

# **ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO**

## **DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA**

### **ESTUDIO DE LA MEZCLA ÓPTIMA DIESEL – ACEITE DE PALMA USADA COMO COMBUSTIBLE DE UN MOTOR A DIESEL**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO**

Desarrollado por:

**Francisco José Rodríguez Guerra  
Oscar Javier Yépez Tamayo**

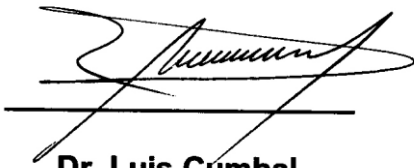
**DIRECTOR: DR. LUIS CUMBAL**

**CODIRECTOR: ING. JOSÉ GUASUMBA**

**Sangolquí, 2007 – 05 – 28**

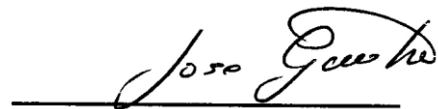
## CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “ESTUDIO DE LA MEZCLA ÓPTIMA DIESEL – ACEITE DE PALMA, USADA COMO COMBUSTIBLE DE UN MOTOR A DIESEL” fue realizado- en su totalidad - por Francisco José Rodríguez Guerra y Oscar Javier Yépez Tamayo, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingenieros Mecánicos.



**Dr. Luis Cumbal**

**DIRECTOR**



**Ing. José Guasumba**

**CODIRECTOR**


**Sangolquí, 2007 – 05 – 28**

## LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

“ESTUDIO DE LA MEZCLA ÓPTIMA DIESEL – ACEITE DE PALMA  
USADA COMO COMBUSTIBLE DE UN MOTOR A DIESEL”

ELABORADO POR:

  
Francisco J. Rodríguez G.

  
Oscar J. Yépez T.

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

  
Ing. Juan Díaz  
COORDINADOR DE CARRERA



Sangolquí, 2007 – 05 – 28

## DEDICATORIA

A mis padres Manuel y Rocío, por el apoyo incondicional que siempre me han brindado; por educarme con principios morales y éticos que he sido capaz de aplicarlos a lo largo de mi vida; por los consejos que me han dado; por ayudarme a desarrollar un pensamiento creativo y una capacidad de análisis que han sido de gran ayuda durante mi carrera.

A mis hermanas Verónica y Alexandra, por el apoyo solidario que siempre me han ofrecido, por ser un buen ejemplo de superación y éxito y por compartir conmigo gratos momentos a lo largo de mi vida.

A mis amigos y compañeros que me han acompañado y ayudado durante todos estos años de estudio y con quienes espero mantener una amistad eterna.

A mí, por todo el esfuerzo que he hecho para cumplir con mis objetivos académicos hasta la fecha.

Francisco Rodríguez

A mi familia que ha creído siempre en mí y me ha apoyado, incluso cuando parecía que este proyecto no salía adelante y sobretodo a mi padre que a pesar de la distancia me ha hecho sentir todo su cariño, llevándome a cumplir esta etapa de mi vida.

A mi compañero y amigo Francisco Rodríguez porque sin su aliento y esfuerzo esto no hubiese sido una realidad.

A Dios porque me ha dado esa fuerza que se necesita para salir adelante y nunca ha dejado de escucharme y apoyarme en todo el difícil camino que ahora concluye.

Oscar Yépez

## AGRADECIMIENTOS

A nuestro director, el Dr. Luis Cumbal, por habernos transmitido sus conocimientos y guiarnos de la mejor manera a lo largo de todo este camino.

A nuestro co-director, el Ing. Luis Guasumba, por creer en nosotros y en nuestro trabajo.

A la Carrera de Ingeniería Mecánica, por proporcionarnos toda su ayuda y recursos para la realización de este proyecto, pero muy especialmente al Ingeniero Alberto Naranjo por habernos dado su ayuda incondicional, por enseñarnos más cada día y ayudarnos a comprender que la perseverancia siempre producirá frutos.

A la Facultad de Ingeniería en Petróleos de la Universidad Central del Ecuador, por habernos extendido la mano en todo momento y muy en especial a los Ingenieros Luis Calle y Jorge Medina

A la CORPAIRE por colaborarnos con la realización de las pruebas de emisiones de gases con la prestación de equipos y de personal capacitado. En especial se agradece a los Ingenieros Edwin Cárdenas y Roberto Custode.

Al Ing. Vicente Landázuri de la empresa DANEC S.A. por auspiciar y creer en la calidad y proyección de este estudio, por su calidad humana y generoso apoyo.

Al Economista Esteban Vega por su colaboración con el análisis estadístico de los datos obtenidos.

A todos aquellos que de una u otra manera han hecho posible que este proyecto de grado sea una realidad.

Francisco Rodríguez y Oscar Yépez

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>RESUMEN</b> .....	xiii
<b>NOMENCLATURA</b> .....	xv
<b>1 GENERALIDADES</b>	
Antecedentes.....	1
Definición del problema.....	2
Objetivos.....	2
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos.....	3
Alcance.....	3
Justificación e importancia.....	3
<b>2 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE</b>	
El diesel.....	5
El aceite de palma.....	6
La palma.....	7
El aceite de palma en el Ecuador.....	8
Proceso de refinación físico – químico.....	9
El biodiesel.....	10
Proceso productivo del biodiesel.....	10
Propiedades del biodiesel.....	12
Rendimiento de los motores al usar biodiesel.....	20
Emisiones.....	23
Estado del arte.....	29
Normativas para el biodiesel.....	35
Normas ambientales respecto a los gases producto de la combustión en automotores a diesel.....	36
<b>3 METODOLOGÍA Y EQUIPAMIENTO</b>	
Ensayos de caracterización para combustibles.....	39
Densidad API.....	39
Viscosidad cinemática.....	41
Punto de inflamación.....	42
Destilación ASTM.....	44
Número de cetano.....	46
Poder calórico.....	46
Punto de nebulización y de vertido.....	49
Pruebas de rendimiento a velocidad variable.....	51
Medición de los parámetros de desempeño.....	51
Medición de las emisiones de gases de escape.....	53

<b>4</b>	<b>RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN</b>	
	Densidad.....	57
	Viscosidad Cinemática.....	58
	Punto de inflamación.....	58
	Destilación ASTM.....	59
	Número de cetano.....	60
	Poder calórico.....	60
	Punto de nebulización y de vertido.....	61
<b>5</b>	<b>ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DE DESEMPEÑO DE UN MOTOR DIESEL Y DE LAS EMISIONES DE GASES CONTAMINANTES DEBIDO AL USO DE MEZCLAS DIESEL-ACEITE DE PALMA COMO COMBUSTIBLE</b>	
	Evaluación en condiciones estándar de un motor Diesel.....	63
	Potencia al freno y torque.....	66
	Consumo másico de combustible.....	70
	Consumo específico de combustible.....	73
	Consumo másico de aire.....	75
	Relación aire – combustible.....	77
	Eficiencia térmica.....	80
	Temperatura de los gases de escape.....	82
	Eficiencia volumétrica.....	84
	Pruebas de emisiones de gases contaminantes.....	86
	Emisiones de CO <sub>2</sub> y de O <sub>2</sub> .....	87
	Emisiones de CO.....	90
	Emisiones de THC.....	93
	Emisiones de NO <sub>x</sub> .....	95
	Emisiones de PM.....	96
<b>6</b>	<b>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS</b>	
	Parámetros de desempeño.....	99
	Análisis del torque, potencia y consumo másico de combustible.....	99
	Análisis del CEC y de la eficiencia térmica.....	101
	Análisis del consumo másico de aire, de la relación A/C y de la eficiencia volumétrica.....	101
	Análisis de la temperatura de los gases de escape.....	103
	Emisiones de gases contaminantes.....	103
	Análisis de las emisiones de CO <sub>2</sub> y de O <sub>2</sub> .....	104
	Análisis de las emisiones de CO.....	106
	Análisis de las emisiones de THC.....	107
	Análisis de las emisiones NO <sub>x</sub> .....	108
	Análisis de las emisiones de PM.....	109
	Determinación de la mezcla óptima.....	111
<b>7</b>	<b>ANÁLISIS ECONÓMICO</b>	
	Personal.....	113
	Misceláneos.....	113
	Costos directos.....	113

Honorarios a profesionales.....	113
Honorarios a estudiantes.....	114
Adquisición de materiales.....	114
Costos de ensayos y de pruebas de laboratorio.....	114
Costo total.....	115
<b>8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	
Conclusiones.....	117
Recomendaciones.....	118
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>119</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>I</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Emisiones por fuentes a diesel en Quito en el año 2003.....	4
Tabla 2.1 Especificaciones para el diesel 2.....	5
Tabla 2.2 Composición del aceite de palma.....	7
Tabla 2.3 Propiedades de combustión de algunos biodiesel.....	15
Tabla 2.4 Emisiones promedio para biodiesel comparado con el diesel 2 según la EPA .....	28
Tabla 2.5 Producción de biodiesel (año 2000).....	32
Tabla 2.6 Norma ASTM D 6751-03 <sup>a</sup> .....	35
Tabla 2.7 Límites máximos de emisiones permitidos para fuentes móviles con motor diesel.....	36
Tabla 2.8 Límites de opacidad permitidos para fuentes móviles con motor a diesel.....	37
Tabla 3.1 Condiciones limitantes y temperaturas de prueba.....	39
Tabla 5.1 Datos de rendimiento para el diesel ecuatoriano.....	63
Tabla 5.2 Parámetros de rendimiento para el diesel ecuatoriano.....	66
Tabla 5.3 Datos de emisiones para el diesel ecuatoriano.....	86
Tabla 6.1 Probabilidades de dependencia.....	100
Tabla 7.1 Costos misceláneos.....	113
Tabla 7.2 Costos referentes a los honorarios a profesionales.....	113
Tabla 7.3 Costos referentes a la remuneración de estudiantes.....	114
Tabla 7.4 Costos de los materiales adquiridos.....	114
Tabla 7.5 Costos de ensayos y pruebas realizadas en laboratorio.....	114

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Emisiones promedio para biodiesel comparado con el diesel 2 según la EPA.....	4
Figura 2.1 Reacción de transesterificación.....	11
Figura 2.2 Diagrama del proceso productivo del biodiesel con un catalizador básico.....	12
Figura 2.3 Composición de varios aceites vegetales.....	13
Figura 2.4 Propiedades de fluidez a bajas temperaturas para varias mezclas.....	18
Figura 2.5 Variación de la lubricidad para varios biodiesel.....	22
Figura 2.6 Variación de las emisiones de NOx con el grado de instauración.....	25
Figura 2.7 Cambio en las emisiones de PM con y sin catalizador oxidante.....	26
Figura 2.8 Impacto promedio de las emisiones de biodiesel en motores CI.....	28
Figura 3.1 Hidrómetro ASTM H4.....	40
Figura 3.2 Viscosímetro Canon - Fenske para líquidos transparentes.....	41
Figura 3.3 Baño (Laboratorio de petróleos de la Universidad Central del Ecuador).....	42
Figura 3.4 Copa de Pensky-Matters.....	43
Figura 3.5 Balón de destilación.....	45
Figura 3.6 Equipo de destilación ASTM.....	45
Figura 3.7 Bomba de calor.....	48
Figura 3.8 Bomba calorimétrica adiabática.....	48
Figura 3.9 Muestra de diesel ecuatoriano congelada.....	50
Figura 3.10 Sistema de medición del consumo de combustible.....	53
Figura 3.11 Equipo Clean AIR Technologies perteneciente a la CORPAIRE.....	55
Figura 4.1 Variación de la densidad con la concentración.....	57
Figura 4.2 Variación de la viscosidad cinemática con la concentración.....	58
Figura 4.3 Variación del punto de inflamación con la concentración.....	58
Figura 4.4 Curva de destilación para mezclas con diesel ecuatoriano.....	59
Figura 4.5 Curva de destilación para mezclas con diesel colombiano.....	59
Figura 4.6 Variación porcentual de las temperatura de destilación desde T10 hasta T90....	60
Figura 4.7 Variación del número de cetano con la concentración.....	60
Figura 4.8 Variación del poder calórico superior con la concentración.....	61
Figura 4.9 Variación del punto de nebulización y de vertido con la concentración.....	61
Figura 5.1 Curva comparativa del torque para mezclas con diesel ecuatoriano.....	67
Figura 5.2 Curva comparativa del torque para mezclas con diesel colombiano.....	67
Figura 5.3 Curva comparativa de la potencia para mezclas con diesel ecuatoriano.....	68
Figura 5.4 Curva comparativa de la potencia para mezclas con diesel colombiano.....	68
Figura 5.5 Variación porcentual del torque y de la potencia entre las 1650 y 1970 rpm.....	69
Figura 5.6 Variación porcentual del torque y de la potencia entre las 1650 y 1810 rpm.....	69
Figura 5.7 Variación de la potencia al freno y del torque a diferentes velocidades.....	70
Figura 5.8 Curva comparativa del <i>mc</i> para mezclas con diesel ecuatoriano.....	71
Figura 5.9 Curva comparativa del <i>mc</i> para mezclas con diesel colombiano.....	71
Figura 5.10 Variación porcentual del <i>mc</i> entre las 1650 y 1950 rpm.....	72
Figura 5.11 Variación del consumo másico de combustible a diferentes velocidades.....	72
Figura 5.12 Curva comparativa del <i>CEC</i> para mezclas con diesel ecuatoriano.....	73
Figura 5.13 Curva comparativa del <i>CEC</i> para mezclas con diesel colombiano.....	73
Figura 5.14 Variación porcentual del <i>CEC</i> entre las 1650 y 1910 rpm.....	74
Figura 5.15 Variación del <i>CEC</i> a diferentes velocidades.....	75
Figura 5.16 Curva comparativa del <i>ma</i> para mezclas con diesel ecuatoriano.....	75
Figura 5.17 Curva comparativa del <i>ma</i> para mezclas con diesel colombiano.....	76
Figura 5.18 Variación porcentual del <i>ma</i> entre las 1650 y 1950 rpm.....	76
Figura 5.19 Variación del <i>ma</i> a diferentes velocidades.....	77

