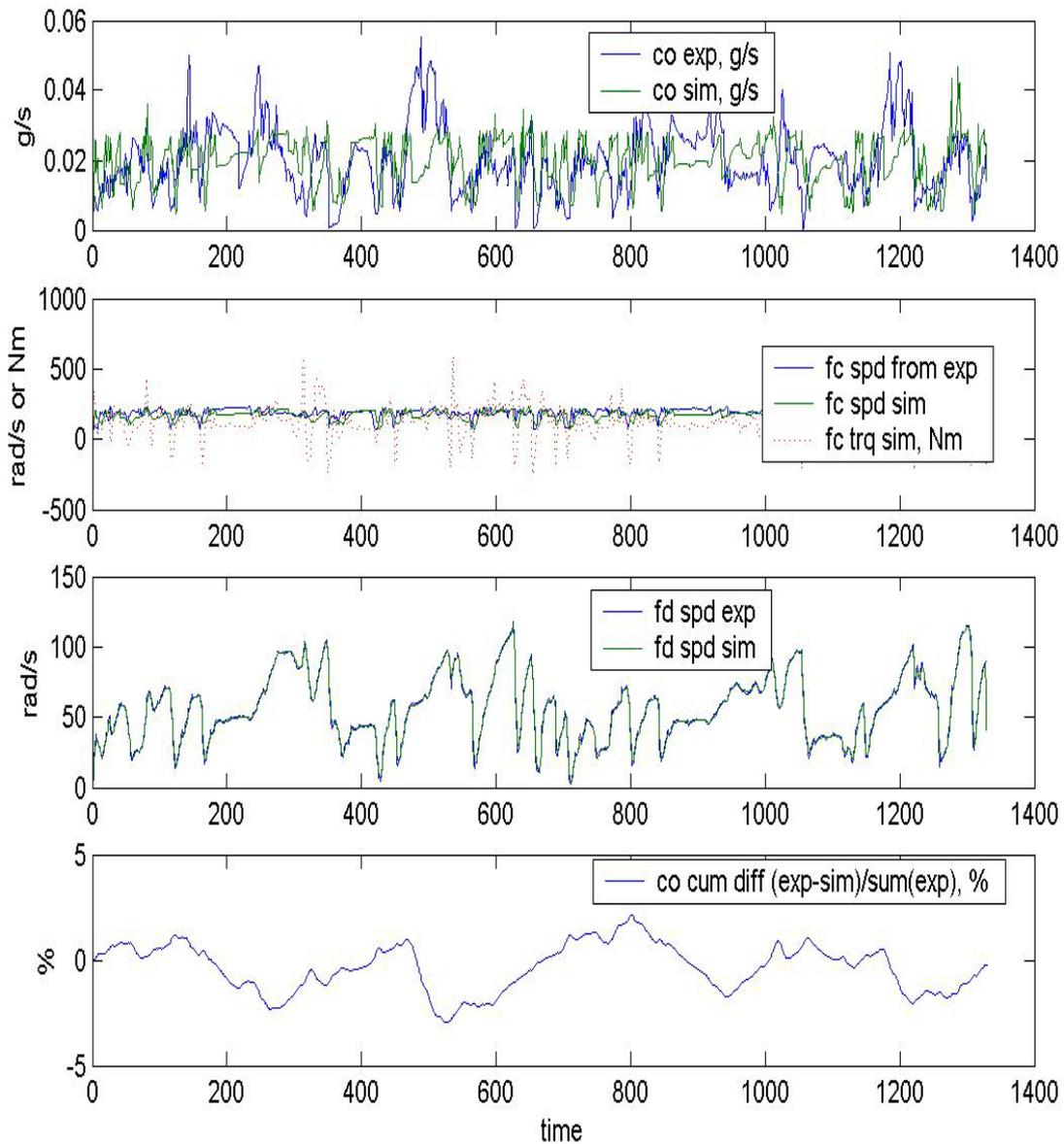


Figura 4.8 Resultados de la simulación correspondiente a CO para el caso diesel B10

En la tabla 5.2 se resumen los resultados de las emisiones obtenidas en las simulaciones del biodiesel B10 con sus respectivas comparaciones con las emisiones obtenidas experimentalmente.

biodiesel B10	Emisión experimental (g/km)	Emisión simulada (g/km)	Error acumulado (%)
HC	2.0663	1.9572	-5.278
CO	3.1582	3.1739	0.49757
NO	15.7115	15.8873	1.1193
CO₂	1184.0422	1173.7278	-0.87112

Tabla 4.2 Resultados de las emisiones experimentales y simuladas con su correspondiente error acumulado para el caso BIODIESEL B10.

4.4 RESULTADOS B20.

Las emisiones de CO₂ simuladas con el combustible B20 se muestran en la figura 4.9 y, como se puede ver, esta simulación es la que presentó más problemas y aquí se encontró el error más alto. Esto es debido a que en las campañas de medición los sensores del equipo PEMS tuvieron fallas, principalmente los de CO₂. Para minimizar las mediciones corruptas en los datos experimentales se hizo un filtraje, en el cual se eliminaron los datos que correspondían a emisiones negativas y los que correspondían a emisiones iguales a cero, además de interpolaciones para suavizar las emisiones que se disparaban desde un valor pequeño hasta un valor alto en un lapso corto. De esta manera fue posible minimizar el error en las simulaciones.

La simulación de CO₂ a lo largo del recorrido presentó un error que se mantuvo cerca de -10%. Al final las emisiones totales promediadas difieren en un 8.9% con respecto a las experimentales.

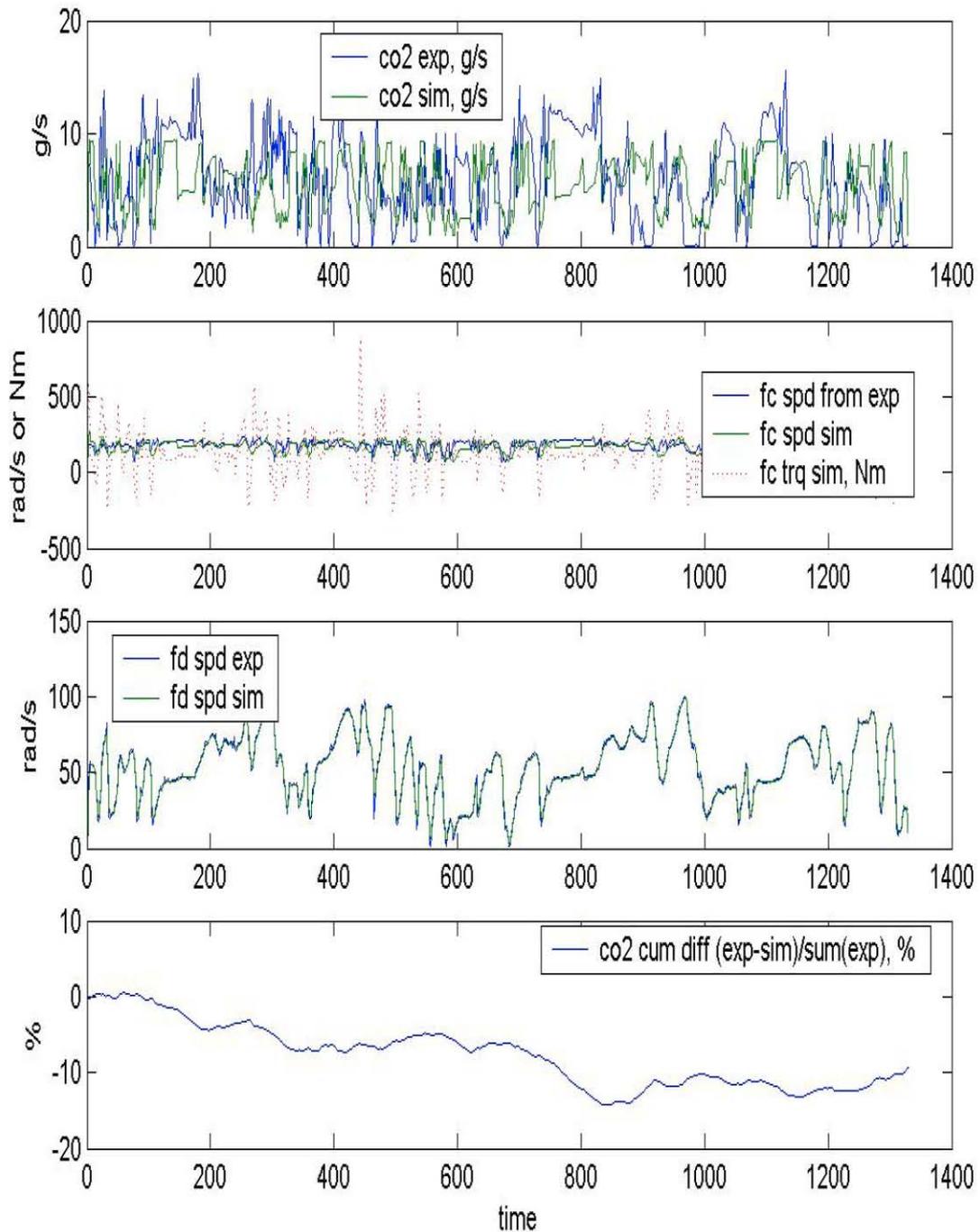


Figura 4.9 Resultados de la simulación correspondiente a CO₂ para el caso diesel B20.

La figura 4.10 muestra las simulaciones de NO_x las cuales tuvieron un error que osciló entre 0% y -5%. La diferencia con las emisiones experimentales al promediar las emisiones fue de un 1.68%.

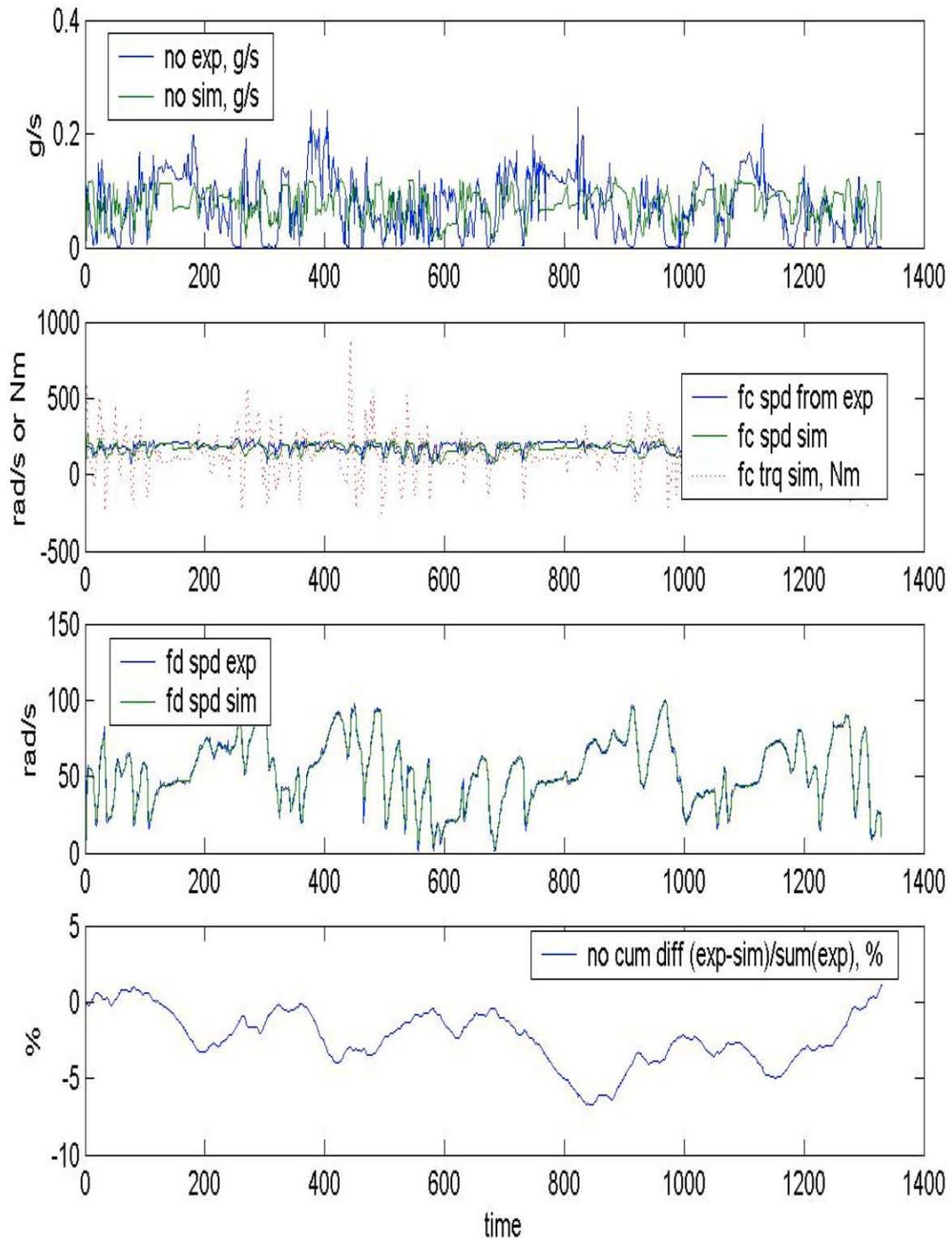


Figura 4.10 Resultados de la simulación correspondiente a NO para el caso diesel B20.