Figura 5.20 Curva comparativa de la $A/C$ para mezclas con diesel ecuatoriano.....	78
Figura 5.21 Curva comparativa del $A/C$ para mezclas con diesel colombiano.....	78
Figura 5.22 Variación porcentual de la relación $A / C$ entre las 1650 y 1810 rpm.....	79
Figura 5.23 Variación de la relación $A/C$ a diferentes velocidades.....	79
Figura 5.24 Curva comparativa de la $\eta_t$ para mezclas con diesel ecuatoriano.....	80
Figura 5.25 Curva comparativa de la $\eta_t$ para mezclas con diesel colombiano.....	80
Figura 5.26 Variación porcentual de la eficiencia térmica entre las 1650 y 1910 rpm.....	81
Figura 5.27 Variación de la eficiencia térmica a diferentes velocidades.....	81
Figura 5.28 Curva comparativa de la $Te$ para mezclas con diesel ecuatoriano.....	82
Figura 5.29 Curva comparativa del $Te$ para mezclas con diesel colombiano.....	82
Figura 5.30 Variación porcentual de la $Te$ entre las 1650 y 1810 rpm.....	83
Figura 5.31 Variación de la $Te$ a diferentes velocidades.....	84
Figura 5.32 Curva comparativa de la $\eta_v$ para mezclas con diesel ecuatoriano.....	84
Figura 5.33 Curva comparativa de la $\eta_v$ para mezclas con diesel colombiano.....	85
Figura 5.34 Variación porcentual de la $\eta_v$ entre las 1650 y 1950 rpm.....	85
Figura 5.35 Variación de la eficiencia volumétrica a diferentes velocidades.....	86
Figura 5.36 Curva comparativa de $O_2$ y $CO_2$ para mezclas con diesel ecuatoriano.....	87
Figura 5.37 Curva comparativa de $O_2$ y $CO_2$ para mezclas con diesel colombiano.....	87
Figura 5.38 Variación porcentual del $O_2$ entre las 1750 y 1960 rpm.....	88
Figura 5.39 Variación del $O_2$ a diferentes velocidades.....	89
Figura 5.40 Variación porcentual del $CO_2$ entre las 1750 y 1960 rpm.....	89
Figura 5.41 Variación del $CO_2$ a diferentes velocidades.....	90
Figura 5.42 Curva comparativa de $CO$ para mezclas con diesel ecuatoriano.....	91
Figura 5.43 Curva comparativa de $CO$ para mezclas con diesel colombiano.....	91
Figura 5.44 Variación porcentual del $CO$ entre las 1750 y 1960 rpm.....	92
Figura 5.45 Variación del $CO$ a diferentes velocidades.....	92
Figura 5.46 Curva comparativa del $THC$ y $NOx$ para mezclas con diesel ecuatoriano.....	93
Figura 5.47 Curva comparativa del $THC$ y $NOx$ para mezclas con diesel colombiano.....	93
Figura 5.48. Variación porcentual del $THC$ entre las 1750 y 1960 rpm.....	94
Figura 5.49 Variación del $THC$ a diferentes velocidades.....	94
Figura 5.50 Variación porcentual de los $NOx$ entre las 1750 y 1960 rpm.....	95
Figura 5.51 Variación del $NOx$ a diferentes velocidades.....	96
Figura 5.52 Curva comparativa del $PM$ para mezclas con diesel ecuatoriano.....	97
Figura 5.53 Curva comparativa del $PM$ para mezclas con diesel colombiano.....	97
Figura 5.54 Variación porcentual del $PM$ entre las 1750 y 1960 rpm.....	98
Figura 5.55 Variación del $PM$ a diferentes velocidades.....	98
Figura 6.1 Áreas de incremento y de decremento de potencia.....	100
Figura 6.2 Variación porcentual del $CO_2$ con ajuste polinómico de tercer grado.....	105
Figura 6.3 Variación porcentual del $O_2$ con ajuste polinómico de tercer grado.....	105
Figura 6.4 Variación porcentual del $O_2$ con ajuste polinómico de segundo grado.....	108
Figura 6.5 Comparación de la reducción porcentual del $PM$ .....	111

## ÍNDICE DE ANEXOS

A:	Definiciones.....	<b>II</b>
B:	Ecuaciones de combustión para el diesel ecuatoriano, colombiano y sus mezclas .....	<b>X</b>
C:	Hoja de datos técnicos del banco de pruebas PLINT TE-16 perteneciente al laboratorio de motores de combustión interna de la carrera de Ingeniería Mecánica de la ESPE .....	<b>XIII</b>
D:	Tablas de datos de los ensayos de caracterización realizados en el laboratorio de Petróleos de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Central del Ecuador .....	<b>XIV</b>
E:	Tablas de datos obtenidos en las pruebas de rendimiento.....	<b>XXXIII</b>
F:	Tablas de cálculos de los parámetros de desempeño.....	<b>XXXIV</b>
G:	Tablas de datos obtenidos en las pruebas de emisiones.....	<b>XLV</b>

## RESUMEN

Este estudio pretende determinar y caracterizar la mezcla óptima diesel –aceite de palma para utilizarla como combustible en un motor diesel. Actualmente, el uso de los bio-combustibles están en auge en respuesta a los altos precios del petróleo y a las ventajas ambientales que estos brindan. Los oxigenados, como el biodiesel, son conocidos por su efecto en la reducción de emisiones por material particulado. El Ecuador es el segundo productor de aceite de palma en América, lo que muestra el gran potencial que tiene este país para la producción de bio-combustibles.

Las mezclas usadas en la experimentación se obtuvieron combinando diesel ecuatoriano y colombiano convencionales y varias dosificaciones de aceite de palma suministrado por DANEC S.A. Para llevar a cabo la evaluación de la mezclas, inicialmente se determinaron sus propiedades físico-químicas, aplicando los métodos recomendados por la ASTM. Las propiedades en análisis son la densidad API, viscosidad cinemática, destilación ASTM, punto de inflamación, número de cetano, poder calórico y puntos de nebulización y de vertido. Los parámetros de rendimiento y las emisiones se evaluaron en un motor a diesel del banco de pruebas PLINT TE-16 del Laboratorio de Motores de la ESPE. Para estas pruebas se usaron mezclas diesel-aceite de palma de 95:5, 90:10, 85:15, 80:20, 75:25 y 70:30%. Entre los parámetros analizados están la potencia, torque, consumo másico y específico de combustible, consumo másico de aire, relación aire - combustible, temperatura de los gases de escape y eficiencias térmica y volumétrica. Las emisiones de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), oxígeno (O<sub>2</sub>), hidrocarburos totales (THC), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y material particulado se cuantificaron con un equipo de medición de gases portátil CLEAN AIR perteneciente a la CORPAIRE.

Los resultados de los ensayos indican que el torque y potencia máxima se reducen aproximadamente en 0,85% por cada 5% de aceite de palma añadido al diesel puro. Por el contrario, el consumo másico de combustible se incrementa en 1%. En general, se observan reducciones hasta del 10,5% en

las emisiones de particulados y 22% en la concentración de CO. En contraste, se advierten incrementos de THC en el 27% y de NOx en el 7%. Adicionalmente, de las pruebas con el motor a diesel, se deduce que es necesario calentar las mezclas concentradas debido a su elevada viscosidad y alto punto de nebulización. La mezcla al 10% con ambos diesel, fue la que presentó las mejores propiedades de desempeño en comparación a la disminución de emisiones. Los resultados de la presente investigación sugieren que se podría utilizar este bio-combustible en motores a diesel sin embargo es necesario controlar la temperatura de combustión para evitar el incremento de los NOx.

## NOMENCLATURA

**ASTM:** American Society for Testing and Materials

(Asociación Americana para Ensayos y Materiales).

**NBB:** National Biodiesel Board (Junta Nacional del Biodiesel).

**CFPP:** Cold Filter plugging point (Punto de Taponamiento del Filtro Frío).

**CO:** Monóxido de Carbono.

**CO<sub>2</sub>:** Dióxido de Carbono.

**CORPAIRE:** Corporación para el mejoramiento de aire de Quito.

**EPA:** Environmental Protection Agency

(Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos).

**DOE:** Department Of Energy (Departamento de Energía de los Estados Unidos)

**IFP:** Instituto Francés de Petróleos.

**INEN:** Instituto Ecuatoriano de Normalización

**INTI:** Instituto Nacional de Tecnología Industrial (Argentina)

**IRAM:** Instituto Argentino de Normalización y Certificación

**nPAH:** Hidrocarburos Nitro-poliaromáticos.

**N<sub>2</sub>:** Nitrógeno.

**O<sub>2</sub>:** Oxígeno

**PAH:** Hidrocarburos poliaromáticos.

**PM:** Material Particulado Total.

**SOF:** Soluble Organic Fracción (Fracción Orgánica Soluble y Volátil).

**SO<sub>x</sub>:** Óxidos de Azufre

**TBHQ:** Butilhidroquinona Terciaria.

**THC:** Total de Hidrocarburos no quemados.





# CAPÍTULO 1

## GENERALIDADES

### 1.1 ANTECEDENTES

En la actualidad uno de los problemas más graves dentro de una ciudad como Quito, son las emisiones de gases de escape de los vehículos que circulan a diario por las calles. Es así como los diferentes gobiernos y entre estos, el de nuestro país, se encuentran buscando posibles soluciones a este grave problema. Tecnologías modernas como; los sistemas con inyección electrónica de alta presión y sistemas de monitoreo del desempeño del motor y de sus emisiones, diseño de pistones articulados y anillos reforzados, diseño de cámaras de combustión con mayor número de válvulas, sistemas de sobrealimentación con tecnología avanzada, catalizadores más eficientes, entre otras, han colaborado a reducir significativamente las emisiones de gases contaminantes en los motores. Otro modo de atacar al problema de la contaminación atmosférica es el de usar combustibles más limpios, de mejor calidad o de diferente naturaleza. El biodiesel reduce significativamente las emisiones de gases contaminantes por material particulado por lo que en algunos países ya se lo esta implementando como combustible.

El presente estudio puede ser una pauta para un posterior proyecto de implementación en el país. La ESPE, institución para la cual se realiza este proyecto también se verá beneficiada, ya que con esta clase de trabajos está cumpliendo con sus objetivos institucionales, como el de orientar sus esfuerzos y los de sus alumnos en beneficio de la nación.

El DECEM como unidad responsable del presente proyecto, busca la formación de líderes de alto desempeño técnico, la ejecución de proyectos de investigación y la prestación de servicios en una gestión orientada a satisfacer las necesidades del país y sus proyecciones futuras. Este último punto es

cubierto por el presente proyecto de grado, dado que se realizará pruebas con diesel y mezclas diesel-aceite de palma, lo que permitirá comparar y recomendar la calidad de diesel que debería utilizarse.

Se realizarán diferentes pruebas con las cuales se hallarán los diferentes parámetros y curvas de desempeño. Para realizar estas pruebas se utilizarán mezclas de aceite de palma RBD, proporcionado por DANEC S.A., con el diesel ecuatoriano y además con el diesel importado de Colombia.

## **1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

En la actualidad uno de los problemas más graves dentro del Ecuador y el mundo entero es la elevada contaminación existente en las ciudades, lo que se agrava día a día por la falta de acciones efectivas. Los gobiernos locales y provinciales se encuentran buscando posibles soluciones a este grave problema, a través de la revisión vehicular y de la implementación de normas medio ambientales que las empresas deben cumplir; sin embargo, esto no es suficiente, sobretodo en lo que a contaminación vehicular se refiere.

Por esta razón, este estudio plantea una solución que reduciría una parte de la contaminación vehicular por material particulado.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 OBJETIVO GENERAL**

Caracterizar al diesel y la mezcla diesel - aceite de palma respecto a propiedades físico-químicas y de rendimiento como combustible para un motor de combustión interna a diesel.

### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Estudiar las características básicas del diesel y de las diferentes mezclas diesel – aceite de palma respecto a sus propiedades físico - químicas.

Evaluar los parámetros de desempeño y emisiones de gases contaminantes de un motor diesel, para cada mezcla, mediante pruebas de laboratorio.

Determinar la mezcla óptima diesel – aceite de palma.

### **1.4 ALCANCE**

Este estudio se remitirá a obtener la mezcla óptima entre diesel y aceite de palma para ser usada como combustible en un motor Diesel. Para esto se caracterizarán, en base a las normas ASTM, a las sustancias puras y las mezclas diesel – aceite de palma. De igual forma se deberán estudiar los parámetros de desempeño de un motor Diesel y las emisiones de gases contaminantes debido al uso de un bio-combustible a base de aceite de palma.

### **1.5 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA**

Este estudio responde a la necesidad actual de reducir la contaminación ambiental debida a las emisiones gaseosas provenientes de motores Diesel. Al utilizar como combustible una mezcla óptima diesel – aceite de palma, se logra una disminución considerable de las emisiones de gases contaminantes por material particulado además de contar con diferencias reducidas en torque, potencia y consumo de combustible en un motor Diesel. En la tabla 1.1 se muestran las emisiones registradas de gases contaminantes debido a fuentes a diesel en la ciudad de Quito para el año 2003.

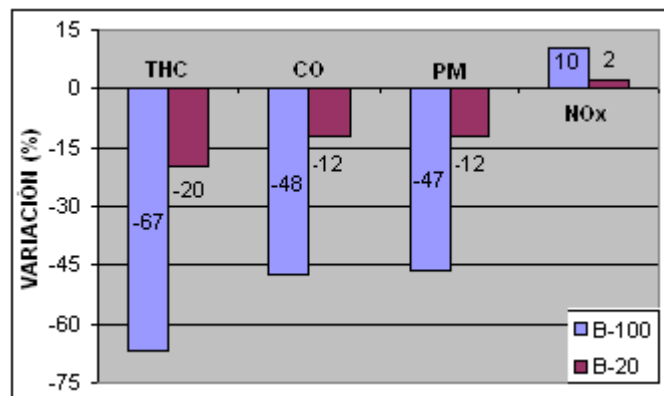
**Tabla 1.1** Emisiones por fuentes a diesel en Quito en el año 2003

CONTAMINANTES	FUENTES A DIESEL	
	MÓVILES [Ton/año]	FIJAS [Ton/año]
CO	8523	83
CO <sub>2</sub>	737813	116550
NO <sub>x</sub>	10788	152
PM	2338	66
SO <sub>2</sub>	2822	462

Fuente: Inventario de emisiones 2003, CORPAIRE <sup>(6)</sup>

Se ha realizado una gran cantidad de estudios sobre biodiesel alrededor del globo. Los resultados de estudios realizados han sido muy variables, probablemente debido a la pureza de los combustibles utilizados y también a errores experimentales, por lo que no se puede asumir dichos resultados de una forma cuantitativa, sino cualitativamente. En la figura 1.1 se muestran los resultados de emisiones reportados por la EPA a partir de la recopilación de una gran cantidad de estudios sobre biodiesel.

**Figura 1.1** Emisiones promedio para biodiesel comparado con el diesel 2 según EPA



Fuente: Emisiones del Biodiesel (EPA) <sup>(7)</sup>

Al utilizar mezclas diesel – aceite de palma se pretende obtener resultados similares a los obtenidos con biodiesel, ya que al agregar aceite de palma se provee de más oxígeno al combustible. El presente estudio aportará con información, localmente obtenida, para las mezclas diesel - aceite de palma a una altura de 2800 m sobre nivel del mar.

# CAPÍTULO 2

## MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

### 2.1 EL DIESEL

El diesel no es más que un combustible, que a semejanza de la gasolina es un derivado del petróleo. Es obtenido como producto intermedio en la columna de destilación atmosférica a temperaturas entre los 190 a 400 [°C]. El diesel esta formado principalmente por hidrocarburos parafínicos, aromáticos y naftalénicos que en general tienen entre 10 a 22 carbonos en su cadena <sup>(1)</sup>. Adicionalmente, en su composición se encuentra nitrógeno, azufre, metales pesados como el vanadio, oxígeno, etc.