La figura 4.11 muestra los resultados de la simulación de HC para B20. Se puede ver que la simulación tiene un error a lo largo del recorrido que oscila entre 1% y -3%. Al final las emisiones simuladas difieren en un 0.88% lo que hace que este sea el caso más preciso en lo que respecta al diesel B20.

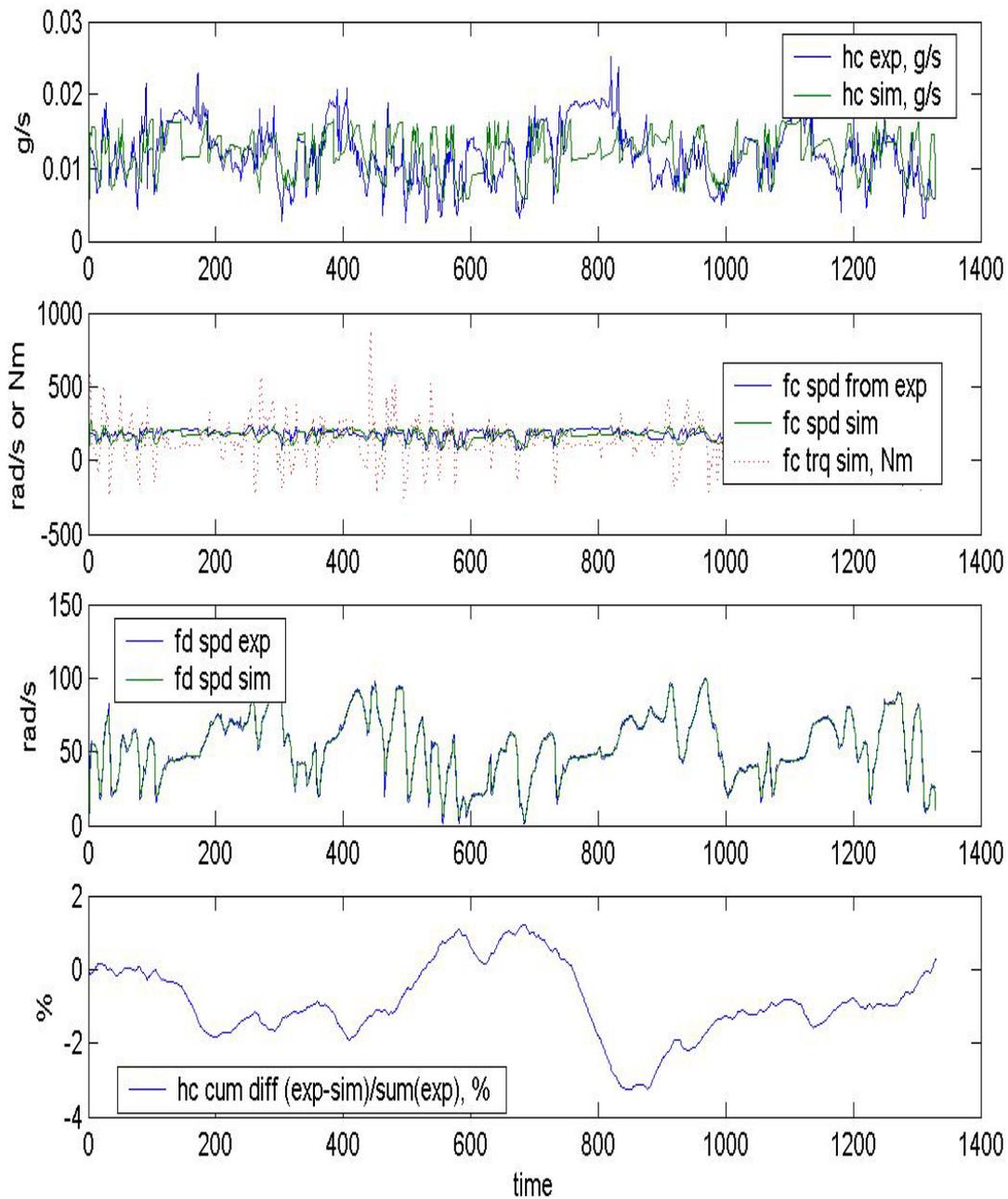


Figura 4.11 Resultados de la simulación correspondiente a HC para el caso diesel B20

La figura 4.12 muestra los resultados de CO. Los datos de la simulación presentan un error a lo largo del recorrido que oscila entre 1% y -5%. Las emisiones simuladas difieren en el total promediado en un 1.83% con las experimentales.

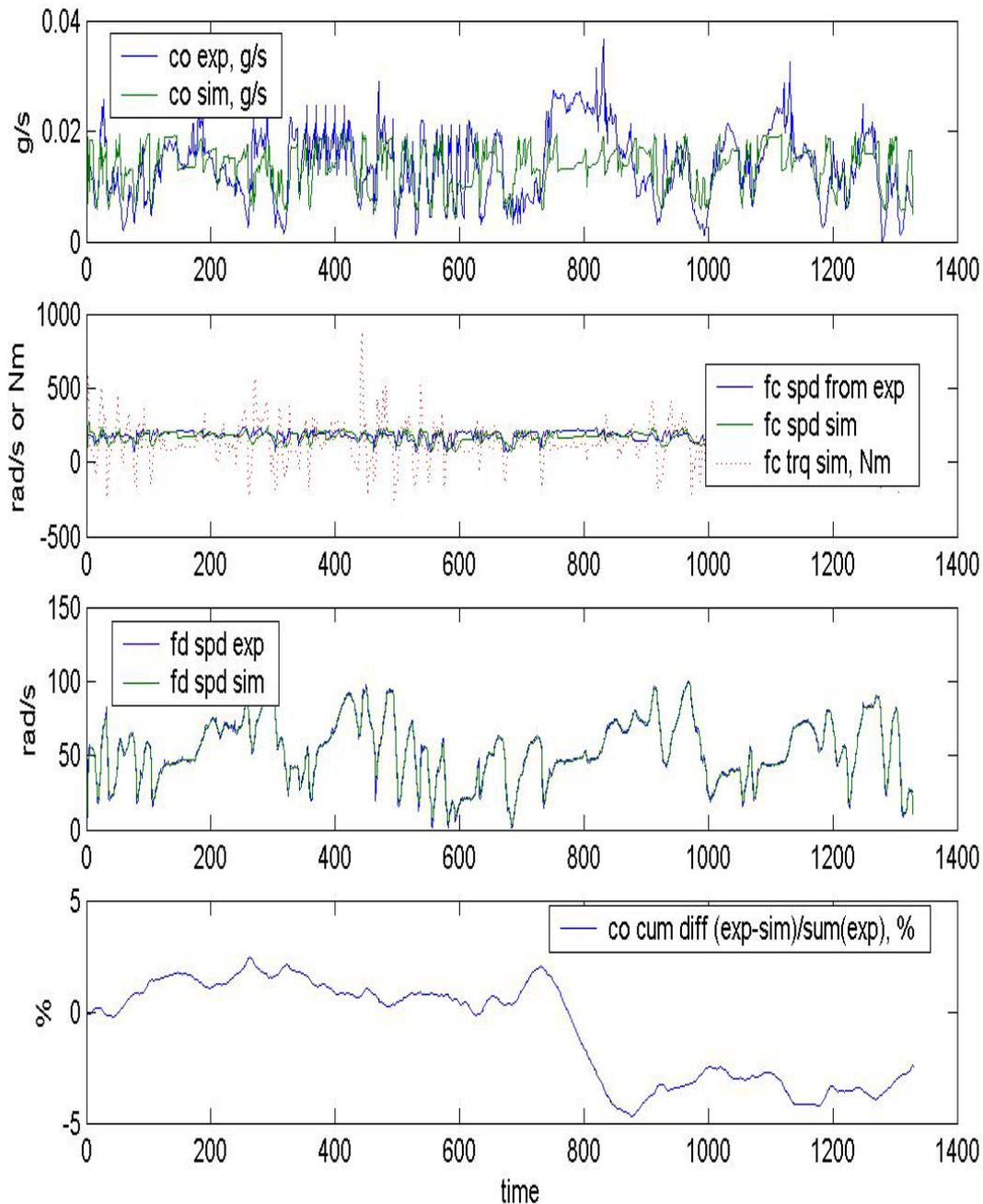


Figura 4.12 Resultados de la simulación correspondiente a CO para el caso diesel B20

En la tabla 4.3 se resumen los resultados de las emisiones obtenidas en las simulaciones del diesel B20 con sus respectivas comparaciones con las emisiones obtenidas experimentalmente.

Se puede ver que esta prueba presentó problemas. Sin embargo, al final los datos simulados que corresponden a HC, CO y NO son precisos y tienen una diferencia con los experimentales de 0.8%, 1.8% y 1.68% respectivamente. El mayor problema lo se encontró en el caso de CO₂ ya que aquí la diferencia en el total promediado fue de un 8.89% lo que nos da el error más alto de todas las pruebas. Esto se refleja en que experimentalmente se tiene una emisión promedio de 1023 g/km y en la simulación 932 g/km lo que representa una subestimación de 91 g/km.

BIODIESEL B20	Emisión experimental (g/km)	Emisión simulada (g/km)	Error acumulado (%)
HC	2.0032	2.021	0.88826
CO	2.3241	2.2815	-1.8352
NO	12.7467	12.9619	1.688
CO₂	1023.7799	932.7266	-8.8938

Tabla 4.3 Resultados de las emisiones experimentales y simuladas con su correspondiente error acumulado para el caso BIODIESEL B20.

4.5 RESULTADOS DIESEL ULTRA BAJO AZUFRE (UBA).

En los resultados experimentales el diesel UBA resultó ser el combustible que tiene menor emisión de CO₂, HC y NO entre todos los combustibles evaluados. En el caso de las simulaciones se puede ver que esa tendencia de reducción de emisiones también se repite, lo cual nos indica que la calidad de las simulaciones es muy buena.

En la figura 4.13 se observa que las emisiones simuladas de CO₂ para el caso de diesel UBA oscilaron entre un error de 3% y -4%. Al final la emisión total promediada difiere en un 2.2% con las emisiones experimentales.