**Tabla 2.1** Especificaciones para el diesel 2

PROPIEDAD	MÉTODO ASTM	DIESEL GRADO 2	
		BAJO SULFURO	COMÚN
Punto de inflamación (mín) [°C]	D-93	52	52
Agua y sedimentos (máx) [%vol]	D-2709	0,05	0,05
Temperatura de destilación T90 [°C]	mín D-86	282	282
	máx D-86	338	338
Viscosidad cinemática @ 40 °C [mm <sup>2</sup> /s]	mín D-445	1,9	1,9
	máx D-445	4,1	4,1
Cenizas (máx) [%masa]	D-482	0,01	0,01
Sulfuro (máx) [%masa]	D-2622	0,05	---
	D-129	---	0,50
Corrosión en lámina de cobre (máx) @ 50 °C por 3 horas	D-130	Nº 3	Nº 3
Número de cetano (mín)	D-613	40	40
* Índice de cetano (mín)	D-976	40	---
* Aromaticidad (máx) [%vol]	D-1319	35	---
Punto de nebulización (máx) [°C]	D-2500	---	---
Residuos de carbón (máx) [%masa]	D-524	0,35	0,35

\* Solo debe cumplir una de las dos propiedades  
Fuente : Norma ASTM D-975

La calidad del diesel es muy importante para el desempeño del motor por lo que este combustible debe cumplir con las especificaciones mencionadas en la tabla 2.1. Propiedades como la viscosidad cinemática, temperaturas de destilación, poder calórico y número de cetano son de extrema importancia para el buen funcionamiento de un motor diesel. El límite de sulfuro en el combustible es importante para la reducción de emisiones de SO<sub>x</sub>, al igual que para disminuir el ataque químico del azufre en las válvulas de escape, bomba de inyección, en el múltiple de escape y daños causados al catalizador. Si el motor va a operar a bajas temperaturas, resulta importante tomar en cuenta el punto de nebulización. El punto de inflamación y la cantidad de agua y sedimentos son importantes para el almacenamiento, transporte y seguridad.

Para los diesel utilizados en este estudio se obtuvo la siguiente composición:

- Diesel ecuatoriano (Quito) : C<sub>16,09</sub> H<sub>29,7</sub> N<sub>0,09</sub> S<sub>0,02</sub> O<sub>0,03</sub>
- Diesel colombiano (Pasto) : C<sub>16,43</sub> H<sub>29,21</sub> N<sub>0,16</sub> S<sub>0,03</sub> O<sub>0,37</sub>

El diesel es usado en vehículos, camiones, autobuses, taxis, en motores estacionarios de plantas eléctricas y motores marinos, además como combustible para la producción de energía en quemadores y calderas. En el Distrito metropolitano de Quito se consumió en el 2003 un total 81,6 millones de galones de Diesel, lo que representa el 35,7% del consumo energético total por combustibles <sup>(6)</sup>. El diesel como cualquier combustible presenta emisiones de gases contaminantes entre los cuales los más importantes son el CO, PM, NO<sub>x</sub>, THC y el SO<sub>2</sub>. El CO<sub>2</sub> no es considerado un contaminante, sin embargo, está dentro de los gases de invernadero por lo que contribuye al calentamiento global. Las emisiones de los principales gases contaminantes producto del diesel en el Distrito Metropolitano de Quito, están enunciadas en la tabla 1.1.

## **2.2 EL ACEITE DE PALMA**

Este aceite es de origen vegetal y se lo obtiene del mesocarpio de la fruta de la palma. Después del aceite de soya, el aceite de palma es el segundo más usado a nivel mundial <sup>(1)</sup>. Este aceite es de color rojizo debido a su alto

contenido de carotenoides, con niveles de hasta 700 [mg/L] <sup>(8)</sup>. La presencia de antioxidantes naturales y la ausencia del ácido linolénico hacen que este aceite sea muy estable. Su bajo contenido de ácidos grasos polisaturados lo hacen apto para el uso comestible además de que posee vitamina A y E <sup>(8)</sup>. Por otro lado, su alto contenido en glicéridos sólidos y triglicéridos le confieren una gran consistencia y un punto de fusión alto, que torna al aceite en ideal para el uso industrial <sup>(8)</sup>.

El aceite de palma está compuesto principalmente por mono, di y triglicéridos, además de ácidos grasos libres, humedad e impurezas. Los triglicéridos de este aceite están compuestos en su mayoría por ácidos grasos saturados de 16 carbonos e insaturados (1 nivel) de 18 carbonos <sup>(9)</sup>. La composición predominante del aceite de palma se indica en la tabla 2.2. Para este estudio se ha determinado que la fórmula empírica de la palma RBD es  $C_{17,18} H_{32,27} O_2$ .

**Tabla 2.2** Composición del aceite de palma

<b>ACIDO GRASO</b>	<b>COMPOSICIÓN [%]</b>
Palmítico (C16:0)	44,0
Oléico (C18:1)	39,2
Linoléico (C18:2)	10,1
Esteárico (C18:0)	4,5
Mirístico (C14:0)	1,1
Laúrico (C12:0)	0,2
Otros	0,9

Fuente: Palm Oil Refinery.htm <sup>(9)</sup>

### 2.2.1 LA PALMA

La palma es una planta robusta que alcanza hasta 20 [m] de altura. El hábitat natural de esta planta se encuentra en los trópicos húmedos, quince grados al norte y al sur de la línea Ecuatorial. Las zonas entre 1700 a 2500 [m] SNM. con temperaturas entre los 22 a 33 [°C], humedad del 80% y precipitación 1,5 a 3 [m] anuales; son ideales para el crecimiento de esta planta. <sup>(10)</sup>

La palma es la planta de mayor productividad por unidad de superficie con una producción entre 5 a 7 [Ton] de aceite por hectárea sembrada. Esta es una de las razones por las que este es uno de los aceites más usados a nivel mundial para fines domésticos y en los últimos años, para fines de investigación. <sup>(10)</sup>

### **2.2.2 EL ACEITE DE PALMA EN EL ECUADOR**

En el Ecuador la palma hace su aparición a principios de los 50, pero es casi dos décadas después cuando las plantaciones de palma tienen una presencia significativa en el país, con un poco más de 1000 [Ha] sembradas. En Santo Domingo, Quinindé y Buena Fé se dan las condiciones óptimas para el cultivo de esta planta. En el país existen 39 plantas extractoras de palma <sup>(10)</sup>. A pesar de no significar un aporte significativo al PIB del país, cada año la superficie sembrada se ha incrementado a un ritmo de 8% anual <sup>(10)</sup>, incluso a costa de la destrucción de miles de hectáreas de bosque, lo que simulando a los problemas que tiene Malasia, ha llevado a enfrentamientos con grupos ambientalistas que se oponen a que los sembríos de palma crezcan.

En el proyecto SICA MAG se estipula que la producción anual de aceite de palma en el Ecuador, ha aumentado desde 901.685 a 1.339.400 [Ton], entre los años 1996 y 2000 <sup>(10)</sup>. Sin embargo, en este último el aumento fue menor ya que las condiciones del suelo no eran las adecuadas debido al mal manejo nutricional que los palmicultores le dieron. Este incremento que se ha venido dando en los últimos años, ha determinado que el Ecuador se posicione como el segundo productor de aceite de palma en América y que así se convierta en un importante exportador de este producto, tanto crudo como ya refinado <sup>(10)</sup>. En el proyecto SAGPYA se menciona que, en el año 2000, el Ecuador exportó un total de 18.750 [Ton] de aceite de palma, tanto crudo como refinado; que le significaron un ingreso de 6,2 millones de dólares. Los principales importadores fueron el Reino Unido, Colombia y Venezuela <sup>(10)</sup>. Respecto a las importaciones, éstas han sido prácticamente nulas ya que la producción del aceite abastece totalmente a las necesidades del mercado ecuatoriano. En la actualidad la producción de este aceite continúa en aumento a niveles incluso



que permitan otro tipo de aplicaciones fuera del netamente comestible, como pueden ser los biocombustibles.

### **2.2.3 PROCESO DE REFINACIÓN FÍSICO-QUÍMICO**

El aceite de palma debe pasar por un proceso de producción muy extenso y elaborado, sea para ser usado como alimento o como parte de un combustible. Para este estudio se utilizó el aceite de palma RBD suministrado por DANEC S.A. Este proceso comienza con la extracción del aceite crudo, el mismo que en este punto posee muchas impurezas y además ácidos grasos, proteínas, hidratos de carbono, agua, etc. Este proceso se lo puede realizar por inmersión, por percolación o por ambas formas. Una vez que este se extraiga, se lo transporta hacia la fábrica donde comienza el proceso de refinación. <sup>(8)</sup>

La refinación consta de procesos de desgomación y de refinación química como los son el blanqueo, la desodorización, el fraccionamiento y la hidrogenación. El propósito es el de reducir la acidez, el color y el olor del aceite crudo y además separar sus fases líquida y sólida. <sup>(8)</sup>

En la desgomación se extraen gomas e impurezas del aceite crudo, que no son más que fosfátidos. Los fosfátidos afectan a la estabilidad, al color y al sabor del aceite refinado. Para la desgomación se añade de 2 a 3% de agua, luego se realiza un calentamiento hasta los 60 a 70 [°C] y mediante centrifugación se da la separación de las impurezas. Se continúa con la refinación química donde, por medio de una saponificación, se retiran los ácidos grasos libres, fosfolípidos y monoacilglicéridos. Esta saponificación consiste en agregar hidróxido de sodio del 12 al 15%, de tal forma que este reaccione con los ácidos grasos que se busca eliminar. Luego se realiza un calentamiento del aceite e hidróxido hasta temperaturas de 70 [°C], acelerando así la reacción. Se procura llegar a una concentración de ácidos grasos menor a 0,1%. <sup>(8)</sup>

En el blanqueo o decoloración, el color se reduce a través del uso de agentes adsorbentes, en un proceso de adsorción. Estos agentes son tierras filtrantes, arcillas neutras, arcillas ácidas, carbón activado, ácido fosfórico o ácido cítrico. La mezcla del aceite y los agentes adsorbentes se calienta a temperaturas de

80 a 90 [°C] por un tiempo de 15 a 20 minutos, para luego ser filtrada y así separar por un lado el aceite y por otro los adsorbentes, los mismos que pueden ser reutilizados. El agente adsorbente más efectivo es la mezcla de arcilla neutra con un 5 a 10% de carbón activado. <sup>(8)</sup>

El siguiente proceso es la desodorización, donde se busca eliminar las sustancias volátiles que le dan un olor indeseable al aceite. Este proceso empieza con el calentamiento del aceite a temperaturas entre los 150 y 160 [°C], para luego hacer circular una corriente de vapor desaireado que arrastra a dichos volátiles y que son removidos por vacío. Este proceso se lo realiza a bajas presiones (5 [mmHg]), dado que esto evita el deterioro del aceite. En ciertas ocasiones se suelen añadir agentes antioxidantes. <sup>(8)</sup>

El fraccionamiento permite la separación de las fases líquida y sólida de aceite de palma por medio del enfriamiento controlado y filtración. Posteriormente en la hidrogenación se realiza la saturación de enlaces químicos de moléculas grasas con la adición de hidrógeno. <sup>(8)</sup>

## **2.3 EL BIODIESEL**

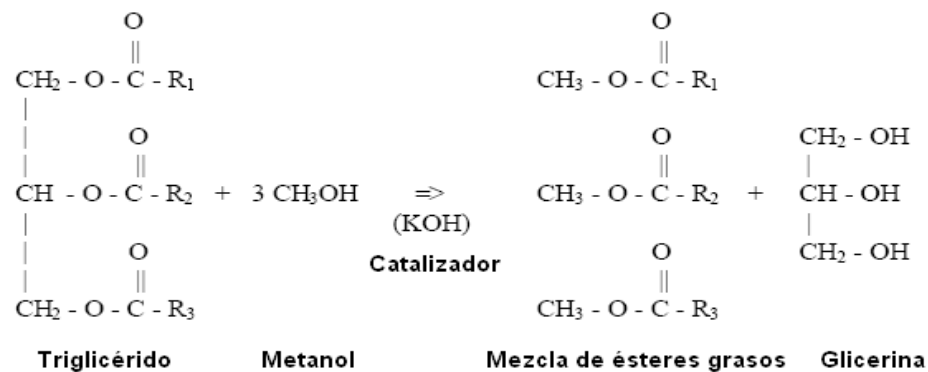
### **2.3.1 PROCESO PRODUCTIVO DEL BIODIESEL**

Básicamente existen tres caminos para producir biodiesel a base de aceites vegetales o grasas animales:

- Transesterificación del aceite con un catalizador básico.
- Transesterificación del aceite con un catalizador ácido.
- Conversión del aceite a sus ácidos grasos y posteriormente a biodiesel.

Sin embargo es la primera opción la más acertada y usada en la actualidad, ya que se la realiza a bajas presiones y temperaturas; no existen productos intermedios; la conversión de los triglicéridos en ésteres es efectiva, no demora mucho tiempo y no se requiere de materiales de construcción especiales <sup>(11)</sup>.

El aceite que se debe usar para la producción de biodiesel es un aceite refinado. Esto es necesario, ya que los ácidos grasos libres en el aceite reaccionan con el catalizador base y forman jabones. La presencia de agua también es un problema pues esta hidroliza los triglicéridos formando diglicéridos y ácidos grasos libres que posteriormente reaccionan con el catalizador base. El método de producción de biodiesel por metanol supercrítico es más resistente a estos factores <sup>(12)</sup>. Para métodos que utilizan catalizadores básicos, la reacción de transesterificación consiste en que el aceite reaccione con un alcohol (generalmente el metanol) para formar ésteres de ácidos grasos (biodiesel) y glicerina. Cuando se usa etanol se necesita un 44% más de este alcohol para completar la reacción <sup>(11)</sup>. Los catalizadores bases generalmente usados son: el hidróxido de sodio y de potasio (NaOH, KOH). El ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), el ácido fosfórico (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) y el carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) se usan como catalizadores ácidos. Las concentraciones típicas son de un 0,3% de NaOH o un 1,5% de KOH <sup>(12)</sup>. La reacción de transesterificación del biodiesel se presenta en la figura 2.1. En esta reacción, R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub> indican las cadenas de ácidos grasos asociados al aceite.