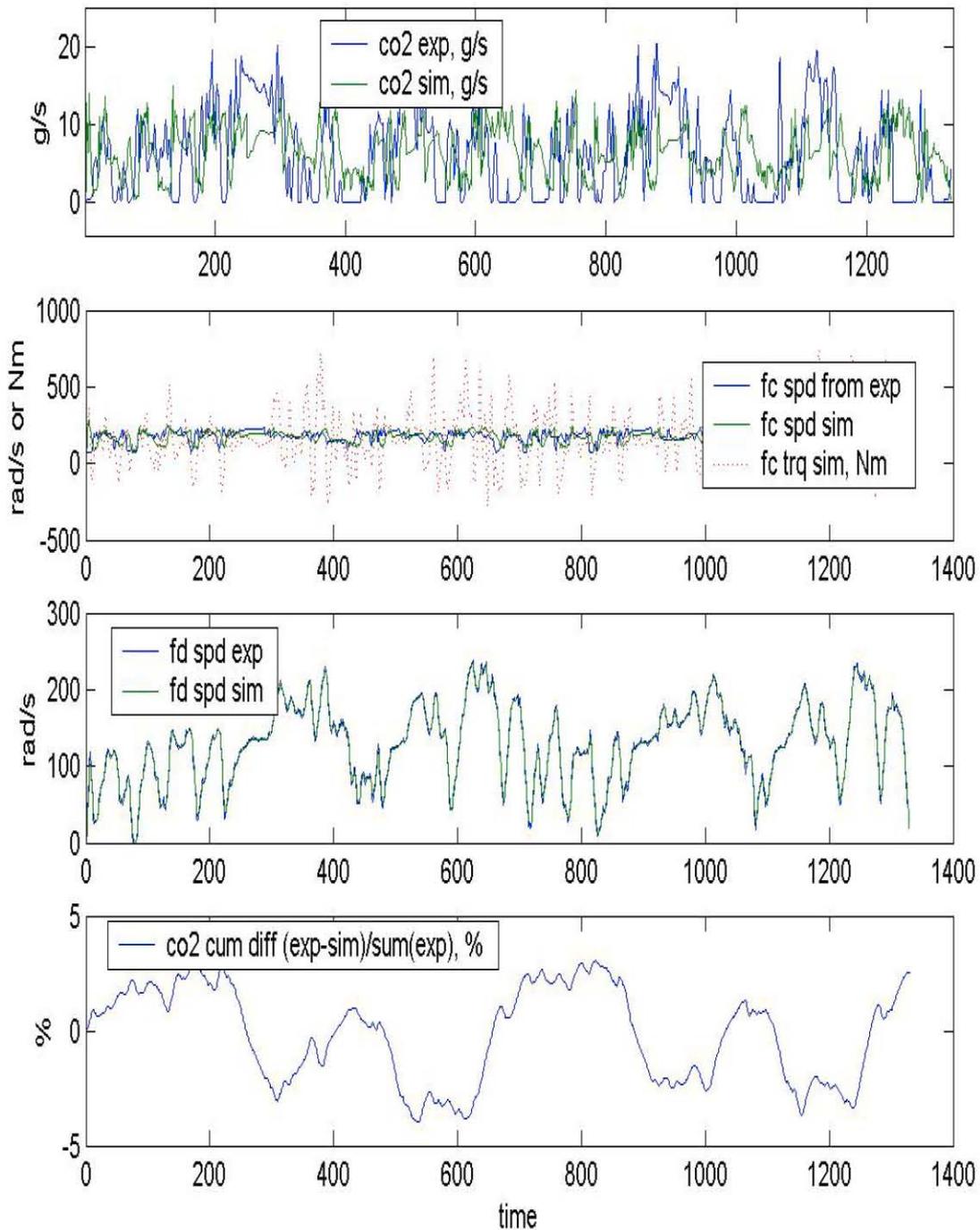


Figura 4.13 Resultados de la simulación correspondiente a CO₂ para el caso diesel UBA.

La figura 4.14 muestra que las emisiones de NO_x simuladas oscilaron entre errores de 2 y -4% lo que causó que al final las emisiones promediadas totales difieran en un 3% con respecto a las experimentales.

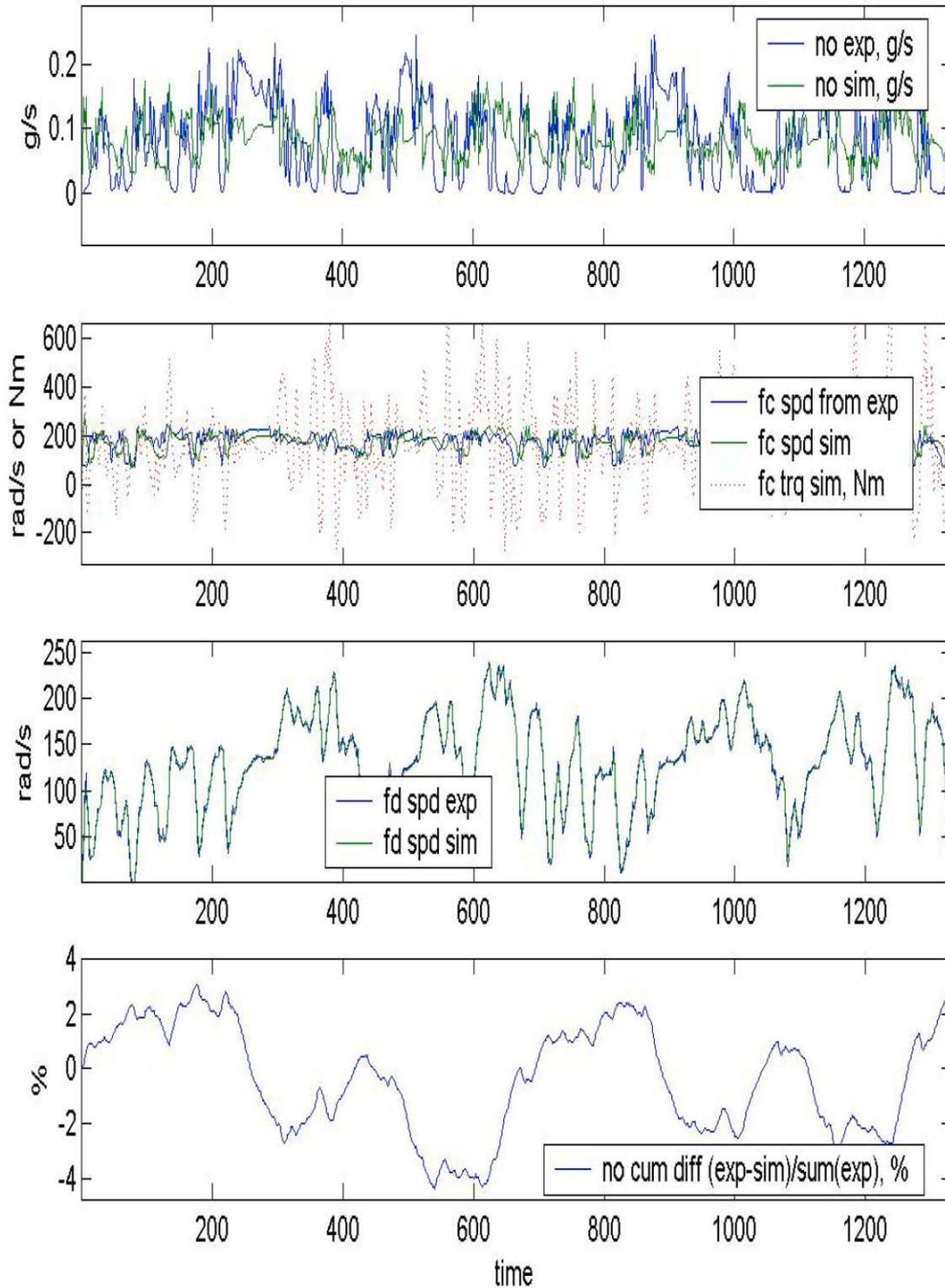


Figura 4.14 Resultados de la simulación correspondiente a NO para el caso diesel UBA.

La figura 4.15 muestra los resultados de las simulaciones de HC para el caso de diesel UBA, se observa que los datos simulados de HC difieren a lo largo del recorrido entre 1% y -5%. Al hacer la comparación con los resultados promediados de emisiones, el HC simulado difiere en un 0.22% con las experimentales.

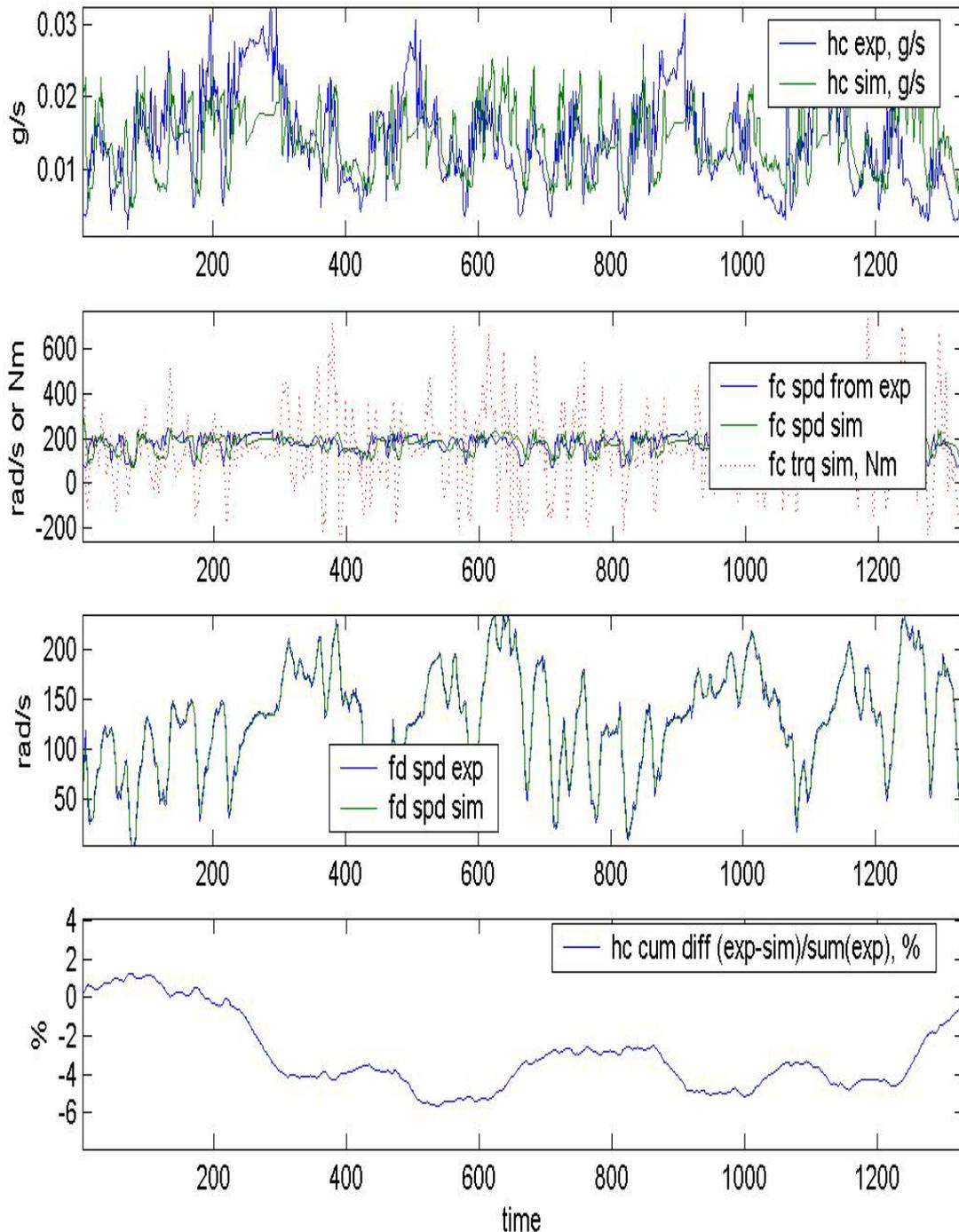


Figura 4.15 Resultados de la simulación correspondiente a HC para el caso diesel UBA.

Los datos simulados de CO, como se ve en la figura 4.16, difieren a lo largo del recorrido entre 2% y -5% con los experimentales y al hacer la comparación con los resultados promediados de emisiones se tiene una diferencia de 2.5% con los datos experimentales.

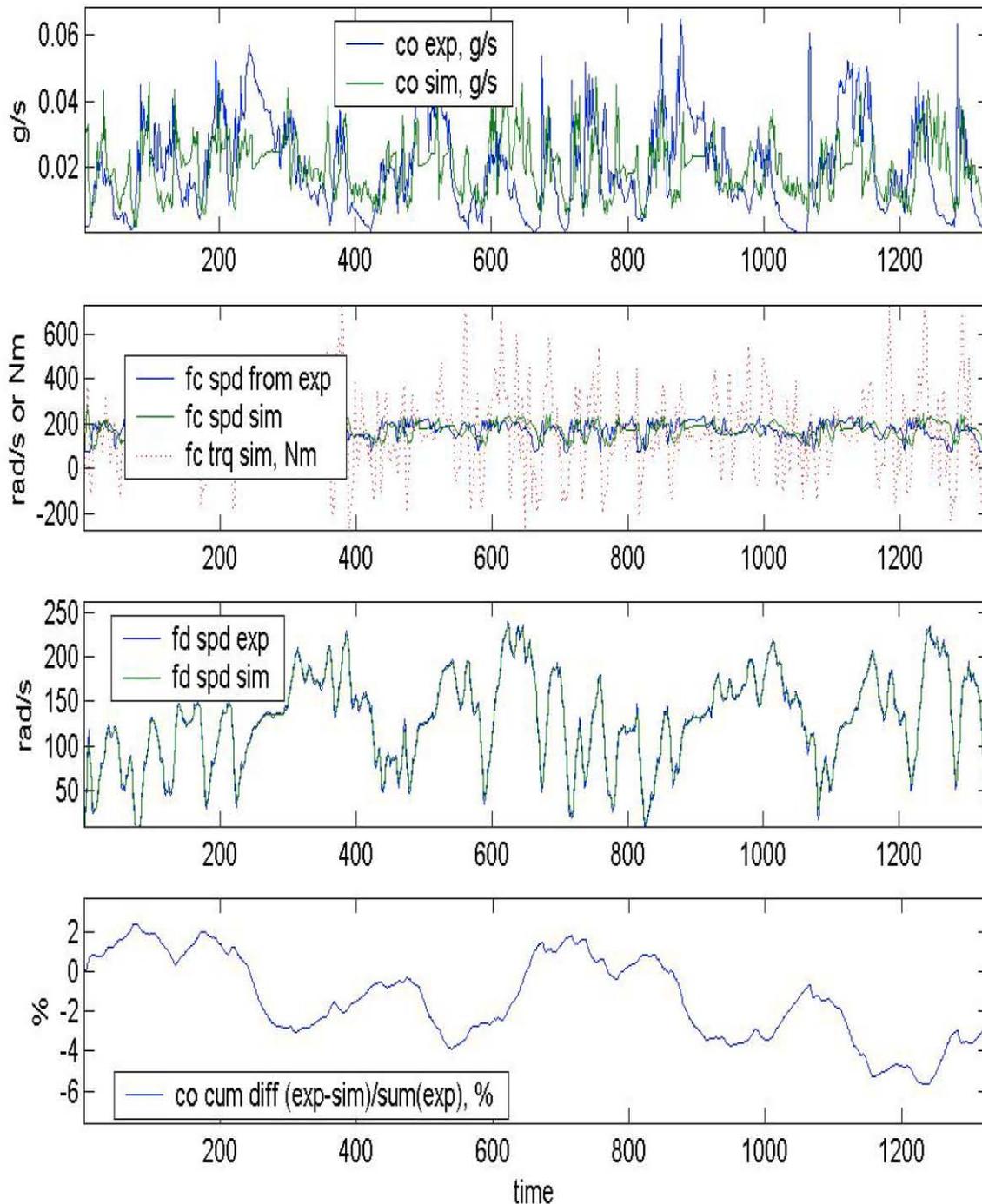


Figura 4.16 Resultados de la simulación correspondiente a CO para el caso diesel UBA.

En la tabla 4.4 se resumen los resultados de las emisiones obtenidas en las simulaciones del diesel UBA con sus respectivas comparaciones con las emisiones obtenidas experimentalmente. Se observa que el NO_x fue el que presentó una diferencia mayor con respecto a los datos experimentales y que el HC fue el más preciso con un 0.22% de diferencia. Aparte de que la simulación fue satisfactoria, nos permitió observar que este combustible es el que reduce en mayor proporción las emisiones de todos los gases estudiados en este trabajo.

diesel UBA	Emisión experimental (g/km)	Emisión simulada (g/km)	Error acumulado (%)
HC	1.9472	1.9427	-0.22818
CO	2.8021	2.731	-2.5381
NO	11.0871	11.4261	3.0572
CO₂	878.4652	858.9297	-2.2238

Tabla 4.4 Resultados de las emisiones experimentales y simuladas con su correspondiente error acumulado para el caso diesel UBA

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación se realiza una comparación entre los resultados de la simulación y los datos experimentales. Se presentan de la siguiente manera; se mide la variación, en porcentaje, de las emisiones experimentales de diesel B10, diesel B20 y diesel UBA con respecto a las emisiones del diesel 500. De esta manera se verifica si se reducen o aumentan las emisiones con respecto al diesel convencional.

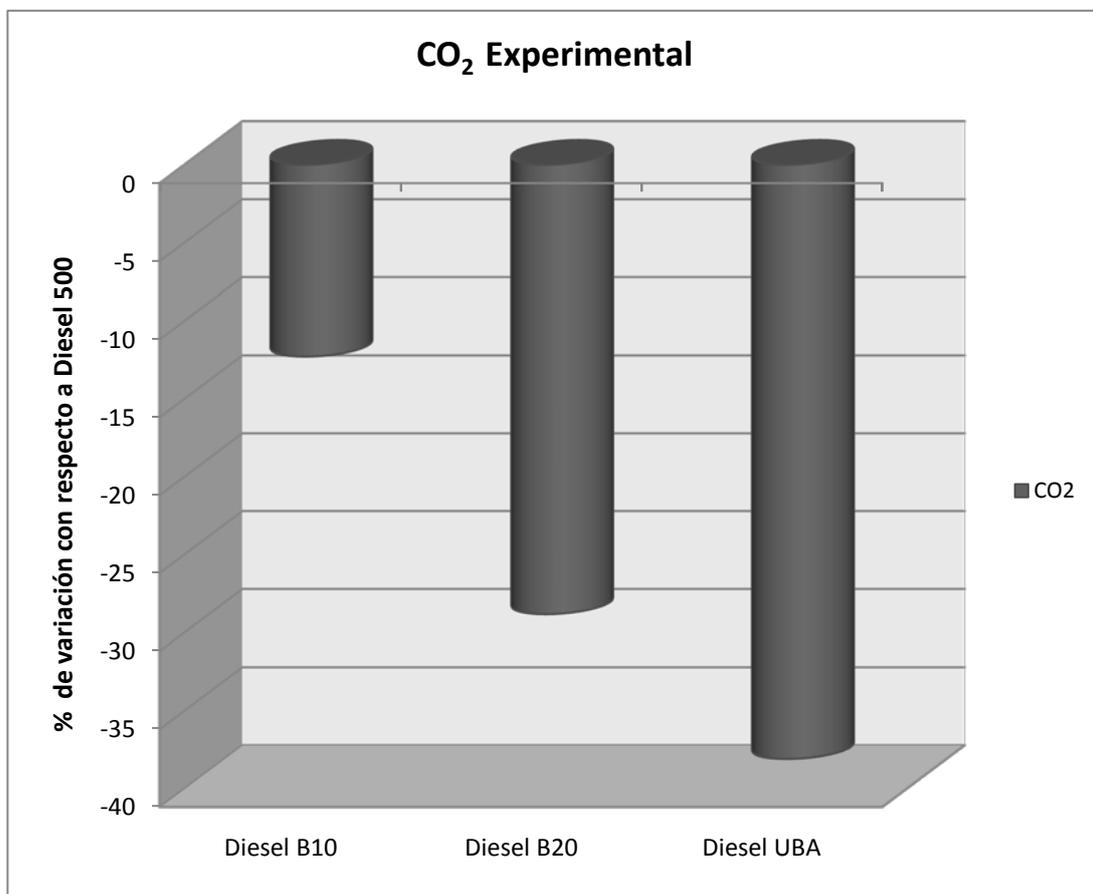
De igual manera se hacen para el caso de las simulaciones; se mide la variación de las emisiones de B10, diesel B20 y diesel UBA con respecto a las emisiones del diesel 500 (simulado). De esta manera se compara la calidad de los datos simulados con respecto a los experimentales. Además se verifica si las tendencias de variación en las emisiones experimentales se pueden representar en la simulación.

5.1 PRUEBAS EXPERIMENTALES.

5.1.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE CO₂.

Los resultados experimentales de variación de emisiones muestran en la gráfica 5.1 una disminución con respecto al diesel 500 de 28.84% y 38.11% en las emisiones cuando se utiliza diesel B20 y diesel UBA respectivamente.

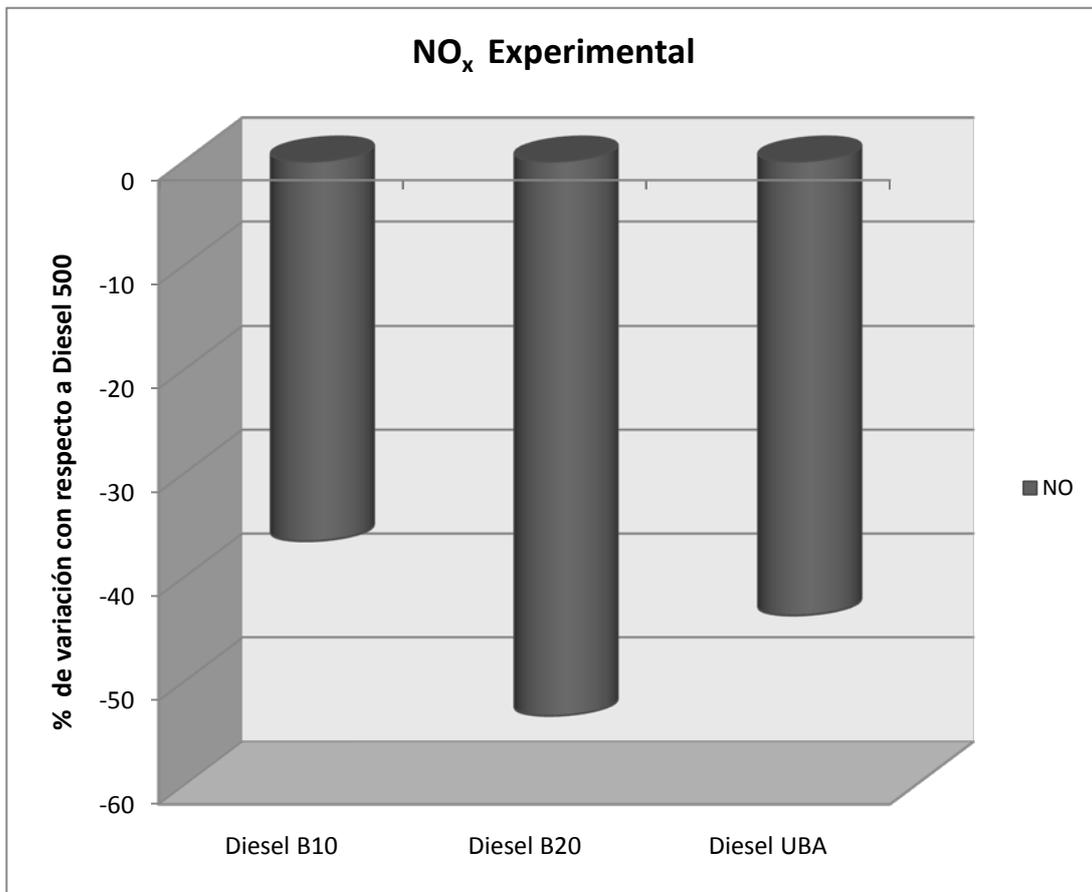
Para el caso de diesel B10, las emisiones son 12.29% más bajas que en el diesel 500. Por lo que el mejor combustible que se puede utilizar para reducir las emisiones de CO₂ es el diesel UBA.