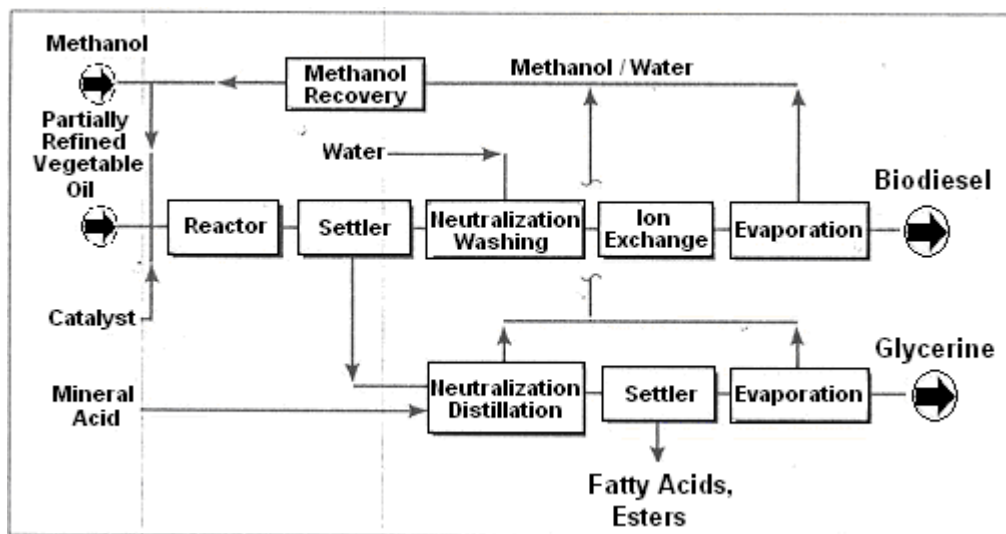


**Figura 2.1** Reacción de transesterificación

Fuente: [http://www.biofuels.coop/pdfs/4\\_commercial.pdf](http://www.biofuels.coop/pdfs/4_commercial.pdf) <sup>(13)</sup>

A continuación se describe el proceso de producción de biodiesel elaborado por la IFP <sup>(11)</sup> (ver figura 2.2). El primer paso del proceso productivo es efectivamente la reacción de transesterificación (realizada a 160 [°F]). Esta se la realiza en un reactor donde se introduce el aceite refinado, el alcohol y el catalizador, que en este caso es el hidróxido de potasio. El reactor está completamente cerrado y aislado de la atmósfera con el fin de evitar pérdidas de alcohol por evaporación. La reacción demora entre 1 a 8 horas en

completarse. Se suele colocar una cantidad excesiva de alcohol, con el objetivo de asegurar que todo el aceite reaccione.



**Figura 2.2** Diagrama del proceso productivo del biodiesel con un catalizador básico <sup>(11)</sup>

Después de la transesterificación, se separa la glicerina del biodiesel en un sedimentador por diferencia de densidades. Para procesos de producción continua se utilizan centrifugadores. El exceso de alcohol es removido por neutralización. Por su parte, la glicerina pasa por otro proceso de neutralización, uno de destilación y de evaporación para recuperar el exceso de alcohol y que este pueda ser re usado y también obtener glicerina cruda (pureza del 80 al 88%) como subproducto. Adicionalmente, también se eliminan por sedimentación los residuos de ácidos grasos no convertidos, sobrantes del catalizador, jabones, etc. Por otro lado, el biodiesel se somete a un lavado con agua ligeramente caliente, con el fin de purificarlo. Tras realizar esto se lo seca y se lo almacena. La pureza es muy importante, pues los ésteres no son biodiesel hasta que cumplan con la norma ASTM-D6751. <sup>(11)</sup>

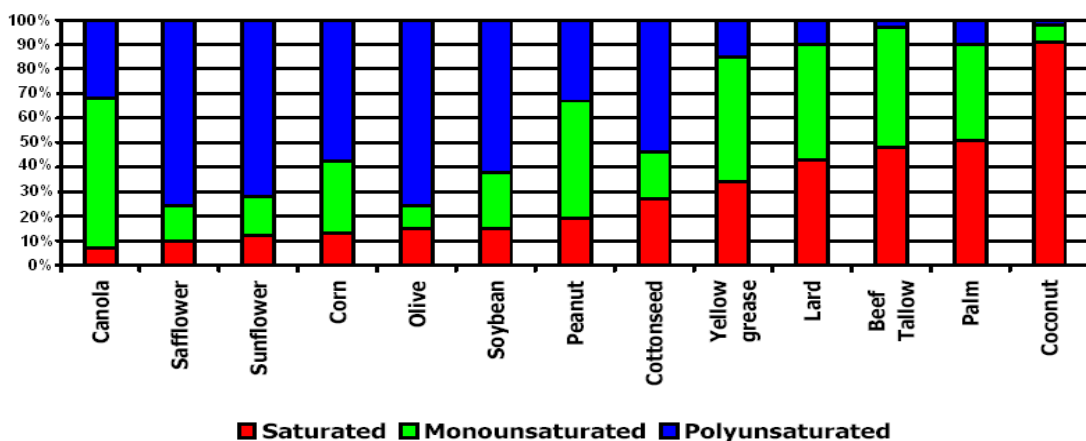
### 2.3.2 PROPIEDADES DEL BIODIESEL

Como ya se mencionó, existe una alta variación en los resultados de los estudios sobre biodiesel. De estos, se puede considerar, cualitativamente, ciertas características químicas que determinan las propiedades de este combustible.

## A. PROPIEDADES QUÍMICAS DEL BIODIESEL

Se conoce que los compuestos aromáticos provocan un incremento en las emisiones por material particulado y  $\text{NO}_x$ , por lo que no son deseables dentro de la composición de un combustible. El diesel común contiene del 20 al 40% en volumen de compuestos aromáticos <sup>(4)</sup>. En contraste, el biodiesel no tiene aromáticos ni tampoco sulfuros. Sin embargo, estudios anteriores demuestran que el uso del biodiesel provoca un incremento en las emisiones  $\text{NO}_x$ . Un biodiesel contiene del 10 al 12% en peso de oxígeno en su composición <sup>(4)</sup>, lo que disminuye tanto el poder calórico del combustible como las emisiones por material particulado, debido al mejoramiento de la combustión. Este hecho provoca un incremento en la temperatura dentro de la cámara, ocasionando un incremento en los  $\text{NO}_x$ .

La composición química de un éster depende de la longitud y del grado de insaturación de las cadenas alquílicas de ácidos grasos <sup>(4)</sup>. En general, lo que diferencia a un aceite son las distintas proporciones de ácidos grasos saturados, monosaturados y polisaturados. La composición de varios de estos aceites está detallada en la figura 2.3. Se puede decir que el biodiesel ideal es el constituido sólo por ácidos grasos monosaturados <sup>(3)</sup>.



**Figura 2.3** Composición de varios aceites vegetales <sup>(3)</sup>

La naturaleza química del biodiesel hace posible que éste sea mezclado con cualquier clase de destilado (diesel 1 y 2, JET-A1, JP8, JP5, etc.). Una vez que el biodiesel ha sido mezclado con el diesel, ya no se separa (asumiendo que se mantenga a temperaturas mayores al punto de nebulización). <sup>(3)</sup>

## B. PROPIEDADES DE COMBUSTIÓN DEL BIODIESEL

Las propiedades de combustión son la base para caracterizar un combustible y determinar los principales efectos que éste tendrá en un motor. La calidad de la combustión determina el desempeño de un motor tanto en prestaciones (potencia, consumo de combustible) como en regulación de emisiones contaminantes.

### *Gravedad específica*

La gravedad específica de los biodiesel, varía entre 0.86 y 0.90 <sup>(4)</sup>. En la tabla 2.6 se expone las gravedades específicas de algunos biodiesel. Así, la del diesel 2 debe ser de 0.85 según la norma ASTM D-287. Debido a que en un motor diesel se determina la cantidad de combustible a inyectarse mediante sensado volumétrico; estará ingresando, a la cámara combustión, una mayor masa de combustible. Sin embargo, la cantidad de energía disponible será menor que al utilizar diesel 2, pues el biodiesel tiene menor poder calórico, tanto en masa como en volumen. Adicionalmente, se ha observado que la gravedad específica varía directamente con las emisiones de NOx <sup>(14)</sup>. Esto se debe a que se inyecta y se quema una mayor masa de combustible.

### *Viscosidad y Tensión Superficial*

La viscosidad de los biodiesel es mayor a la del diesel 2 puro. Mientras más viscoso sea un combustible, se dificultará la atomización de éste y disminuirá la eficiencia de los inyectores. Según la ASTM D-6751, la viscosidad permitida esta entre 1,9 a 6 [mm<sup>2</sup>/s] a 40 [°C]. En cambio, para el diesel, la norma ASTM D-975 especifica una viscosidad máxima de 4,1 [mm<sup>2</sup>/s] a 40 [°C]. Además, al disminuir la temperatura, la viscosidad de los biodiesel y sus mezclas aumenta más rápidamente que la del diesel 2. En la tabla 2.7 se enlistan las viscosidades de algunos biodiesel. La atomización también se ve afectada por la tensión superficial (ver tabla 2.6). Asimismo, se especifica una viscosidad mínima de 1,9 [mm<sup>2</sup>/s], tanto para el diesel como para el B-100. Esto se debe a la potencial pérdida de potencia en la bomba de inyección y por el goteo en los inyectores <sup>(3)</sup>.

**Tabla 2.3** Propiedades de combustión de algunos biodiesel

COMBUSTIBLE	NÚMERO DE CETANO	PUNTO DE INFLAMACIÓN [°C]	GRAVEDAD ESPECÍFICA	PODER CALÓRICO [Btu/lb]		INDICADORES DE FLUIDEZ A BAJAS TEMPERATURAS [°C]			VISCOCIDAD [cs @ 40 °C]	T90 [°C]	TENSIÓN SUPERFICIAL [dyne/cm]
				NETO	BRUTO	P. DE NEBU.	P. DE VERTIDO	CFPP			
Diesel 2 <sup>(4)</sup>	40 – 52	60 – 72	0,8500	19300	18640	-15 a 5	-35 a -15	-10 a -20	2,60	315	22,5 @ 100 °C
Metiléster de aceite de colza <sup>(4)</sup>	52,9	170	0,8820	17363	16050	-4	-10,8	-3,6	4,83	348	25,4 @ 100 °C
Etiléster de aceite de colza <sup>(15)</sup>	64,9	185	0,8760	17433	-	-2	-15	-	6,17	-	-
Metiléster de aceite de soya <sup>(4)</sup>	50,9	131	0,8853	17355	15925	-0,5	-3,8	-4,4	4,08	340	34,9 @ 60 °C
Etiléster de aceite de soya <sup>(16)</sup>	48,2	160	0,8810	17208	-	-1	-4	-	4,41	344	-
Butiléster de aceite de soya <sup>(16)</sup>	51,7	158	-	-	-	-	-	-	-	364	-
Metiléster de sebo <sup>(17)</sup>	58,8	117	0,8810	17283	-	13,9	9	11	4,80	342	-
Etiléster de sebo <sup>(18)</sup>	-	-	0,8756	17940	-	-	6	-	5,93	335	-
Butiléster de sebo <sup>(18)</sup>	-	-	0,8710	17733	-	-	6	-	6,17	346	-
Metiléster de aceite de girasol <sup>(19)</sup>	49,0	183	0,8800	-	16580	-	-7	-	-	-	-
Metiléster de aceite de algodón <sup>(19)</sup>	51,2	110	0,8800	-	16735	-	3	-	-	-	-
Metiléster de aceite de palma <sup>(20)</sup>	50,0	174	0,8700	17271	-	-	16	-	4,5	343	-
Metiléster de aceite estearínico de palma <sup>(20)</sup>	52,0	165	0,8713	17138	-	-	17	-	4,6	343	-
Etiléster de aceite para freír <sup>(21)</sup>	61,0	124	0,8716	17428	16004	9	8	-	5,78	-	-

### *Punto de Inflamación*

El mínimo punto de inflamación del diesel 2 es relativamente alto. Como mínimo se tiene uno de 54 [°C] y comúnmente de 71 °C <sup>(4)</sup>. Los biodiesel tienen puntos de inflamación mayores a 90 [°C] (ver tabla 2.3) por lo que presentan menores riesgos durante su uso y almacenamiento. A pesar de esto, para mezclas biodiesel – diesel, se requiere que éstas tengan una concentración mayor al 50% para que el punto de inflamación empiece a aumentar <sup>(22)</sup>. Para que un material sea considerado no riesgoso o no inflamable, debe tener un punto de inflamación mayor a los 90 [°C], según el Departamento de Regulaciones de Transporte de los EEUU. En algunos estudios se ha obtenido puntos de inflamación bajos para biodiesel; esto se debe a la presencia de residuos de metanol en el combustible. El punto de inflamación podría cambiar durante su almacenamiento debido a la inestabilidad oxidativa de algunos biodiesel como por ejemplo el de soya o el sebo. <sup>(4)</sup> Cabe destacar que la ASTM 6751-03 establece, como mínimo, un punto de inflamación de 130 [°C] para el B-100. Esto ayuda a regular la cantidad de residuos de metanol presentes en el biodiesel, ya que una pequeña cantidad de este alcohol puede reducir significativamente el punto de inflamación. <sup>(3)</sup>

### *Temperaturas de destilación*

Las temperaturas de destilación de distintos biodiesel están descritas en la tabla 2.3. Como se puede apreciar los biodiesel tienen un rango de temperaturas de destilación mayor que las del Diesel 2. La presencia de componentes con alto punto de ebullición en el biodiesel, puede afectar significativamente el grado de formación de depósitos sólidos productos de una combustión incompleta. <sup>(4)</sup>

### *Número de cetano*

En el biodiesel, el número de cetano depende del tipo de aceite del cual se lo esterificó <sup>(4)</sup>. Por lo general, los metilésteres, tienen un número de cetano mayor al diesel 2 como se puede ver en la tabla 2.3. Existe mucha variación entre los resultados obtenidos en diferentes estudios debido a la presencia de



triglicéridos no convertidos, así como residuos de ácidos grasos y de metanol. Adicionalmente, el número de cetano varía inversamente con el nivel de insaturación del ácido graso <sup>(3)</sup>. Existe una relación lineal entre la variación del número de cetano y el porcentaje de mezcla biodiesel – diesel <sup>(17, 23)</sup>. Estudios realizados sobre la composición física y química de mezcla de biodiesel con diesel de bajo sulfuro, aseveran que se puede utilizar el número de cetano del éster puro como el número de toda la mezcla <sup>(22)</sup>. Investigaciones realizadas han demostrado que las emisiones de NO<sub>x</sub> disminuyen al incrementarse el número de cetano. Sin embargo, con números de cetano mayores de 55 o de 60, existe muy poca variación en las emisiones a medida que sigue aumentando el número de cetano <sup>(4)</sup>.