Gráfica 5.1 Porcentajes de disminución en las emisiones respecto a diesel 500 de CO₂ en las pruebas experimentales.

5.1.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE NO_x.

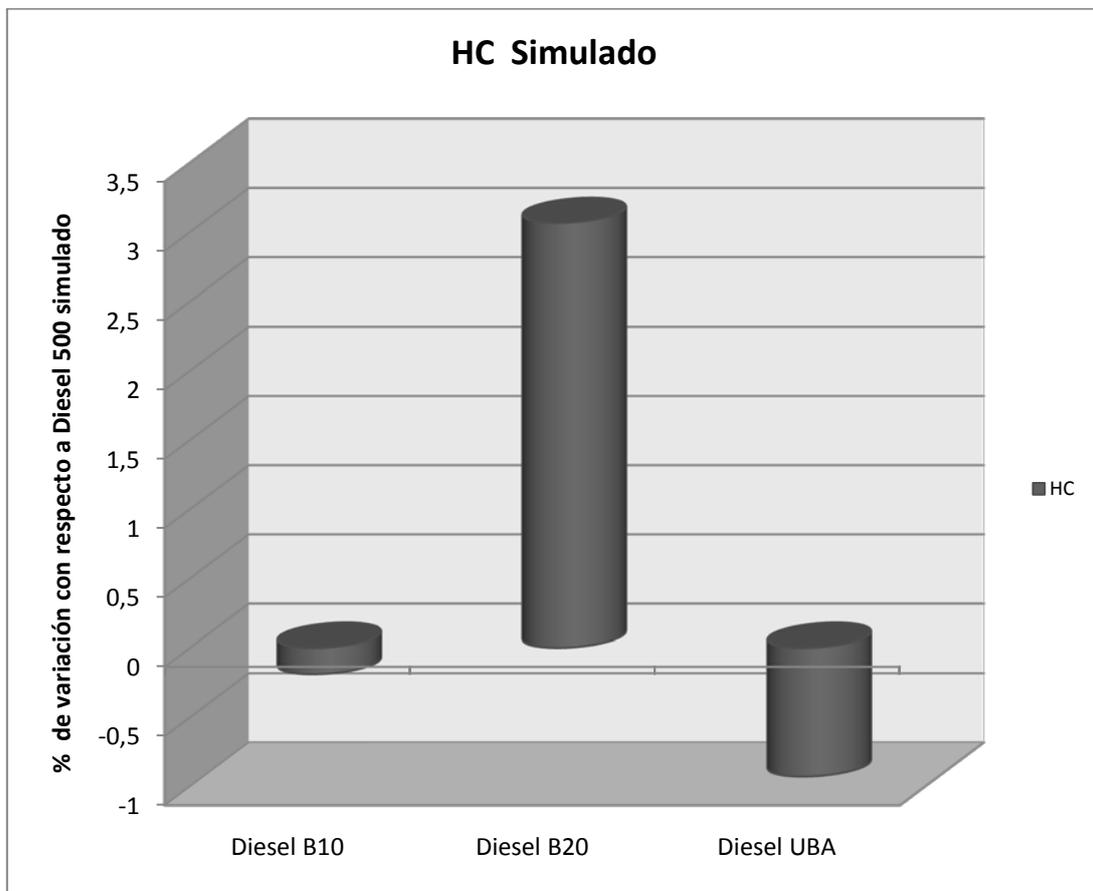
La gráfica 5.2 muestra que las emisiones de NO_x con respecto al diesel 500 son menores en todos los casos. En orden de menor a mayor reducción, se tiene al diesel B10, diesel UBA y diesel B20 con 36.52%, 43.67% y 53.28%, respectivamente. Por lo que el mejor combustible que se puede utilizar para reducir las emisiones de NO_x es el diesel B20.



Gráfica 5.2 Porcentajes de disminución en las emisiones respecto a diesel 500 de NO_x en las pruebas experimentales.

5.1.3 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE HC.

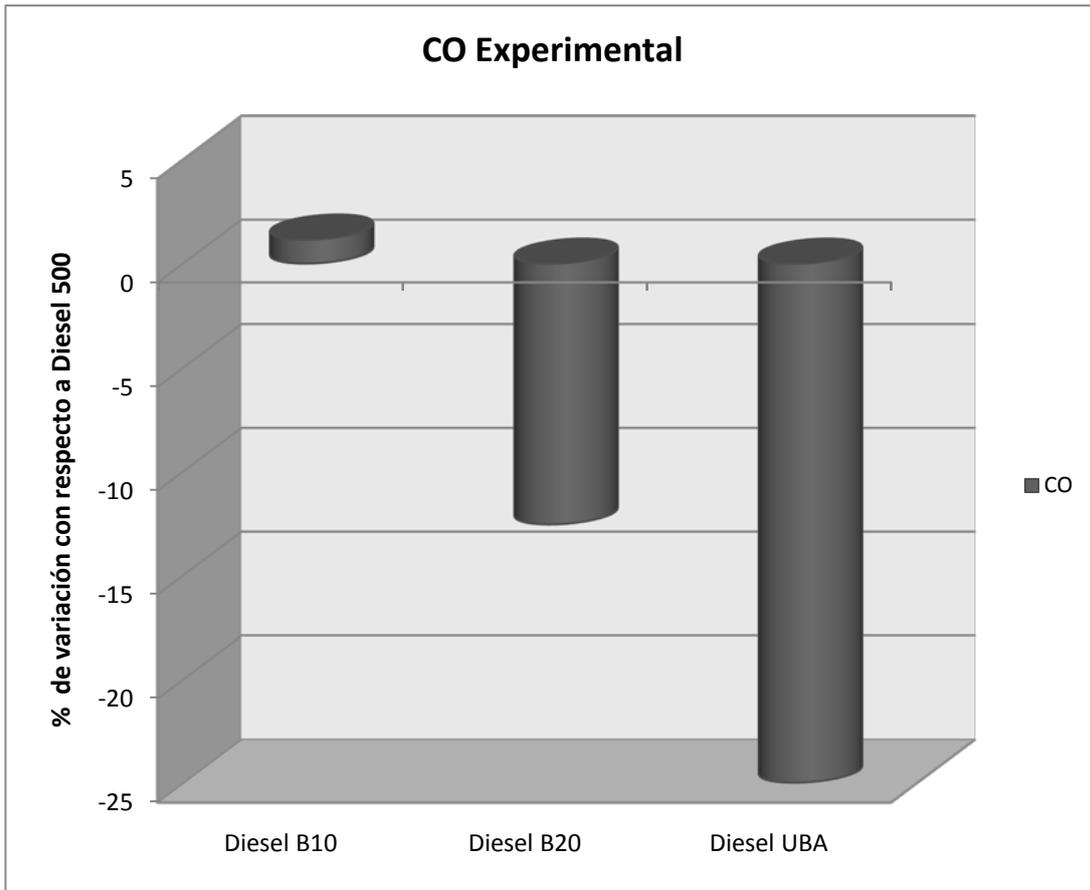
La gráfica 5.3 muestra el porcentaje de variación en emisiones de HC. Estas aumentan en el caso de B10 y B20 en 4.12% y 0.94%, respectivamente en comparación con el diesel 500. En el caso del diesel UBA las emisiones se reducen en 1.88%. Por lo que es el mejor combustible que se puede utilizar para reducir las emisiones de HC.



Gráfica 5.3 Porcentajes de aumento y disminución en las emisiones respecto a diesel 500 de HC en las pruebas experimentales.

5.1.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE CO.

En la figura 5.4 se observa la variación de emisiones de CO. En el caso de diesel B10 hubo un aumento de 1.16%, en B20 disminuyó 12.54% y en UBA disminuyó 24.95%. Por lo que el mejor combustible que se puede utilizar para reducir las emisiones de CO es el diesel B20.



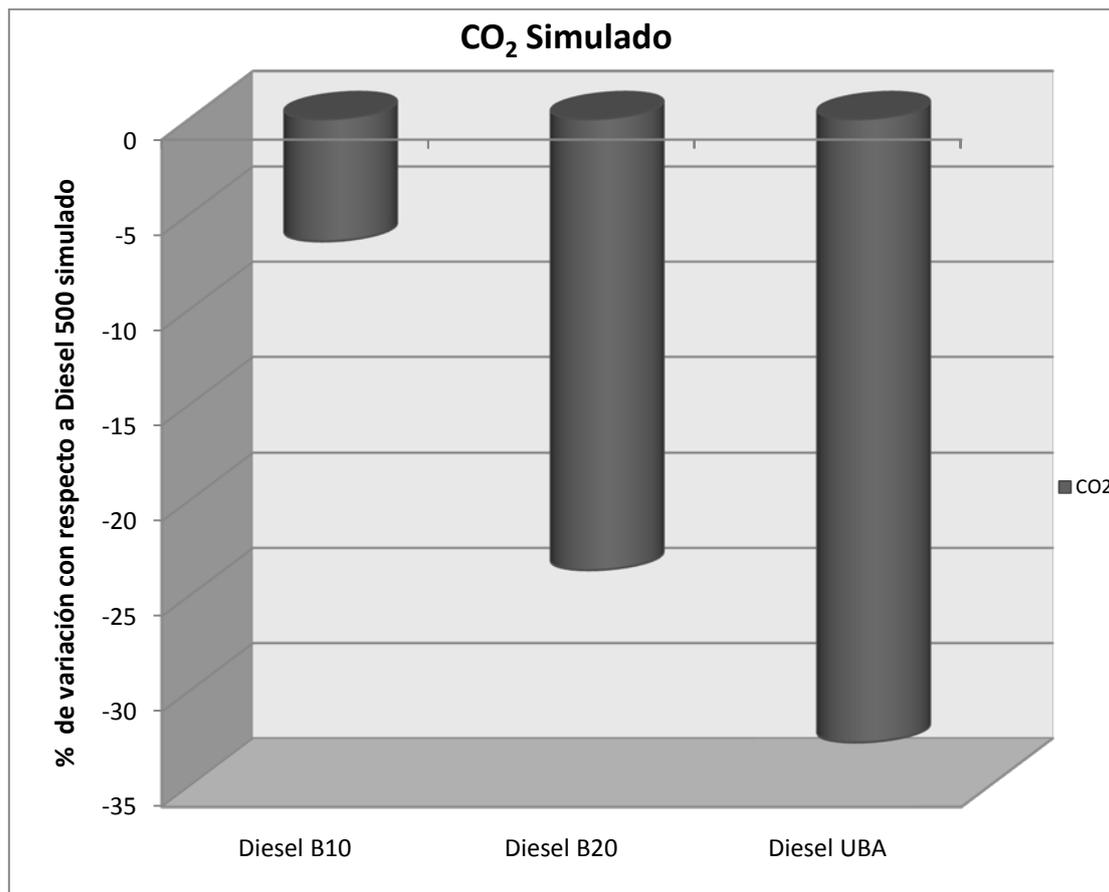
Gráfica 5.4 Porcentajes de disminución en las emisiones respecto a diesel 500 de CO en las pruebas experimentales.

En general en las pruebas experimentales el combustible mejor posicionado para efectos de la disminución de emisiones resulta ser el diesel UBA con la excepción del diesel B20 que disminuye en mayor proporción las emisiones de NO_x .

5.2 SIMULACIONES EN ADVISOR.

5.2.1 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE CO₂.