### *Poder Calórico*

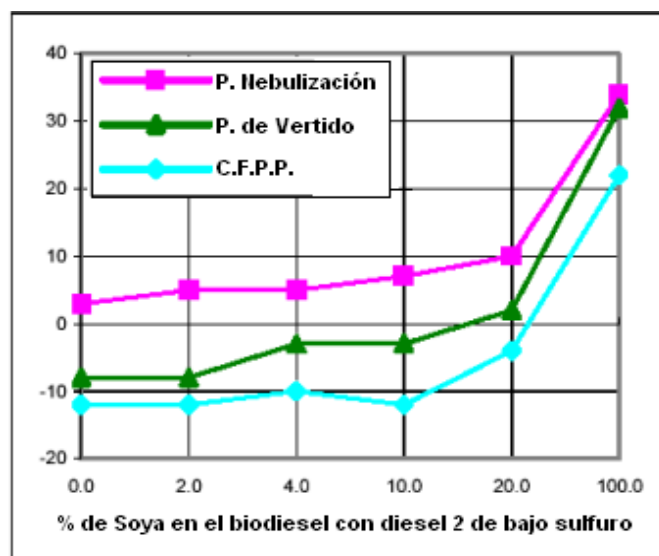
Los biodiesel tienen, aproximadamente, un 10% menos de poder calórico en comparación al diesel 2 <sup>(4)</sup>. En teoría, el consumo de combustible varía inversamente proporcional con el poder calórico, por lo que se debería esperar un aumento en el consumo de biodiesel y sus mezclas en comparación con el diesel 2 puro. Al utilizar un biodiesel que cumpla con la ASTM D-6751, se ha demostrado que el poder calórico es más dependiente del tipo de aceite o ácido graso utilizado como materia prima, que de el proceso de elaboración del biocombustible <sup>(24)</sup>. En la tabla 2.3 se puede apreciar los poderes calóricos de varios biodiesel. Adicionalmente, en algunos casos el biodiesel puede mejorar el contenido calorífico de algunos diesel muy livianos como el Kerosén. Para el B-20, la reducción del poder calórico no es tan significativa. Esta es una de las razones por las que esta mezcla es tan popular, pues afecta muy poco al desempeño del motor, sin embargo, disminuye considerablemente las emisiones de PM y no causa un gran aumento de los NO<sub>x</sub> <sup>(4)</sup>.

### *Propiedades de Flujo*

Temperaturas menores al punto de nebulización como a las que están expuestos durante el invierno, en países de cuatro estaciones, ocasionan problemas de fluidez en el diesel y todavía más en los biodiesel <sup>(25)</sup>. Para el biodiesel, las propiedades de fluidez a baja temperatura dependen del tipo de

aceite o ácido graso del cual proviene, ya que el grado de insaturación, la longitud de la cadena y el grado de ramificaciones afectan el punto de congelación del biodiesel <sup>(4)</sup>. Mientras mayor sea el grado de insaturación, menores serán el punto de nebulización y el punto de vertido. En la tabla 2.3 se presenta dichos puntos para algunos biodiesel.

Los efectos en la fluidez a bajas temperaturas aumentan a medida que se utiliza mezclas biodiesel – diesel con una mayor concentración (ver figura 2.4). Por lo general, para las mezclas B-20 es posible tomar las mismas precauciones y procedimientos que se utilizan para el diesel 2. Estos procedimientos incluyen el mezclar el biocombustible con Kerosén, utilizar aditivos que mejoren la fluidez, utilizar filtros de combustible con calentamiento y guardar vehículos bajo techo. Sin embargo, para mezclas muy concentradas, es necesario tomar en cuenta otras consideraciones.



**Figura 2.4** Propiedades de fluidez a bajas temperaturas para varias mezclas. <sup>(3)</sup>

Usualmente, los aditivos no afectan al punto de nebulización sino que disminuyen el punto de vertido y el CFPP <sup>(4)</sup>. Esto se logra disminuyendo el tamaño de los cristales de cera que se forman a bajas temperaturas. La NBB recomienda el uso del “Lubrizon” (LZ7670) como aditivo para biodiesel y sus mezclas <sup>(26)</sup>. Algunos fabricantes tienen información que muestra que sus aditivos pueden reducir el punto de vertido hasta en 12 [°C] para el B-100. Sin embargo, esto requiere de concentraciones de 10000 ppm. La efectividad de los aditivos depende del grado de insaturación del combustible. <sup>(3)</sup>

Para el almacenamiento, los tanques y líneas de combustibles que operen con B-100, deben ser diseñados para las propiedades a bajas temperaturas del biodiesel. Las bombas, las líneas y los dispensadores de combustible deben estar protegidos del viento y del frío y constar de sistemas de calentamiento. El biodiesel en tanques bajo subterráneos debe ser calentado fluctuante entre temperaturas de 5 a 10 [°F] sobre el punto de nebulización. El proceso de calentamiento es lento y se debe agitar el combustible para evitar la formación de una capa de gel en el fondo del tanque. En general se recomienda mantener el B-100 a temperaturas mayores a los 5 [°C]. <sup>(3)</sup>

### *Almacenamiento y Estabilidad*

El B-100 tiene una buena estabilidad térmica, pues sus propiedades no se ven afectadas por la exposición a altas temperaturas por periodos de tiempo prolongados <sup>(3)</sup>. Cabe destacar que las mezclas B-20 o menores, tienen una menor conductividad eléctrica que el diesel, sin embargo no es suficiente para provocar una acumulación de cargas que puedan causar una chispa <sup>(27)</sup>. Durante el almacenamiento del biodiesel puro, propiedades como su número ácido, viscosidad y número de cetano pueden incrementarse hasta el punto de estar fuera de especificaciones. Efectos similares ocurren con mezclas B-20 pero en menor medida <sup>(28)</sup>.

En cuanto a la estabilidad oxidativa, ésta mejora a medida que los ácidos grasos son más saturados. Los biodiesel se oxidan más fácilmente que el diesel 2, pues muestran números de yodo mucho mayores <sup>(4)</sup>. Esto se debe a que durante la destilación se eliminan algunos antioxidantes naturales <sup>(29)</sup>. Adicionalmente, la oxidación puede facilitar la formación de hidroperóxidos, los cuales pueden afectar a los elastómeros o también polimerizarse y formar gomas insolubles, lo que aumentaría el nivel de sedimentos <sup>(4)</sup>. Para disminuir la oxidación se puede inertizar el interior de un tanque con nitrógeno, esto para periodos de almacenamiento prolongados <sup>(3)</sup>. Además, metales como el cobre, el bronce, el latón, el plomo, el estaño y el zinc aceleran la oxidación, tanto del diesel como del biodiesel, y en consecuencia también aumentan los sedimentos <sup>(30)</sup>.

También hay que tomar en cuenta el contenido de agua en el biodiesel, pues ésta permite la formación de óxido y aumenta la corrosión en el tanque y en el sistema de combustible a más de permitir la proliferación de microbios. Para el biodiesel se puede utilizar los mismos productos microbicidas que se usan para el diesel 2 <sup>(3)</sup>.

Para almacenar biodiesel por períodos de tiempo mayores a nueve meses se recomienda el uso de aditivos estabilizantes. La NBB ha encontrado que se pueden utilizar los estabilizadores tradicionalmente usados para los aceites vegetales, como el TBHQ <sup>(31)</sup>. Con la utilización de estos aditivos se disminuye la cantidad de sedimentos depositados, inclusive en la presencia de cobre. La NBB asegura que para el biodiesel se puede utilizar, por lo general, los mismos estándares de almacenamiento usados para el diesel al igual que sus respectivos procedimientos de manipulación. Estos incluyen que el combustible se almacene en un ambiente limpio, seco y oscuro; en tanques de materiales como el aluminio, acero, polietileno fluorinado, polipropileno fluorinado y de teflón. El biodiesel puede atacar a superficies pintadas y causar deterioros prematuros en el concreto cuando han estado en contacto por periodos prolongados <sup>(28)</sup>. Según la ASTM D-4625, el B-100 se mantiene estable por periodos de almacenamiento de hasta 8 meses; 9 como máximo. Por otro lado la NBB recomienda periodos máximos de almacenamiento de hasta 6 meses. Para mezclas pobres se puede admitir periodos de hasta 1 año. <sup>(3)</sup>

También se debe tomar en cuenta que el B-100 es un buen disolvente de los sedimentos acumulados. Por lo tanto, se debe realizar una limpieza de todo el sistema de combustible y de los tanques de almacenamiento antes de utilizar el B-100 o mezclas concentradas. Caso contrario, los sedimentos disueltos podrían taponar el filtro y romperlos en algunos casos, enviando todos los sedimentos hacia el sistema de combustible. <sup>(3)</sup>

### **2.3.3 RENDIMIENTO DE LOS MOTORES AL USAR BIODIESEL**

Desde que las condiciones operativas del biodiesel son tan similares a las del diesel de petróleo, los conductores de los vehículos no notan diferencias entre

la operación con un combustible o con otro, excepto por la gran diferencia del olor de los gases de escape y la respectiva reducción del humo negro. Volkswagen concluyó, en sus pruebas de durabilidad, que los valores de torque, potencia, niveles de humo y compresión en los cilindros se mantienen dentro de la normalidad <sup>(32)</sup>.

### **A. Consumo de Combustible**

El tipo de motor (Ej. Diesel, Gasolina), la eficiencia térmica y el poder calórico del combustible utilizado; son los tres factores que afectan al consumo de combustible, a la potencia y al torque de un motor <sup>(33)</sup>. Como previamente se mencionó, el biodiesel posee un menor poder calórico que el diesel. Ya que la eficiencia térmica en los motores Diesel es la misma al usar diesel que al usar biodiesel y sus mezclas; las diferencias existentes, tanto en consumo de combustible como en potencia y torque, se deben completamente a esta reducción en el poder calórico. De esta forma, se acepta aumentos en el consumo de combustible proporcionales al menor poder calórico que poseen el biodiesel y de sus mezclas.

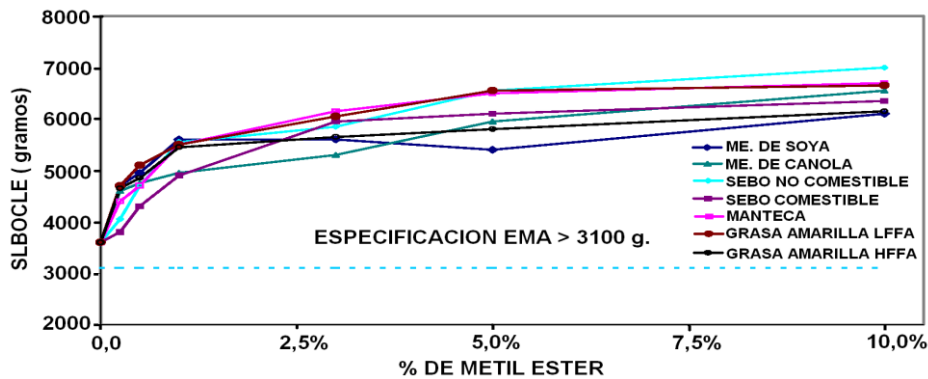
### **B. Torque, Potencia y Aceleración**

Ya que la potencia y por ende también el torque dependen del poder calórico del combustible, éstos disminuyen cuando se usa biodiesel o sus mezclas en comparación al diesel. No obstante, esta disminución no es muy drástica. Se ha encontrado que el torque se reduce en aproximadamente un 6% al utilizar un biodiesel puro <sup>(23)</sup>. También hay que destacar que el torque máximo no es significativamente afectado hasta que se utilice mezclas mayores de un 35 <sup>(23)</sup> a un 40% <sup>(34)</sup>. No se asume pérdidas de torque con posiciones intermedias de la garganta. Esto se debe a que basta con acelerar un poco para alcanzar el torque requerido. En general se concluye que la reducción del torque es proporcional al menor poder calórico del biodiesel y sus mezclas.

### **C. Lubricidad del Biodiesel**

Originalmente, la lubricidad del diesel era suficiente para proteger el motor. Posteriormente, fue necesario reducir los niveles de azufre y de aromáticos en

el combustible, lo cual se logra, comúnmente, mediante la hidrogenación. Sin embargo, por este método, también se remueven algunos componentes que le dan lubricidad al diesel <sup>(35)</sup>.



**Figura 2.5** Variación de la lubricidad para varios biodiésel. <sup>(3)</sup>

El biodiésel mejora considerablemente la lubricidad con respecto al diesel, tanto así que muchas veces se lo usa como aditivo. Por ejemplo, las mezclas B-1 mejoran la lubricidad de los combustibles destilados en un 65% <sup>(33)</sup>. Basta con mezclar 1% de biodiésel con diesel 2 para recuperar sus propiedades de lubricación originales y el 2% con el diesel 1 <sup>(35)</sup>. En la figura 2.5 se puede observar como varía la lubricidad del combustible a medida que se aumenta la concentración de la mezclas para varios biodiésel.

#### D. Compatibilidad de Materiales

Los metales y los elastómeros de caucho pueden reaccionar con el biodiésel durante su almacenamiento. Por ejemplo; el biodiésel de soya corroe significativamente el cobre. Al utilizar mezclas B-20 casi no se producen problemas de compatibilidad con los distintos materiales <sup>(4)</sup>. Sin embargo, las mezclas altas como la B-50 o en su efecto el B-100, presentarán problemas que obligarán al reemplazo de ciertos materiales. El biodiésel es compatible con materiales como el Butadieno BR, el caucho natural NR, el estireno - butadieno SBR, el Hipalon CSM, el Nitrilo NBR, el Neopropeno y Cloropeno CR, entre otros. De igual forma presenta con poca compatibilidad con el Butil IIR, el etileno - propileno EPDM, el HiFluor FKM, el Fluorocarbono, además de los metales antes mencionados. <sup>(36)</sup>

## **E. Resistencia y Durabilidad de los Motores**

Actualmente los fabricantes de motores Diesel no ofrecen garantía cuando estos operan con B-100, sin embargo prácticamente todos (en USA) la mantienen cuando se utiliza el B-20 <sup>(37)</sup>. Para mejorar la resistencia se tiene que remover del biodiesel a los mono-, di- y triglicéridos que no han reaccionado, al igual que residuos de metanol, glicerina y ácidos grasos. Los triglicéridos que no se han convertido forman depósitos en los inyectores, mientras que los monoglicéridos, la glicerina y los ácidos grasos corroen los rodamientos y afectan a materiales elastómeros <sup>(4)</sup>.

Adicionalmente la baja volatilidad del biodiesel provoca la formación de depósitos de coque en las válvulas y también aumenta la dilución del aceite lubricante. Luego de un periodo de tiempo, los antioxidantes en el aceite del motor son utilizados por el combustible que filtró y el mismo comienza a polimerizar, causando espesamiento. Un excesivo espesamiento del aceite dificultaría el libre movimiento del mismo a través del motor disminuyendo así, la capacidad de lubricación y causando un mayor desgaste del motor. <sup>(32)</sup>

En general, las pruebas realizadas utilizando B20 en motores diesel, sean estos nuevos o usados, con inyección directa o indirecta, demuestran que son pocos los efectos negativos que pueden ocurrirles y que posiblemente aumente la vida útil de los mismos. De todas maneras, se debe tener consideraciones especiales con los residuos cuando se usan biodiesel derivados de la soja.

### **2.3.4 EMISIONES**

Sin lugar a duda, la principal ventaja que presenta el biodiesel es la capacidad de reducir significativamente las emisiones por material particulado. Se ha realizado una gran cantidad de investigaciones en muchos lugares del globo, utilizando varias mezclas biodiesel – diesel. En general se ha llegado a las siguientes conclusiones sobre las emisiones producidas por el uso del biodiesel y sus mezclas en relación al diesel puro:

Para emisiones reguladas (ver tabla 2.11):

- El material particulado total (PM) disminuye
- Los NO<sub>x</sub> aumentan
- El CO disminuye
- El total de hidrocarburos (THC) disminuye
- La opacidad del humo disminuye

Para emisiones no reguladas:

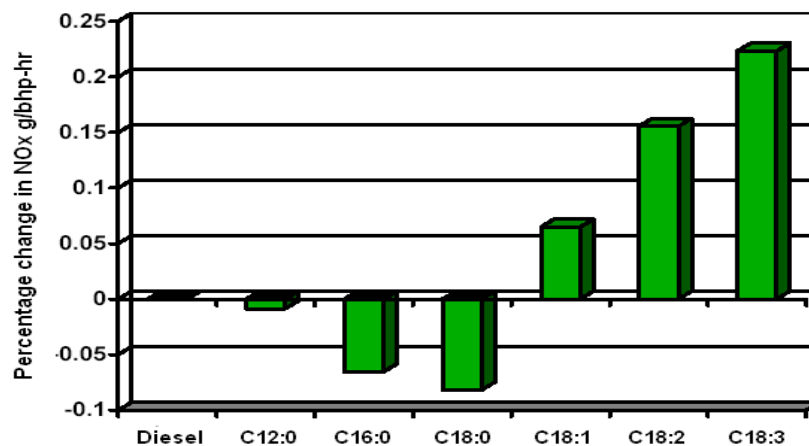
- La fracción orgánica soluble (SOF) aumenta
- Los hidrocarburos poliaromáticos (PAH) disminuyen
- Por lo general, los aldehídos aumentan

Como se expuso previamente, el contenido adicional de oxígeno del biodiesel, en comparación al diesel puro, hace que se produzca una mejor combustión dentro de la cámara. Gracias a esto, se logra la reducción del PM. Adicionalmente, las partículas de hollín actúan como pequeños y efectivos radiadores de calor; y a pesar de que los combustibles oxigenados tienen una temperatura adiabática de llama menor que el diesel, la temperatura incrementa dentro de la cámara de combustión. Cuando se alcanzan los 860 [°C] en adelante; el N<sub>2</sub>, presente en el aire, se libera y reacciona con el oxígeno dando origen al NO<sub>x</sub>. Por esta razón, aumentan los NO<sub>x</sub>.<sup>(4)</sup>

Además, se sospecha que el cambio en la atomización del combustible debido a la diferencia de tensión superficial, viscosidad y punto de ebullición de los oxigenados con el diesel 2, puede provocar un aumento en la temperatura de la llama y en consecuencia también se incrementan los NO<sub>x</sub>. El tamaño de las gotas del combustible atomizado también puede influir, pues, al ser éstas más grandes, se dificulta su facilidad de difusión con el aire, aumentando la duración de la llama difusa. Esto llevaría a una demora en la ignición, la cual inclusive podría ser causante del aumento de los NO<sub>x</sub>.<sup>(4)</sup> En consecuencia, muchos estudios se han enfocado en lograr una reducción significativa del PM mientras se mantiene a los NO<sub>x</sub> constantes o con muy poco incremento para que no excedan las especificaciones. En una serie de investigaciones se ha



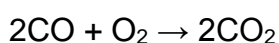
encontrado que al retrasar el tiempo de inyección se logra una disminución de los NOx entre el 1,9 al 7,3% por grado, con un máximo de hasta 4°. Sin embargo, esto también provoca un aumento del PM entre un 0,5 a un 8,5% por grado, además del incremento en el consumo de combustible. Esto para mezclas B-20 a base de aceite de soya. <sup>(4)</sup>



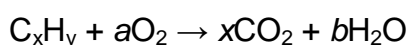
**Figura 2.6** Variación de las emisiones de NOx con el grado de insaturación. <sup>(3)</sup>

Las emisiones de NOx también dependen del grado de insaturación de la materia prima utilizada para el biodiesel. Mientras más saturado es el ácido graso, menores son las emisiones; tal como se muestra en la figura 2.6.

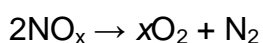
La NBB recomendó que se combine un retraso en el tiempo de inyección con un catalizador oxidante <sup>(4)</sup>. Esto se debe a que estos catalizadores convierten la SOF y así reducen el PM. En la figura 2.7 se presenta la variación existente en las emisiones de PM en motores de 4 tiempos con y sin el uso de un catalizador oxidante. Los catalizadores oxidantes consisten en una estructura en forma de panal de abejas, recubierta de metales como el platino o el paladio (los cuales actúan como catalizadores), y pueden ser de dos o tres vías <sup>(39)</sup>. En el primer caso transforma el CO y los hidrocarburos; en el segundo caso, se transforma también los NOx. Las reacciones son las siguientes:



(Oxidación del CO) <sup>(39)</sup>

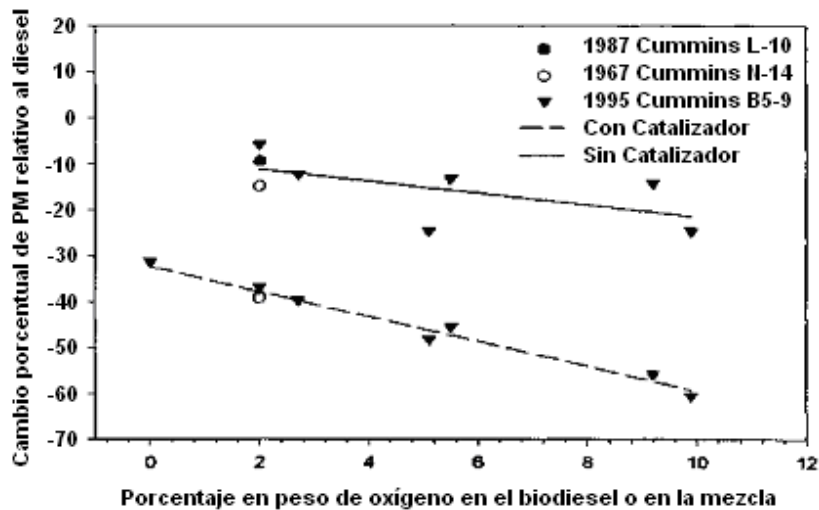


(Oxidación de los hidrocarburos) <sup>(39)</sup>



(Oxidación de los NO<sub>x</sub>) <sup>(39)</sup>

Adicionalmente, los catalizadores también pueden convertir los PAH y los aldehídos transformándolos también en agua y CO<sub>2</sub>.



**Figura 2.7** Cambio en las emisiones de PM con y sin catalizador oxidante. <sup>(4)</sup>

Ya que el PM está compuesto en parte de hidrocarburos no quemados y absorbidos del aceite, éste disminuye considerablemente. En general los catalizadores oxidantes pueden alcanzar reducciones de hasta el 90% de la SOF, lo que puede significar hasta un 50% de reducción del PM <sup>(38)</sup>. Cabe destacar que la eficiencia de estos catalizadores aumenta significativamente con la temperatura y también depende del ciclo de prueba <sup>(39)</sup>.

Se ha encontrado, así mismo, que el PM no varía en relación al contenido de oxígeno del combustible; lo que no sucede con los NO<sub>x</sub>, los cuales si correlacionan significativamente. Aún más, la variación de NO<sub>x</sub> no depende del sistema de inyección, del motor o de la SOF pero si de la carga y velocidad del motor. Se ha encontrado un aumento de los NO<sub>x</sub> a torques elevados (600 – 1000 [lb-ft]) y a bajas velocidades (600 rpm.). De igual forma, el PM se reduce a altas velocidades y para todas las cargas, sin embargo a bajas velocidades y cargas medias, aumentan. Conviene destacar que los ensayos transientes afectan de manera más significativa al PM que a los NO<sub>x</sub>. <sup>(4)</sup>

La opacidad del humo tiene poca relación con el PM pues depende básicamente del hollín (PM sólido), el cual representa una menor proporción del PM. Ya que el hollín disminuye debido a la mejora en la combustión, la opacidad del humo también disminuye <sup>(4)</sup>. De igual forma, si se añade un catalizador oxidante, la opacidad del humo disminuye todavía más.

Por otro lado, el CO<sub>2</sub> arrojado al ambiente debido a la combustión del aceite de palma del biodiesel, no es considerado como contaminante, puesto que este es fijado por los vegetales, que lo utilizan como materia prima para construir sus tejidos. De esta forma se considera que se reducen las emisiones de CO<sub>2</sub> <sup>(40)</sup>.

En algunos estudios se ha encontrado un incremento de THC y de CO a la salida del motor, probablemente debido al mayor tamaño de gota en la atomización, lo que conllevó a una combustión incompleta. De todos modos, estas emisiones se redujeron considerablemente al utilizar un catalizador oxidante <sup>(41)</sup>. Los estudios han demostrado que la disminución de PM, CO, y THC no dependen de la materia prima utilizada para hacer el biodiesel <sup>(3)</sup>.

En cuanto a las emisiones aún no reguladas, la SOF está constituida en su mayoría por partículas de aceite que escapan del motor. El biodiesel afecta a las partículas sólidas como el hollín y también a la SOF de combustible más no al de aceite lubricante. Por esta razón la SOF aumenta porcentualmente en relación al PM. El hecho de que el biodiesel provoque una mayor disolución del aceite lubricante a comparación del diesel, también hace que la SOF aumente. La SOF es mayor en motores que ya tengan un desgaste considerable, ya que el aceite escapa del motor al ser arrastrado por el aire durante el traslape. <sup>(4)</sup>

Por otro lado están los PAH. Estos compuestos son cancerígenos y mutagénicos. Muchos estudios cualitativos demuestran que los PAH disminuyen con el uso del biodiesel. El ciclo de prueba afecta considerablemente a las emisiones de PAH. Se obtienen menores emisiones en ciclos estables que en transientes <sup>(42)</sup>.

Finalmente, la combustión del biodiesel produce aldehídos, especialmente los livianos como el formaldehído y la acroleína. En varios estudios se han

documentado aumentos y disminuciones de los aldehídos, sin embargo la acroleína siempre ha aumentado. Es preciso destacar que mientras menos impurezas tenga el oxigenado, mayor será la probabilidad de que exista una reducción en los aldehídos. También parece que existe una dependencia con el aceite u ácido graso utilizado como materia prima del oxigenado. <sup>(4)</sup>

La EPA ha evaluado un sin número de estudios realizados sobre biodiesel y se enlistan en la tabla 2.4 los valores promedio para las emisiones obtenidas.

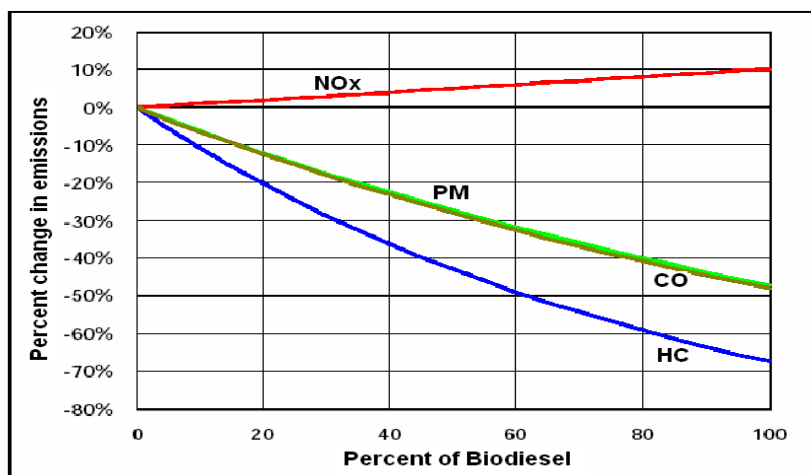
**Tabla 2.4** Emisiones promedio para biodiesel comparado con el diesel 2 según EPA

EMISIONES		B-100 [%]	B-20 [%]
REGULADAS	THC	-67	-20
	CO	-48	-12
	PM	-47	-12
	NOx	+10	+2 a -2
NO REGULADAS	Sulfatos	-100	-20 *
	PAH (Promedio entre todos los componentes medidos)	-80	-13
	nPAH (Promedio entre todos los componentes medidos)	-90	-50
	Potencial de ozono de hidrocarburos especiados	-50	-10

\* Estimado del resultado de B100

Fuente: [http://www.biodiesel.org/pdf\\_files/fuelfactsheets/emissions.pdf](http://www.biodiesel.org/pdf_files/fuelfactsheets/emissions.pdf) <sup>(7)</sup>

En la figura se detalla la reducción de emisiones promedio con el uso de biodiesel. Para motores viejos que quemen mucho aceite lubricante, la reducción del PM será menor que el mostrado en la figura 2.8.



**Figura 2.8** Impacto promedio de las emisiones de biodiesel en motores CI. <sup>(43)</sup>

Para el caso de este estudio, se han planteado las ecuaciones de combustión para los diferentes combustibles analizados (ver Anexo B).

### 2.3.5 ESTADO DEL ARTE

El estudio del uso de los aceites vegetales como combustibles para un motor Diesel, tiene su origen en 1900 cuando Rudolf Diesel, inventor del motor que lleva su nombre, utilizó aceite de maní con ese fin en dicho motor <sup>(44)</sup>. Luego de casi tres décadas, Walton J. (1938) ensayó con aceite de palma, de soya y de semilla de algodón, con los cuales obtuvo eficiencias alrededor del 90% en comparación al diesel <sup>(45)</sup>. Sin embargo, todos los aceites no solo dejaban depósitos de carbón, sino que presentaban problemas con el punto de vertido y el aceite de palma corroía significativamente el cobre y el latón. Con estos resultados Walton recomendó el uso de los ácidos grasos, resultantes del rompimiento de las cadenas de triglicéridos. Esta idea dio origen al concepto del biodiesel.

En 1944, Martínez de Vedia hizo ensayos con mezclas aceite de lino – diesel al 20 y 40%, con las cuales observó que la cantidad de cenizas, acidez y depósitos de carbón aumentaban de acuerdo a su uso, e inclusive más rápidamente que al utilizar solo diesel <sup>(46)</sup>. Martínez recomendó que no se debía usar estas mezclas para periodos largos de operación y también decantar primero las mezclas para proteger a los filtros de combustible e inyectores. Pero fue hasta la década de los 70, que debido al alza en los precios del petróleo, así como a la crisis energética, se profundizan en estudios sobre el biodiesel, dentro de los que se destacan los realizados por Otto. Otra investigación realizada por Huguenard <sup>(47)</sup>, reveló que al usar mezclas de aceite de semilla de algodón – diesel, el motor podía funcionar con ángulos de adelanto al encendido mayores en comparación al uso único del diesel. Sin embargo, los motores se carbonizaban en gran medida presentaban daños en los anillos de compresión. En 1980, Bruwer y sus ayudantes demostraron que al utilizar ésteres de aceite de girasol, en lugar del aceite de girasol, se lograba disminuir significativamente los depósitos de carbón en la cámara de combustión <sup>(48)</sup>.