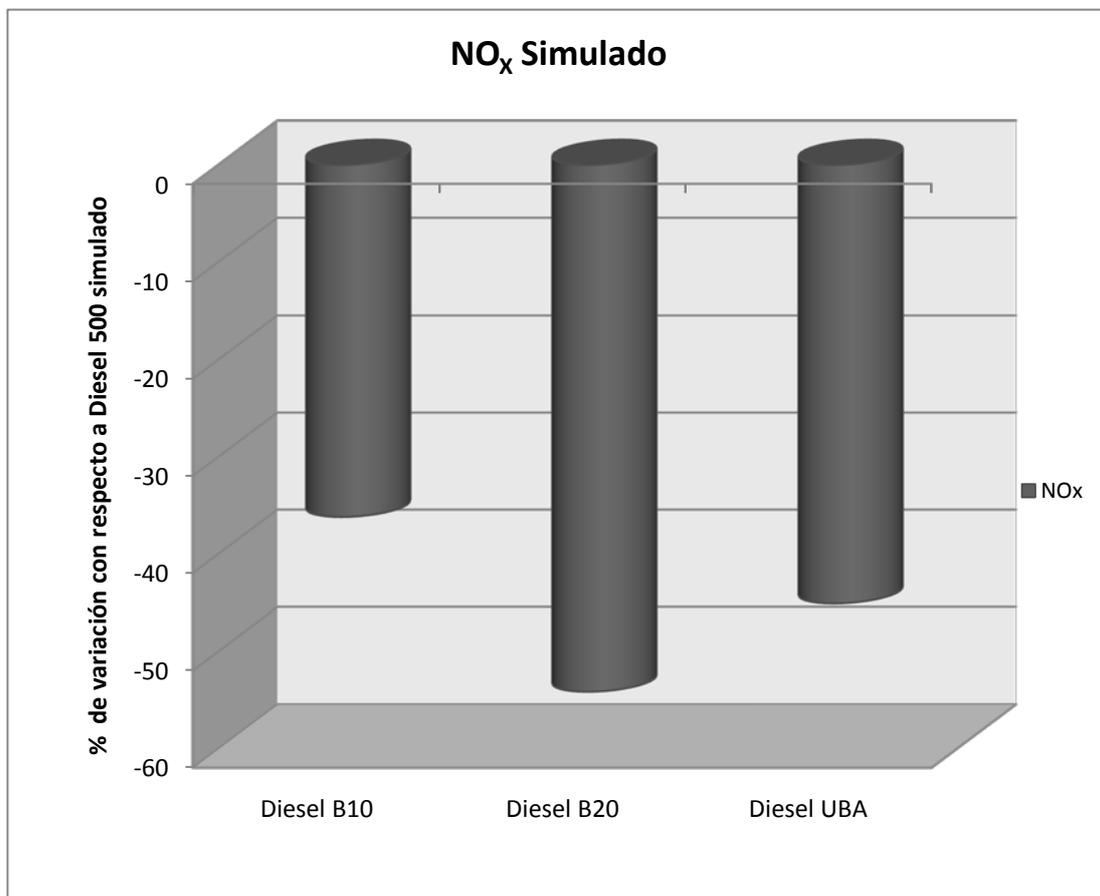
Los resultados de la simulación muestran en la figura 5.5 una disminución de 6.42%, 23.65% y 32.70% en las emisiones cuando se utiliza diesel B10, diesel B20 y diesel UBA, respectivamente. Estos resultados son consistentes en general con lo obtenido experimentalmente. Aunque ahora hubo una diferencia más grande con respecto al diesel 500 del diesel B10 ya que experimentalmente hubo una disminución de 12.29% contra un 6.42% de la simulación.



Gráfica 5.5 Porcentajes de disminución en las emisiones respecto a diesel 500 de CO₂ en las simulaciones.

5.2.2 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE NO_x.

Las emisiones de NO_x con respecto al diesel 500 son menores en todos los casos. Cuando se utiliza diesel B10 disminuyen en 36.19%, cuando se utiliza diesel B20 disminuyen en 54.13% y con diesel UBA disminuye un 45.09%. En este caso la variación es prácticamente la misma que en el caso experimental, de tal manera que, ésta es la simulación más precisa de todas las realizadas en este trabajo

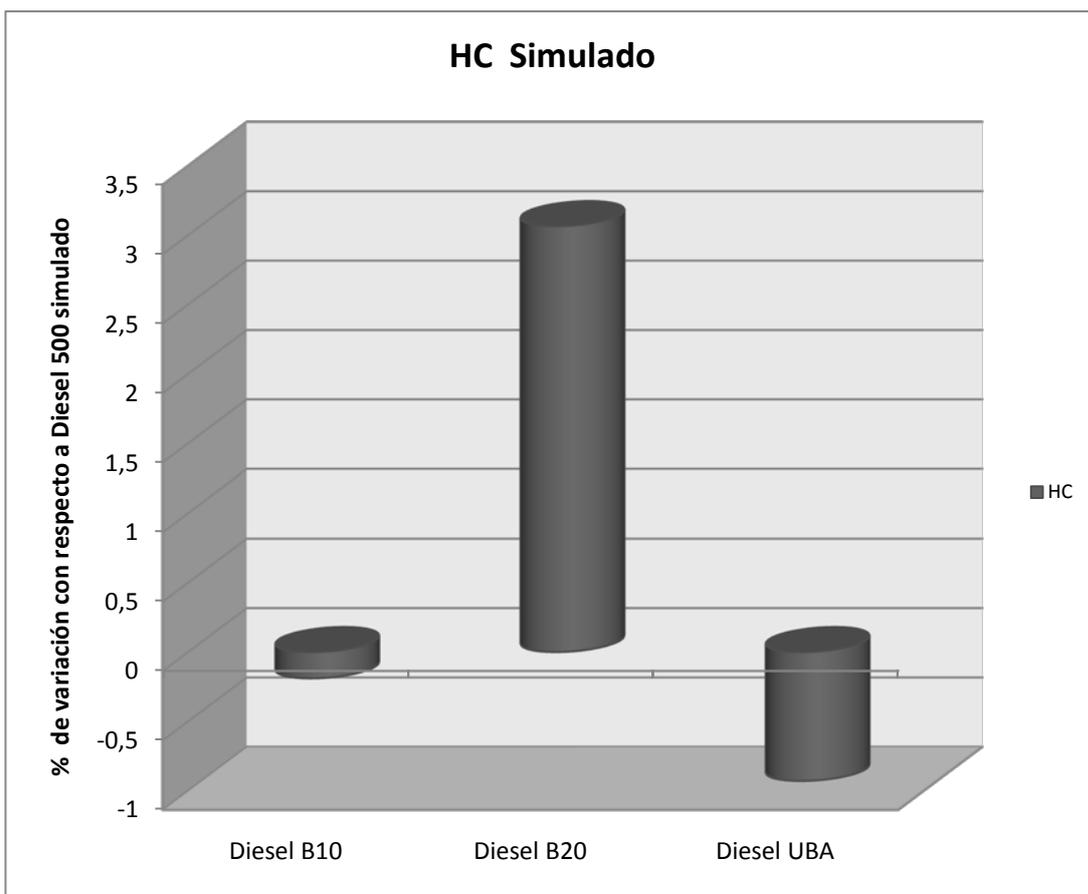


Gráfica 5.6 Porcentajes de disminución en las emisiones respecto a diesel 500 de NO_x en las simulaciones.

5.2.3 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE HC.

La simulación indica que el porcentaje de variación de emisiones de HC disminuyen cuando se utiliza diesel UBA en un 0.93%. Sin embargo al usar diesel B20 suben en un 3.06% y en diesel B10 disminuyen en un 0.19%. Aquí hay una diferencia con el caso del B10 entre la simulación y la experimentación ya que en el simulado las emisiones permanecen prácticamente igual a las de diesel 500 y en la experimentación suben en un 4%. Sin embargo estos errores se pueden considerar mínimos ya que el equipo PEMS utilizado tiene un rango de error en las mediciones de un 5%.

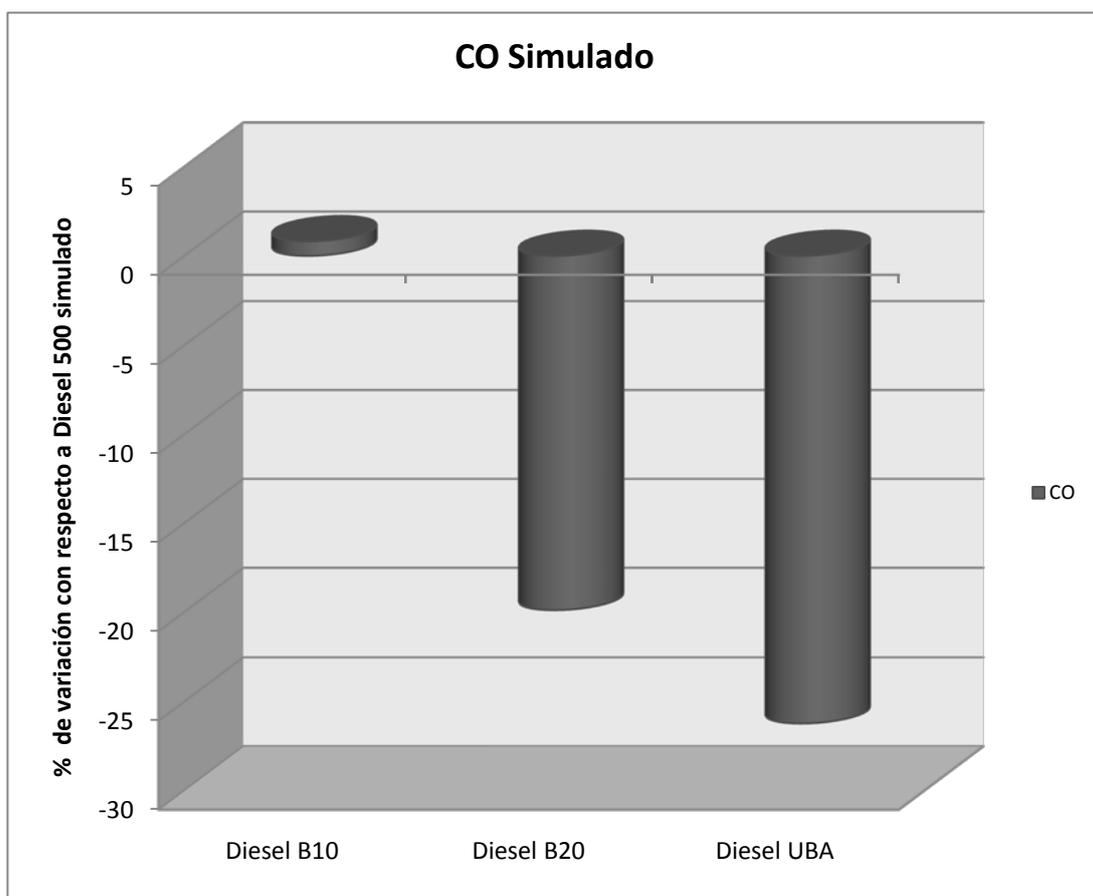
En diesel B20 y diesel UBA se observa que es la misma tendencia que la experimentación ya que cuando las emisiones aumentan experimentalmente también lo hace el simulador, en un grado menor pero consistente en la tendencia.



Gráfica 5.7 Porcentajes de disminución en las emisiones respecto a diesel 500 de HC en las simulaciones.

5.2.4 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE CO.

Las emisiones de CO en la simulación se comportaron de la siguiente manera: en el caso diesel B10 las emisiones aumentaron un 0.81%, en el diesel B20 disminuyeron un 19.89% y con diesel UBA disminuyeron en 26.22%. Aquí en todos los casos se observa que la tendencia es la misma, en el caso de B10 aumentan las emisiones y en el caso de diesel UBA y B20 bajan las emisiones con respecto al diesel 500.



Gráfica 5.8 Porcentajes de disminución en las emisiones respecto a diesel 500 de CO en las simulaciones.

En la tabla 5.1 se comparan los porcentajes de variación de emisiones con respecto al diesel 500 en la simulación y en la experimentación. Se observa la consistencia entre las simulaciones y la experimentación. Se confirma que la mayor precisión se alcanza al simular los datos de NO_x ya que los valores de disminución de emisiones con respecto a diesel 500 son prácticamente los mismos.

Porcentaje de variación	HC % (Exp)	HC % (Sim)	NO % (Exp)	NO % (Sim)	CO ₂ % (Exp)	CO ₂ % (Sim)	CO % (Exp)	CO % (Sim)
diesel B10	4,12	-0,19	-36,52	-36,19	-12,29	-6,42	1,16	0,81
diesel B20	0,94	3,06	-53,28	-54,13	-28,84	-23,65	-12,54	-19,89
diesel UBA	-1,88	-0,93	-43,67	-45,09	-38,11	-32,70	-24,95	-26,22

Tabla 5.1 Porcentaje de variación en las emisiones simuladas y experimentales con respecto a diesel 500.