En un estudio realizado por Bacon y sus ayudantes <sup>(49)</sup>, se encontró que mediante un proceso de transesterificación para aceites vegetales, se disminuía la polimerización y la carbonización de los aceites vegetales. No así, mediante un proceso de hidrogenación, con el cual, a pesar de que reducía la carbonización de los aceites vegetales, se obtenían propiedades de fluidez indeseables a bajas temperaturas.

Se ha realizado una gran cantidad de estudios sobre los efectos del biodiesel en el desempeño de los motores, así como en las emisiones de gases contaminantes que estos emiten.

En estudios posteriores, Graboski et al. <sup>(23)</sup> documentaron que existe una ligera reducción de torque y potencia al usar biodiesel, la que es proporcional a la concentración de la mezcla. En otros estudios realizados en un ómnibus en USA (utilizando mezclas B-20), algunos operadores observaron pequeñas economías de combustible y otros pequeños aumentos <sup>(50)</sup>. En cuanto a la lubricidad del combustible, Jiambo Hu reportó que los monoglicéridos y los metilésteres son los compuestos que determinan en mayor medida las propiedades de lubricidad del biodiesel. En un estudio realizado por Southwest Research, se determinó que el biodiesel puro y sus mezclas B-20 y B-30 son más compatibles con elastómeros como el Vitón 401C y el Vitón GFLT <sup>(28)</sup>. En cuanto a su estabilidad oxidativa, la Mercedes Benz sugiere que no se debe utilizar un combustible con un número de yodo mayor a 115, ya que, a partir de este valor, se forman depósitos de carbón inaceptables. Otras investigaciones sugieren que se tome un número de yodo máximo de 135 <sup>(4)</sup>.

En pruebas de durabilidad, Volkswagen encontró que el contenido de sólidos y la alcalinidad del aceite, así como el desgaste de cojinetes, aros de pistón, camisas de cilindros y asientos de válvulas permanecieron dentro de sus especificaciones y son consideradas por ellos como correspondientes a un desgaste en condiciones normales <sup>(37)</sup>. De igual forma, en un estudio reciente de la Universidad de Missouri se probó un motor de camión liviano Cummins de 5,9 lts. por 160.000 km. En el desarme del motor, se encontró un bajo desgaste y se demostró la excelente durabilidad del mismo. También se comprobó

importantes reducciones de partículas de metal en el aceite, con una variedad de mezclas de biodiesel. Por ejemplo se visualizó una reducción del 40% de limaduras, con una mezcla de solo 10% de biodiesel <sup>(37)</sup>. Sin embargo, en estudios realizados por la NBB con mezclas B-20 (Metiléster de soya), se encontraron problemas a las 750 horas de operación debido al desgaste excesivo en las agujas de los inyectores a causa del fallo de los sellos de la bomba de combustible. En el desarme se encontró varios anillos de compresión rotos, depósitos en los pistones y en filtro de combustible <sup>(4)</sup>.

En lo que se refiere a emisiones, la Universidad de Jaén (España) determinó que el biodiesel (de oliva), en comparación con el diesel, redujo la emisión de CO (en un 58.9%), CO<sub>2</sub> (en un 8.6%), NO (en un 37.5%), y SO<sub>2</sub> (hasta un 57.7%), sólo se detectó un incremento en lo que se refiere a los NO<sub>2</sub> <sup>(51)</sup>. Ortech reportó reducciones en la opacidad en un 28,6 % para mezclas B-10 y en un 50% para mezclas B-20 de aceite de soya en un motor de 4 tiempos <sup>(40)</sup>. Montagne expuso en estudios realizados con mezclas entre el 5 al 20% de metiléster de colza que, para motores turboalimentados, los PAH disminuían entre el 40 y el 50% mientras que el formaldehído aumentaba en un 60% y la acroleína en un 25 al 40% <sup>(52)</sup>. Krahl encontró que, por lo general, los aldehídos se incrementan de un 0 a un 75 % en motores a inyección directa <sup>(42)</sup>. En estudios realizados por la Mercedes Benz también se confirmaron reducciones de PAH para ésteres de aceite de palma, al igual que disminuciones de todos los aldehídos a excepción de la acroleína.

En la actualidad, el biodiesel es una realidad y en muchos países se lo está produciendo en grandes cantidades, más aún con el alza del barril de petróleo a niveles impensados y la creciente contaminación ambiental producto de la emanación de gases de los medios de transporte. También se están creando e implementando normas acerca del uso de este combustible, donde poco a poco se establece la obligatoriedad de su uso.

Es así como países como Alemania, Austria, Canadá, Estados Unidos, Francia, Italia, Suecia y en Asia Malasia e Indonesia son pioneros en la producción, ensayo y uso de biodiesel en automóviles <sup>(53)</sup>. Conviene analizar de

manera más profunda el estado actual de los biocombustibles en algunos de los países pioneros, así como en países en nuestro continente.

En el caso del continente europeo, la Comunidad Europea de Naciones, no ha escapado a esta realidad, y es así como ha fijado que ya en el año 2005, se use un 5% de combustibles renovables, porcentaje que deberá ser duplicado para el año 2010 <sup>(54)</sup>. El principal biodiesel de origen vegetal en este continente es el elaborado a base de aceite de colza y metanol, que puede en muchas ocasiones ser usado incluso de forma pura, aumentando así el beneficio al medio ambiente. Pero no es este el único biodiesel producido en Europa, sino en los últimos años, el biodiesel a base de girasol, soya y palma también se lo está produciendo en las diferentes plantas <sup>(54)</sup>. En la tabla 2.5 se muestra la producción de biodiesel en algunos países europeos en el año 2000.

**Tabla 2.5** Producción de Biodiesel (año 2000)

<b>PAIS</b>	<b>CAPACIDAD INSTALADA [Ton/año]</b>	<b>PRODUCCIÓN [Ton/año]</b>
Alemania	550.000	415.000
Francia	290.000	286.000
Italia	240.000	160.000
Bélgica	110.000	86.000
Inglaterra	2.000	2.000
Austria	20.000	20.000
Suecia	11.000	6.000
Checoslovaquia	47.000	32.000
<b>TOTAL</b>	<b>1.270.000</b>	<b>1.005.000</b>

Fuente: <http://www.eco2site.com/informes/biodiesel-m.asp> <sup>(54)</sup>

De forma más puntual, en Francia, se ha planteado en estos últimos dos años una norma donde se busca que todo combustible para automotores diesel posea por lo menos un 1% de biodiesel, lo que demuestra de manera clara la importancia que en la actualidad tiene el biodiesel en este continente <sup>(54)</sup>.



Por su parte en Alemania, ya existe una producción y comercialización de este biocombustible, es así como en aproximadamente 1000 estaciones de servicio de un total de 16000 estaciones de llenado de combustible, el biodiesel está siendo expendido y también es muy usado por cruceros turísticos que navegan por los diferentes lagos de este país <sup>(55)</sup>. La participación del biodiesel en el mercado alemán ha alcanzado ya un 0,3% en relación al diesel total vendido en este país, lo que significa una venta de 100.000 toneladas <sup>(53)</sup>. En el futuro se espera que este consumo suba notoriamente, pero no a un nivel donde se supla al diesel por completo.

En los EEUU también se ha producido y comercializado biodiesel en grandes cantidades. La DOE designó oficialmente al biodiesel puro como un combustible alternativo en 1998. La flota de carga norteamericana es uno de los grandes usuarios de este biocombustible. <sup>(54)</sup>

Dentro de Sudamérica Argentina y Colombia son los países que más se han preocupado tanto de la investigación, producción y uso del biodiesel; así como de la creación de normas para el uso del mismo. Para el caso argentino, el biodiesel más utilizado proviene del aceite de soya, pero este no sería suficiente para reemplazar en su totalidad al diesel, ya que solo quedaría un 26% de la producción total para destinarlo a la industria de los alimentos, lo que no satisficaría la demanda del mercado local. Sin embargo Argentina tiene la posibilidad de producir biodiesel a base de otros vegetales que se dan en su tierra como son el maní, el girasol, la colza y la palma. En la actualidad se localizan diversas plantas distribuidas fundamentalmente a lo largo de 6 provincias. En lo que respecta a las normas relacionadas con la producción de biodiesel, el IRAM en conjunto con varias instituciones tales como La Universidad Tecnológica Nacional, el INTI y compañías involucradas en el área petrolera y fabricantes de biodiesel, se encuentran desarrollando la Norma de Especificaciones del Biodiesel. <sup>(54)</sup>

Colombia por su parte, constituye el mayor productor de Palma en todo el continente americano, lo que es un incentivo para desarrollar una alternativa energética en base a este recurso. El gobierno ha decidido incentivar a que se realicen investigaciones que lleven a explotar el biodiesel <sup>(56)</sup>. Dentro de las

investigaciones referentes al biodiesel, el grupo de recursos y procesos térmicos de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia (Medellín), trabaja conjuntamente con el Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de Energía de la Universidad de Antioquia, y con la empresa privada Interquim S.A, en la optimización la reacción química de transesterificación utilizada para la obtención del biodiesel. Con esto se pretende producir biodiesel en grandes cantidades, con una mayor eficiencia y el menor costo. Estudios argumentan que en el caso del biodiesel Colombiano, lo ideal sería el uso de una mezcla B-30 <sup>(57)</sup>.

En Uruguay, la situación es diferente. Ya existe una planta de producción de biodiesel que pertenece a la Intendencia sanducera y se encuentra ubicada en Paysandú. Dicha planta no posee una capacidad muy alta y está actualmente destinada a producir biodiesel para abastecer a los vehículos del municipio con un combustible B-20 y B-30, sin embargo esto ha sido un gran inicio para que el biodiesel poco a poco vaya siendo usado en Uruguay. El biodiesel en Uruguay fue exonerado de impuestos hasta el 30 de diciembre de 2005. <sup>(58)</sup>

A nivel mundial, Malasia es el mayor productor de aceite de palma con 15 millones de toneladas anuales <sup>(59)</sup>. Esto ha motivado a que este recurso que parecería ilimitado, sea usado para la producción de biodiesel de una forma descontrolada, que ha derivado en una prohibición por parte del gobierno para abrir cualquier otra planta productora de biodiesel. La razón es simple, puede que no se satisfaga la demanda de aceite de palma como alimento. Hasta el día de hoy 32 proyectos para abrir plantas de biodiesel fueron aprobados en Malasia, lo que significa una producción anual de 3 millones de toneladas de biodiesel, y además 87 proyectos más se encontraban en carpeta hasta que esta prohibición fue impuesta <sup>(60)</sup>. El gobierno de malasia ha solicitado el estudio del impacto de la producción del biodiesel en la aplicación alimenticia del aceite de palma, con una proyección a futuro. Una vez realizado esto se abrirán únicamente aquellas plantas que se crean necesarias en base a los resultados arrojados por este estudio.

## 2.3.6 NORMATIVAS PARA EL BIODIESEL

La ASTM elaboró la especificación D-6751 (ver tabla 2.6) para asegurar así la calidad del biodiesel producido. Aunque originalmente se trató de hacer una norma para el uso del B-100 como combustible único en motores Diesel, la falta de experiencia con mezclas altamente concentradas impidió que esto ocurra. Por lo tanto, este estándar es aplicable para realizar mezclas B-20 o menores. A pesar de ello, muchos usuarios en EEUU utilizan el B-100 basándose en esta norma.

**Tabla 2.6** Norma ASTM D 6751-03<sup>a</sup>

PROPIEDAD	MÉTODO ASTM	LÍMITES	UNIDADES
Punto de Inflamación	D-93	130,0 min.	°C
Agua y Sedimentos	D-2709	0,050 máx.	% vol.
Viscosidad Cinemática @ 40 °C	D-445	1,9 @ 6,0	mm <sup>2</sup> /s
Cenizas Sulfatadas	D-874	0,020 máx.	% masa
Sulfuro*	D-5453	0,0015 máx. ( S 15 ) 0,0500 máx ( S 500 )	% masa
Corrosión en el Cobre	D-130	No 3. máx.	
Número de Cetano	D-613	47 mín.	
Punto Nube	D-2500	Reportar al usuario**	°C
Residuos de Carbón***	D-4530	0,050 máx.	% masa
Número Ácido	D-664	0,80 máx.	mg. KOH/g
Glicerina Libre	D-6584	0,020 máx.	% masa
Glicerina Total	D-6584	0,240 máx.	% masa
Contenido de Fósforo	D-4951	0,001 máx.	% masa
Temperatura de Destilación ( T 90 )****	D-1160	360 máx.	°C
* El contenido de sulfuro será reducido a 15 ppm para el 2006 en los EEUU. ** Se debe tomar en cuenta que el punto nube aumenta al realizar las mezclas *** El contenido de carbón debe ser medido en el 100 % de la muestra. **** Temperatura atmosférica equivalente.			

Fuente: Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels.

## 2.4 NORMAS AMBIENTALES RESPECTO A LOS GASES PRODUCTO DE LA COMBUSTIÓN EN AUTOMOTORES A DIESEL

Para el caso del diesel puro, las emisiones de gases contaminantes provenientes del proceso de combustión dentro de vehículos automotores, tienen que encontrarse dentro de ciertos límites normados. Mundialmente, muchos países adoptan los estándares EURO como base para el control de las emisiones. En el Ecuador, estos límites se detallan en la norma NTE INEN 2 207:2002. El alcance de esta norma abarca todos los motores de fuentes móviles de más de 3 ruedas que usan diesel como combustible, las cuales pueden ser bien importadas o ensambladas en el país. En la tabla 2.7 se detallan los límites máximos de emisiones permitidos.

**Tabla 2.7** Límites máximos de emisiones permitidos para fuentes móviles con motor diesel

CLASE	PESO DEL VEHÍCULO [Kg]	PESO DEL VEHÍCULO CARGADO [Kg]	CO [g/Km]	HC [g/Km]	NOx [g/Km]	PM [g/Km]	CICLOS DE PRUEBA
Vehículos livianos *	Todos	Todos	2,10	0,25	0,62	0,12	FTP – 75
Vehículos medianos *	≤ 3860	≤ 1700	6,2	0,5	0,75	0,16	
		>1700 ≤3860	6,2	0,5	1,1	0,28	
Vehículos pesados**	> 3860	Todos	15,5	1,3	5,0	0,10***	Transiente pesado
M1 <sup>(1)</sup>	≤ 3500	Todos	2,72	0,97		0,14	ECE- 15 +EUDC
M2 <sup>(2)</sup> , N1		≤ 1250	2,72	0,97		0,14	
		>1200 ≤1700	5,17	1,4		0,19	
		> 1700	6,9	1,7		0,25	
N2,N3, M2, M3 <sup>(3)</sup>	> 3500	Todos	4,0	1,1	7,0	0,15	ECE - 49
* Prueba realizada a nivel del mar ** En [g/BHP-h] *** Para buses urbanos el valor es 0,07 [g/BHP-h]							
(1) Vehículos que transportan hasta 5 pasajeros más el conductor y con un peso bruto del vehículo menor o igual a 2,5 toneladas. (2) Vehículos que transportan hasta 5 pasajeros más el conductor o cuyo peso bruto del vehículo exceda a 2,5 toneladas. (3) Unidades [g/Kw-h]							

Fuente: NTE INEN 2 207:2002

Esta norma hace referencia también a los límites de opacidad permitidos para las emisiones realizadas por los vehículos a diesel, dichos límites se presentan en la tabla 2.8 y están dados en condición de aceleración libre.