5.3 COMPARACION DE RESULTADOS EXPERIMENTALES Y SIMULADOS

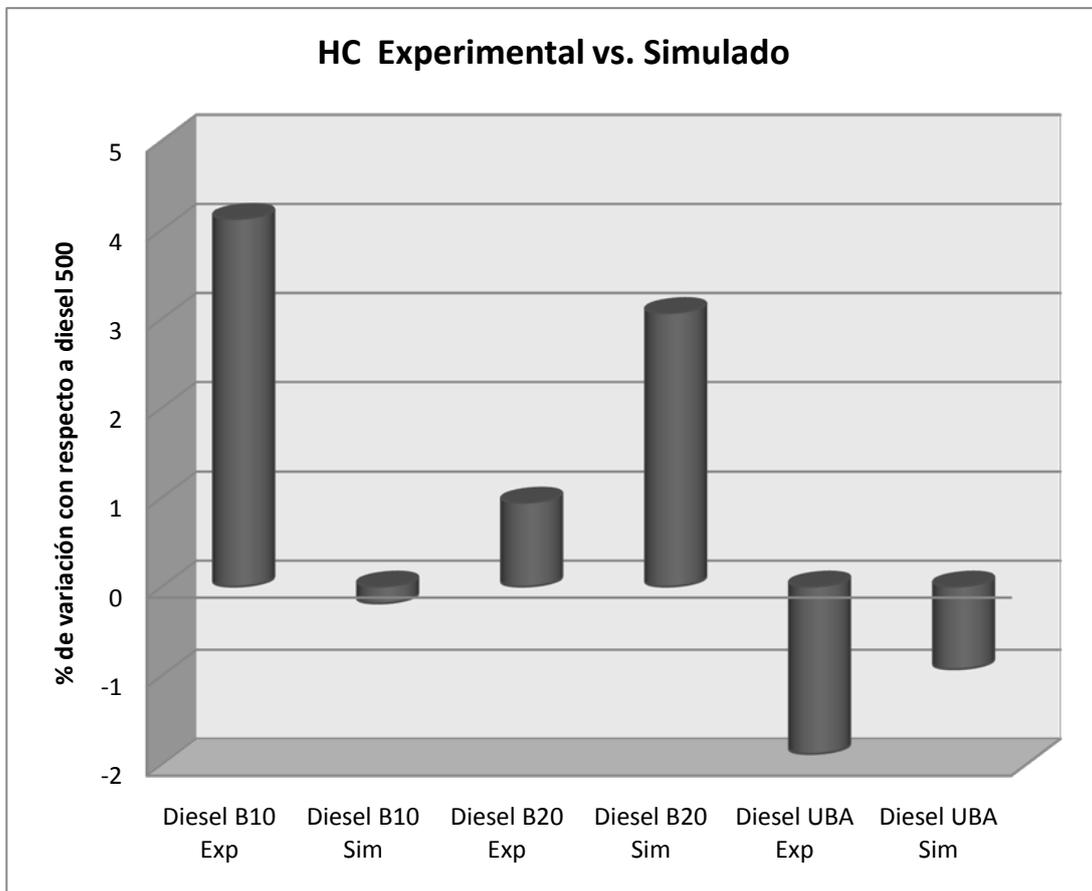
La tabla 5.1 se puede representar gráficamente para observar con más detalle la relación del porcentaje de aumento o disminución entre los resultados experimentales y los simulados.

A continuación se presentan las gráficas que combinan en la misma imagen los porcentajes de variación entre las emisiones experimentales y las emisiones de las simulaciones.

Las comparaciones que se presentan a continuación se hacen de la siguiente manera. Para el caso experimental, se compara contra el diesel 500 experimental y en el caso de las simulaciones se hacen las comparaciones con el diesel 500 simulado.

5.3.1 COMPARACION ENTRE HC EXPERIMENTAL Y SIMULADO.

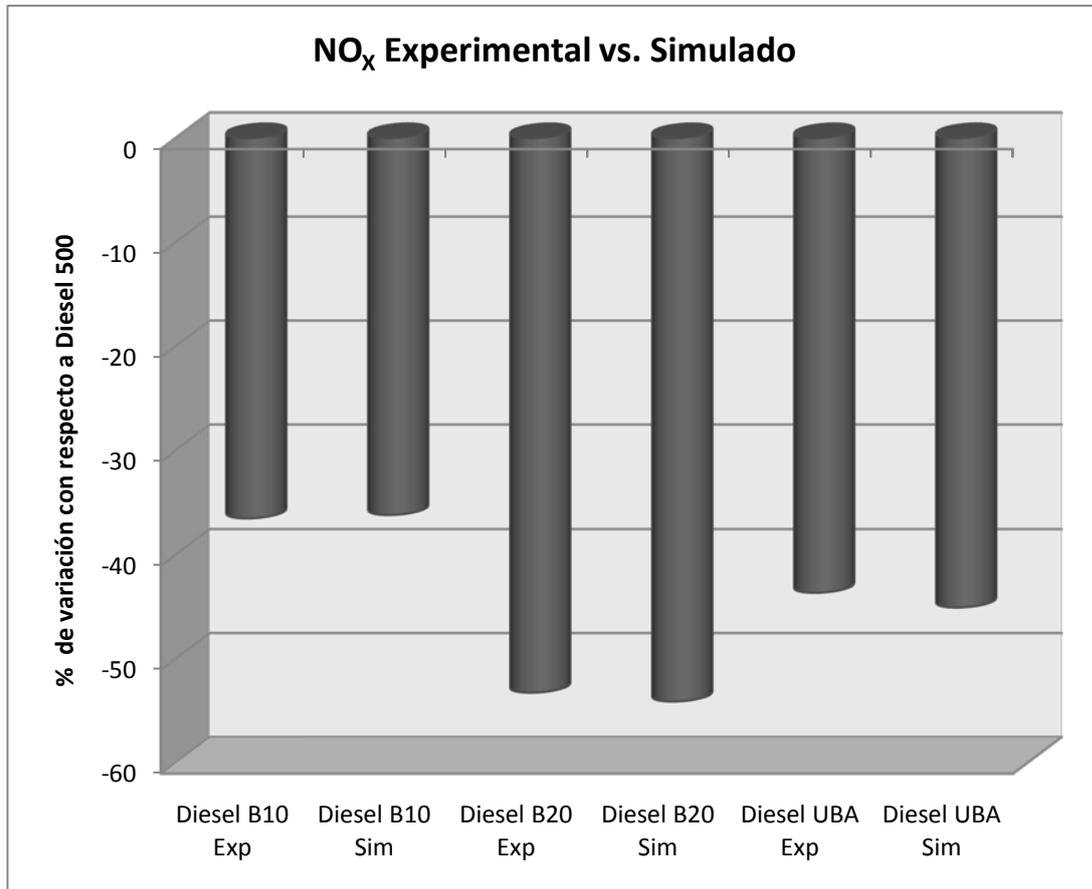
Como se observa en la gráfica 5.9 la variación en las emisiones con respecto al diesel 500 (simulado y experimental) siguen la misma tendencia, es decir, cuando en el caso experimental existe una disminución en las emisiones con respecto al diesel 500, también existe una disminución en el caso de la simulación. Se puede ver que en el caso de diesel B10 simulado y experimental presentan una tendencia de aumento al igual que el diesel B20. En el caso del diesel UBA tanto los datos experimentales como los simulados presentan una disminución con respecto al diesel 500.



Gráfica 5.9 Porcentajes combinados de disminución en las emisiones respecto a diesel 500 de HC experimentales y simulados.

5.3.2 COMPARACION ENTRE NO_x EXPERIMENTAL Y SIMULADO.

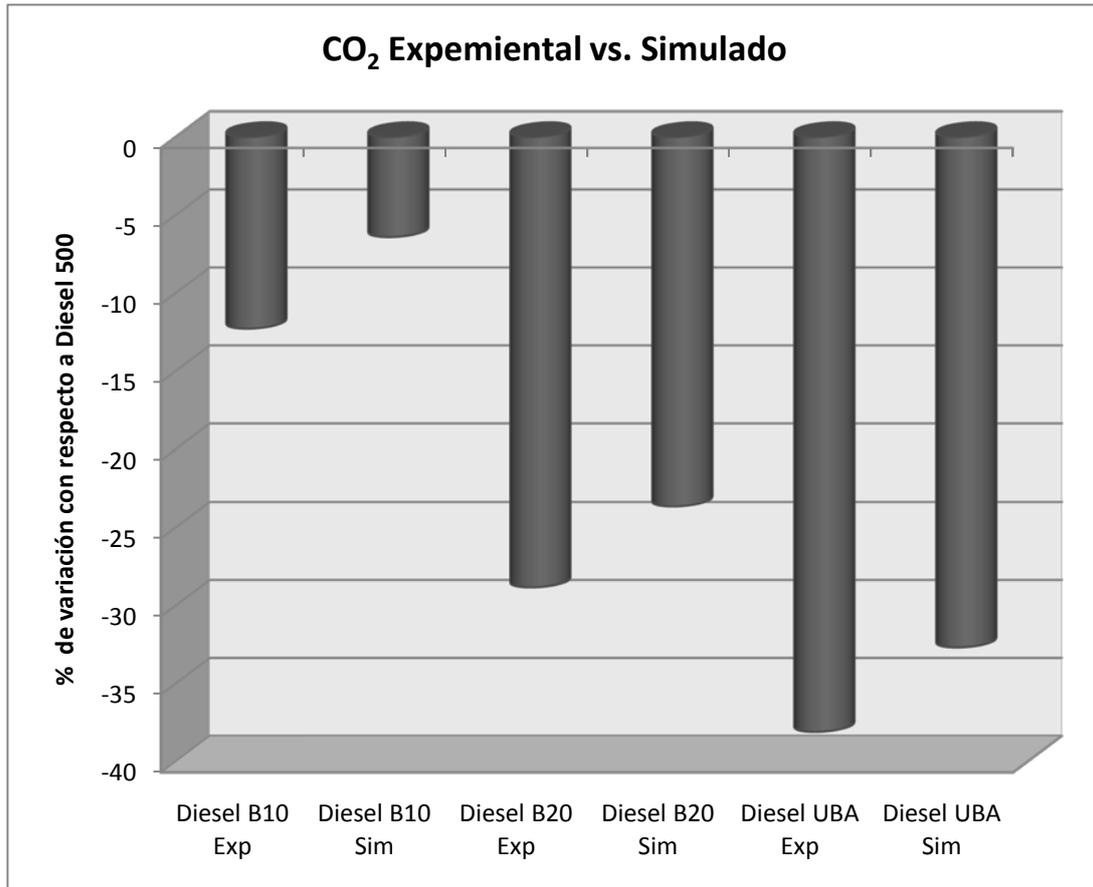
En la gráfica 5.10 los resultados de las simulaciones para NO_x son más precisos con respecto a los datos experimentales que los resultados de HC.



Gráfica 5.10 Porcentajes combinados de disminución en las emisiones respecto a diesel 500 de NO_x experimentales y simulados.

5.3.3 COMPARACION ENTRE CO₂ EXPERIMENTAL Y SIMULADO.

En la gráfica 5.11 los resultados muestran que las simulaciones de CO₂ siguen la tendencia de disminución de los datos experimentales. Aunque no son tan precisos como los resultados de NO_x se puede apreciar que la aproximación a los resultados experimentales es muy buena.

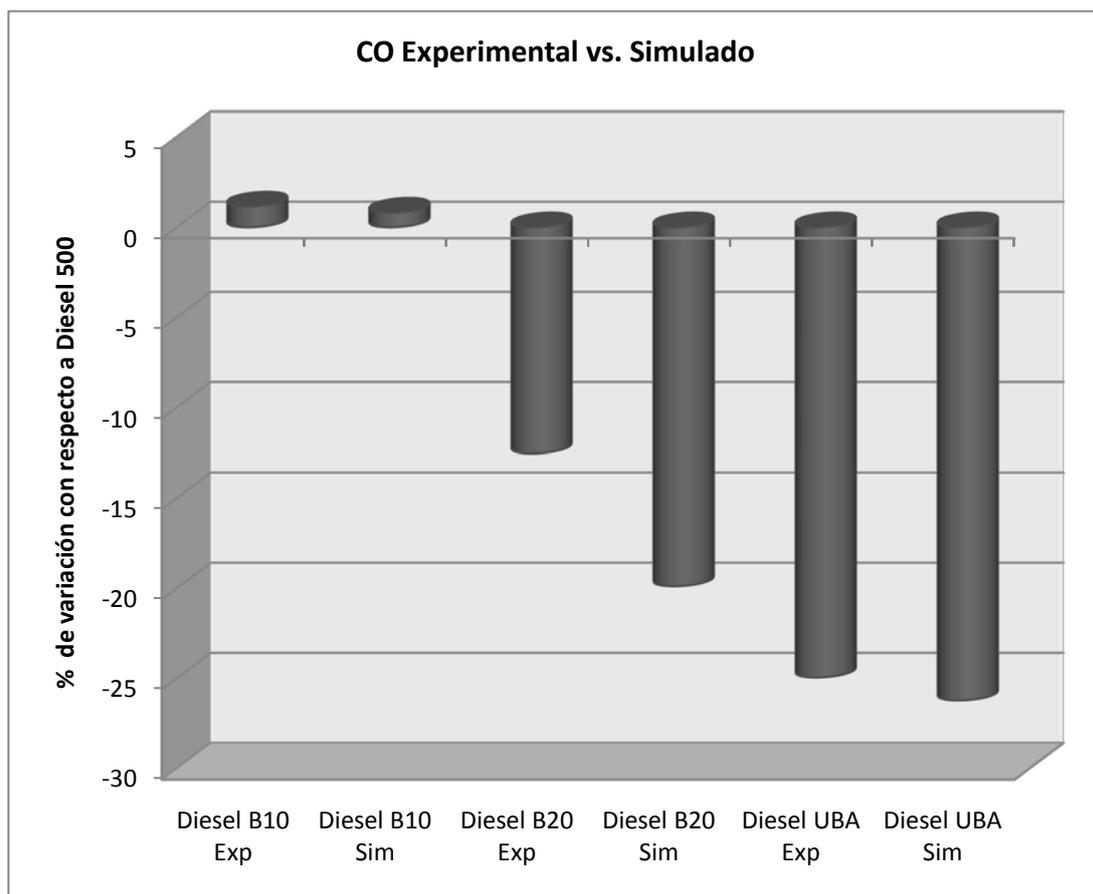


Gráfica 5.11 Porcentajes combinados de disminución en las emisiones respecto a diesel 500 de CO₂ experimentales y simulados.

5.3.4 COMPARACION ENTRE CO EXPERIMENTAL Y SIMULADO.

La gráfica 5.12 muestra los resultados de la simulación de CO. Se puede apreciar que en el caso de B10 se presenta la misma tendencia de aumento. En el caso de B20 hay una pequeña diferencia entre el caso de la simulación y la experimentación ya que la disminución de emisiones en la simulación es más pronunciada que para el caso de los datos experimentales. Sin embargo la tendencia es la misma.

En el caso del diesel UBA las diferencias entre el caso simulado y el caso experimental es de solo 1.27%.



Gráfica 5.12 Porcentajes combinados de disminución en las emisiones respecto a diesel 500 de CO experimentales y simulados.

5.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Los resultados obtenidos en las simulaciones representan, con una diferencia promedio de 2.95%, las mediciones realizadas en las campañas de medición. El error en las simulaciones es influenciado directamente por el buen o mal funcionamiento del equipo de medición de emisiones. Como se explicó anteriormente en este trabajo, el PEMS utilizado realizaba las mediciones de manera intermitente durante su operación. Esta intermitencia hizo obligatoria la realización de un sesgo de datos que finalmente afectó la continuidad de los datos recolectados de revoluciones del motor, velocidad del vehículo, datos del GPS y emisiones. La continuidad de los datos recolectados en las mediciones es crucial para la creación de los mapas T-R-E y si esos datos presentan saltos, estos se verán reflejados en las simulaciones, en algunos casos un salto de 2% en las mediciones experimentales puede incrementarse en 5% al realizar la simulación debido al error intrínseco del simulador.

En cuanto a las emisiones de los combustibles evaluados, se puede ver que el diesel UBA es la mejor opción si se quiere reducir las emisiones de CO, CO₂ y HC, y esto fue representado satisfactoriamente en las simulaciones. El biodiesel B20 resultó el mejor combustible para reducir las emisiones de NO_x esto también se vio reflejado en las simulaciones de manera consistente.

6. CONCLUSIONES

- En este trabajo se evaluaron las emisiones de un camión de reparto utilizando mezclas de biodiesel, diesel UBA y diesel 500. Posteriormente se simularon esas emisiones con la finalidad de crear una metodología que pudiera representar esas emisiones bajo diferentes tipos de condiciones de manejo, componentes del vehículo, recorridos y pendientes.
- Se logró simular satisfactoriamente un vehículo diesel, se constató que el simulador vehicular funciona bien, siempre y cuando los datos con los que se cuenta para hacer la simulación no tengan saltos en las emisiones, velocidad del motor y del vehículo.
- El uso de combustibles alternos reducen en gran medida las emisiones y aunque la mejor opción en cuanto a la reducción de emisiones fue un combustible derivado del petróleo (diesel UBA), los biocombustibles utilizados demostraron que pueden disminuir las emisiones del diesel convencional de manera significativa.
- El diesel UBA redujo las emisiones de HC en 1.88%, CO₂ en 38.11%, CO en 24.95% y NO_x en 43.67%. De los biocombustibles utilizados el mejor posicionado fue diesel B20 ya que redujo las emisiones de HC en 0.94, CO₂ en 28.84%, CO en 12.54% y NO_x que resultó ser el valor más bajo de todas las pruebas con un 53.28% de reducción.
- Los biocombustibles utilizados contenían un aditivo destinado a reducir las emisiones de NO_x ya que al utilizar diesel de origen vegetal o animal las emisiones de NO_x aumentan en gran manera con respecto al diesel convencional. Se confirmó que el aditivo reduce satisfactoriamente las emisiones de NO_x, incluso en mayor medida que el diesel UBA.

- Otro aspecto en que el diesel UBA es una mejor opción, es en lo referente a su precio comercial. Como ejemplo, en los Estados Unidos de América este combustible se comercializa casi al mismo precio que el diesel convencional.

- La simulación de emisión de gases criterio muestra que pueden ser una buena referencia si se desean hacer inventarios de emisiones y diseñar nuevas rutas de transporte público. Además, el uso del simulador nos proporciona una gran ventaja en cuanto al análisis de emisiones ya que se pueden evaluar distintos parámetros y su efecto en las emisiones obtenidas como modificar el radio de la rueda, el área frontal del vehículo, el peso del vehículo y el peso de su carga. Además las emisiones se pueden localizar puntualmente con el uso del GPS. Esta es una característica muy importante para evaluar el efecto de condiciones del terreno como topes, baches y pendientes en las emisiones del vehículo.

- Las perspectivas para continuar con estas investigaciones incluirían el uso de un nuevo equipo PEMS que podrá medir emisiones de $PM_{2.5}$. Se piensa medir y simular emisiones de motores Diesel de reciente tecnología automotriz (Mercedes Benz Bluetech), y de autobuses modernos, así como mezclas de etanol en motores de chispa.

7. BIBLIOGRAFÍA

Ambiente, Secretaría.(2008). *Inventario de emisiones contaminantes criterio de la ZMVM 2008*. Mexico, Consulta electrónica, www.sma.df.gob.mx/inventario_emisiones/index.php (septiembre 2010).

Ambiente, Secretaría.(2008). *Inventario de emisiones de gases tóxicos 2008*. Mexico, Consulta electrónica, www.sma.df.gob.mx/inventario_emisiones/index.php (septiembre 2010)

Ambiente, Secretaría.(2008). *Inventario de gases de efecto invernadero y gases tóxicos 2008* . Mexico, Consulta electrónica, www.sma.df.gob.mx/inventario_emisiones/index.php (septiembre 2010)

Diego Ayala, U. (2007). An Investigation on Hybrid Power Trains For Vehicles With Regenerative Braking. PhD Thesis. Department of Mechanical Engineering, *London Imperial College pp 29-32,57-96,122-161,213-221*.

OLADE (2008) Organización Latinoamericana de Energía. Introducción al tema de Biocombustibles.pp 1-8.

Energía, Secretaría. (2008). SENER, Estimación de Reservas de Hidrocarburos. Consulta electrónica http://www.energia.gob.mx/portal/hidrocarburos_2.html (septiembre, 2010)

Etzel, R. (1999). *Handbook of Pediatric Enviromental Health*. pp 2-7 American Academy of Pediatrics Comitee on Enviromental Health.

Fangrui, Ma. (1999). Biodiesel Production: a review. pp 1-15. *Elsevier Science B.V* .

García Fragoso, A. (2008). Un modelo de emisiones de alta resolución temporal y espacial usando un simulador de automóviles, pp 15-30, 45-60. *Tesis de maestría*. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México.

Honeywell International Inc. (2006). User's Manual.

Jasinski, P. (2006), Solid-State Electrochemical Gas Sensors. ChemInform, volumen 37. pp 269-278. October 31, 2006.

Miguel Rico, S. X. (2010). Cuantificación de Emisiones de Biodiesel en un Camión de Transporte de Carga en la ZMVM, pp 9-11, 13-19, 40-48. *Tesis de Licenciatura*. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México.

Perkins Engines, C. (2006). Engine Genetics. Technical Articles. <http://www.perkins.com/articles>. (diciembre, 2010)

Siuro, B. (2007). The Difference Between diesel and Gasoline Engines. *Green Car Journal*. <http://www.greencar.com/articles/diference-between-diesel-gasoline-engines.php> (noviembre, 2010)

Tech, I. L. (septiembre de 2010). www.intl-lighttech.com.

USEPA. (2010). U.S Environmental Protection Agency. <http://www.epa.gov>. (octubre 2010)

Martinez, M. A. (2002). *El diesel*. (PEMEX Refinacion) Retrieved Junio 15, 2010, from <http://www.ref.pemex.com/octanaje/24DIESEL.htm>

Nissan mexicana 2011. Consulta electrónica <http://www.nissan.com.mx/>, enero 2011.

Volkswagen de México 2011. Consulta electrónica <http://www.vw.com.mx>, enero 2011.

ANEXO 1. NORMATIVIDAD MEXICANA PARA VEHÍCULOS DIESEL

La normatividad aplicable a los vehículos que usan diesel como combustible, en términos de impacto al medio ambiente, está establecida por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

- **NOM-044-SEMARNAT-1993.**
Que establece los niveles máximos permisibles de emisión de hidrocarburos, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, partículas suspendidas totales y opacidad de humo provenientes del escape de motores nuevos que usan diesel como combustible y que se utilizarán para la propulsión de vehículos automotores con peso bruto vehicular mayor de 3,857 kilogramos.
- **NOM-045-SEMARNAT-1996.**
Que establece los niveles máximos permisibles de opacidad del humo proveniente del escape de vehículos automotores en circulación que usan diesel ó mezclas que incluyan diesel como combustible.
- **NOM-077-SEMARNAT-1995.**
Que establece el procedimiento de medición para la verificación de los niveles de emisión de la opacidad del humo proveniente del escape de los vehículos automotores en circulación que usan diesel como combustible.
- **PROY-NOM-042-SEMARNAT-2003.**
Que establece los límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos no metano, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas provenientes del escape de los vehículos automotores nuevos cuyo peso bruto vehicular no exceda los 3,857 kilogramos, que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y diesel, así como de las emisiones de hidrocarburos evaporativos provenientes del sistema de combustible de dichos vehículos.