**Tabla 2.8** Límites de opacidad permitidos para fuentes móviles con motor a diesel

<b>Año modelos</b>	<b>% Opacidad</b>
2000 y posteriores	50
1999 y anteriores	60

Fuente: NTE INEN 2 207:2002



# CAPÍTULO 3

## METODOLOGÍA Y EQUIPAMIENTO

### 3.1 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN

Para la caracterización de los combustibles se consideró conveniente determinar propiedades como la densidad API, la viscosidad, el poder calórico, el punto de inflamación, el punto de nebulización y vertido, temperatura de destilación y número de centano. Estas propiedades se determinan siguiendo los procedimientos estandarizados por las normas ASTM.

#### 3.1.1 DENSIDAD API

Este ensayo se lo realiza siguiendo lo expresado en la norma ASTM D-287. El método utilizado se basa en el principio de que la densidad de un líquido varía directamente con la profundidad de inmersión de un cuerpo sólido que flota en dicho líquido. En el ensayo, este cuerpo se encuentra graduado en unidades de densidad API y recibe el nombre de Hidrómetro API.

##### A. Materiales y Equipos

###### Materiales

- 900 [ml] de muestra de combustible.
- Recipiente graduado o probeta.

###### Instrumentos

- Hidrómetro ASTM H4 (Rango: 29 – 41 °API, apreciación: 0,1 °API).

###### Implementos de seguridad industrial:

- Mandil

##### B. Procedimiento

Se coloca 900 [ml] de la muestra del combustible en una probeta, para inmediatamente después colocar el hidrómetro adecuado dentro de dicha

probeta. Para seleccionar el hidrómetro adecuado, se debe tener en cuenta que estos poseen una numeración consistente en un número seguido por una “H”. Mientras más denso es el líquido, el hidrómetro que se va a sumergir debe ser más pesado lo que significa que su numeración es más baja.



**Figura 3.1** Hidrómetro ASTM H4

Si el hidrómetro flota en la muestra, significa que se ha seleccionado un hidrómetro adecuado. Cuando esto sucede, se debe esperar un tiempo hasta que el hidrómetro se estabilice para tomar la medida tanto de la densidad API, así como de la temperatura. Dicha temperatura debe rondar los 60 [°F] según lo expresa la norma, aunque se admite trabajar con cualquier temperatura entre los -18 y 90 [°C], siempre y cuando la muestra se cumpla con las condiciones expresadas en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1** Condiciones limitantes y temperaturas de prueba.

TIPO DE MUESTRA	LÍMITES DE DENSIDAD	LÍMITE INICIAL DEL PUNTO DE EBULLICIÓN	OTROS LÍMITES	TEMPERATURA DE PRUEBA
Altamente volátil	Más ligero de 70 °API	-	-	Enfriado a 2°C o más bajo en un recipiente original cerrado.
Moderadamente volátil	Más pesado de 70 °API	Bajo 120°C	-	
Moderadamente volátil y viscoso	Más pesado de 70 °API	Bajo 120°C	Viscosidad muy alta a 18°C	Calentado a la mínima temperatura para que tenga suficiente fluidez.
No-volátil	Más pesado de 70°API	Bajo 120°C	-	Cualquier temperatura entre 18 y 90°C.
Mezclas de productos no derivados del petróleo	-	-	-	15,56 ± 0,1 °C

Fuente: Norma ASTM D-287



### 3.1.2 VISCOCIDAD CINEMÁTICA

Este ensayo se lo realiza siguiendo lo expresado en la norma ASTM D-445. El método utilizado consiste en medir el tiempo que se demora un cierto volumen del líquido en análisis en fluir por gravedad a través de un tubo capilar de un viscosímetro calibrado a una temperatura controlada y conocida.

#### A. Materiales y Equipos

Materiales:

- Muestras de combustible

Instrumentos:

- Termómetro de mercurio. (Rango: -30 a 50 [°C], apreciación: 0,5 [°C])
- Tubo de ensayo

Equipo

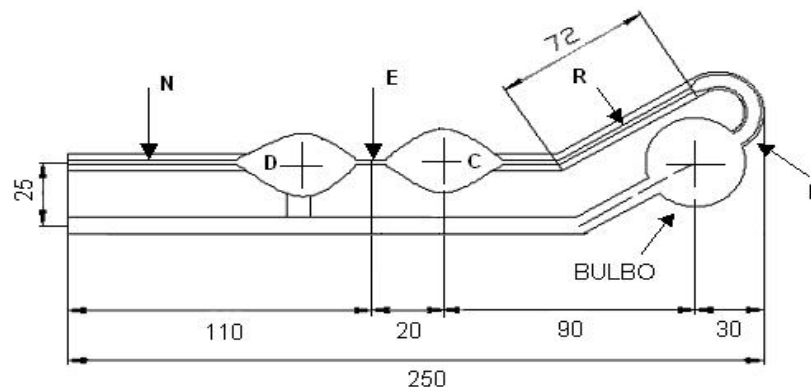
- Viscosímetro N° 75 (Rango de 1,6 – 8 y constante de 0,008 [mm<sup>2</sup>/s])

Implementos de seguridad industrial:

- Mandil

#### B. Procedimiento

Primero se debe identificar el viscosímetro (ver figura 3.2) según lo especificado en la norma ASTM D-446. Cada viscosímetro posee una numeración que se encuentra en función del rango de viscosidad del fluido. Mientras dicha numeración es menor, lo es también el diámetro del capilar del viscosímetro por lo que presenta una mayor resistencia al paso del fluido.



**Figura 3.2** Viscosímetro Canon - Fenske para líquidos transparentes  
Fuente: Norma ASTM D-446

Una vez seleccionado el viscosímetro se llena su bulbo con la muestra a estudiar en  $\frac{3}{4}$  de su capacidad total. Inmediatamente después se realiza la etapa de control de temperatura, donde se coloca el viscosímetro dentro del baño (ver figura 3.3) y se lo deja dentro por alrededor de 5 minutos. La temperatura se la controla por medio de un control digital ubicado en la parte superior del baño.



**Figura 3.3** Baño (Laboratorio de petróleos de la Universidad Central del Ecuador)

Una vez que la muestra se encuentre a la temperatura deseada, se coloca una pera (dispositivo para crear vacío) en el extremo de menor diámetro del viscosímetro y se succiona la muestra que se encuentra en el bulbo, elevándola hasta la parte superior del bulbo D (ver figura 3.1). Hecho esto, se retira la pera y se toma el tiempo que se demora la muestra en fluir por efecto de la gravedad entre dos puntos ubicados antes y después del bulbo C. Finalmente, para obtener la viscosidad cinemática se multiplica el tiempo obtenido por la constante del viscosímetro seleccionado (ver tabla 3.3).

### **3.1.3 PUNTO DE INFLAMACIÓN**

Este ensayo se lo realiza siguiendo lo expresado en la norma ASTM D-92 y consiste en un método dinámico en el cual la precisión se controla por medio del valor del incremento de temperatura que se aplica.

## A. Materiales y Equipos

Materiales:

- 75 [ml] de muestra de combustible
- Cilindro de GLP.

Instrumentos:

- Termómetro de mercurio.( Rango: -20 a 80 [°C] y apreciación: 2 [°C])

Equipo:

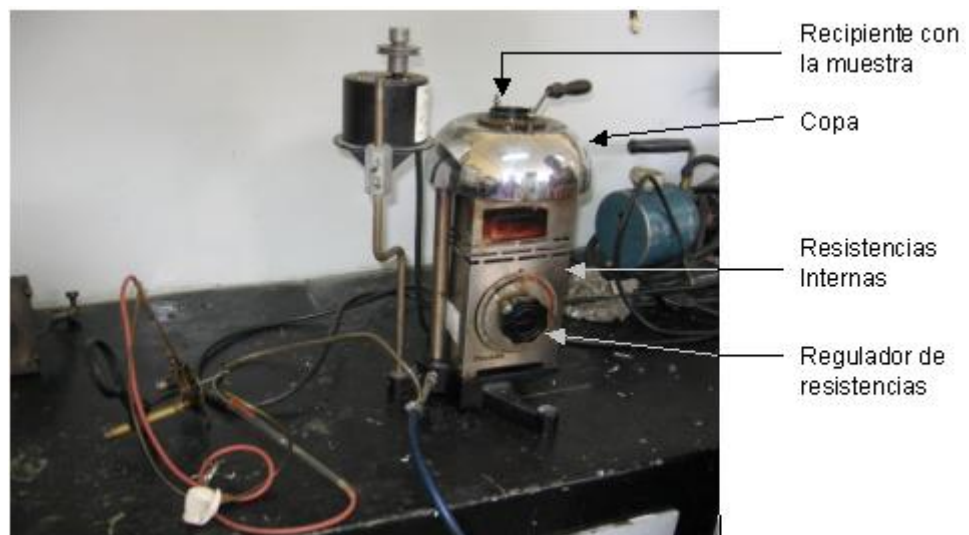
- Copa de Pensky-Matters

Implementos de seguridad industrial:

- Mandil

## B. Procedimiento

Se coloca la muestra de combustible en el recipiente hasta la línea indicadora (75 [ml]). Luego se ubica este recipiente en la parte superior del equipo llamado “Copa de Pensky-Matters” (ver figura 3.4), el mismo que internamente contiene resistencias que cumplen la función de calentar la muestra. Los gases que se desprenden de dicha muestra son agitados constantemente.



**Figura 3.4** Copa de Pensky-Matters

Se debe calentar la muestra lentamente de tal forma que los vapores producidos, sean distribuidos a lo largo de toda la cámara ayudados por un

agitador interno. Con cada incremento de 2 [°C] en la temperatura de los gases, se enciende una llama piloto o fuente de ignición (que no es más que una pequeña llama de alrededor de 3mm). Mediante un mecanismo, esta llama es introducida en la cámara donde se encuentran los gases o vapores del combustible. Si existe una explosión al introducir esta llama, se ha encontrado el punto de inflamación.

### **3.1.4 DESTILACIÓN ASTM**

Este ensayo se lo realiza siguiendo lo expresado en la norma ASTM D-86, y abarca la destilación atmosférica de productos derivados del petróleo, teniendo como finalidad determinar cuantitativamente las características de volatilidad de dichos productos, por medio de un equipo de destilación de laboratorio.

#### **A. Materiales y Equipos**

Materiales:

- 100 [ml] de muestra de combustible

Instrumentos:

- Termómetro de mercurio. (Rango: 0 a 400 [°C], apreciación: 1 [°C])
- Balón graduado (Volumen total: 125 [ml])
- Probeta graduada (Volumen total: 100 [ml] y apreciación: 2 [ml])

Equipos

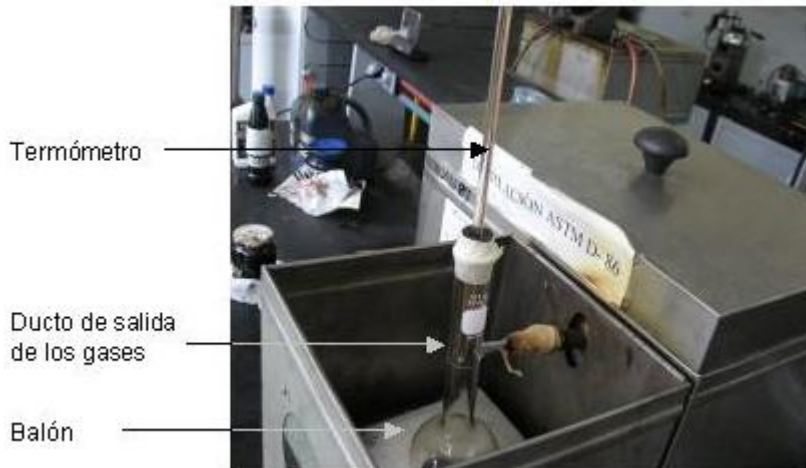
- Equipo de destilación ASTM.

Implementos de seguridad industrial

- Mandil
- Mascarilla

#### **B. Procedimiento**

Se coloca la muestra del combustible (100 [ml]) dentro de un balón graduado. Acto seguido se introduce un termómetro de mercurio dentro de un tapón y con este tapa la boca del balón. El bulbo del termómetro debe coincidir con el ducto de salida de los gases, como se puede observar en la figura 3.5.



**Figura 3.5** Balón de destilación

Una vez asegurado el termómetro, se pone el balón sobre el equipo de destilación. Luego se coloca una tapa para reducir las pérdidas de calor y se procede a encender el equipo. Se debe colocar la probeta en la salida del condensado con el fin de recibir dicha destilación y medir el volumen destilado como se indica en la figura 3.6.



**Figura 3.6** Equipo de destilación ASTM

Al encender el equipo, las resistencias eléctricas empiezan a calentar la muestra de combustible contenida en el balón, provocando que dicha muestra se evapore. Los gases de evaporación ingresan al conducto refrigerante donde éstos se condensan y fluyen hasta la probeta graduada. El conducto refrigerante es mantenido a 60 [°C] para evitar la formación de depósitos.

Se debe tomar la temperatura inicial cuando cae la primera gota de condensado dentro de la probeta. A partir de ahí, se toman los datos de temperatura cada 5 [ml] de condensado hasta los 95 [ml]. Adicionalmente se toma la temperatura en el punto final (cuando ya no cae más condensado) y los volúmenes de destilado y de residuo. Finalmente se calcula el volumen de pérdida restando el volumen de condensado y de residuo del volumen total.

### 3.1.5 NÚMERO DE CETANO

Este ensayo se lo realiza siguiendo lo expresado en la norma ASTM D-976. Tras obtener los datos de densidad API y de destilación ASTM mediante los especificado en las normas D-287 y D-86 respectivamente se calcula el número de cetano mediante la siguiente expresión:

(3.1)

$$C = -420,34 + 0,016 * G^2 + 0,192 * G * \log(M) + 65,01 * [\log(M)]^2 - 0,0001809 * M^2$$

donde: C es el número de cetano, G es la densidad API según la norma ASTM D-287 y M es la temperatura media de destilación según ASTM D86

### 3.1.6 PODER CALÓRICO

Este ensayo se lo realiza según lo especificado en la norma ASTM D-240. El ensayo consiste en quemar una cantidad de combustible previamente pesada en un ambiente saturado de oxígeno dentro de una bomba calorimétrica adiabática. El poder calórico superior es determinado al computar las temperaturas medidas antes, durante y después de la combustión y es expresado en [ MJ / Kg ].

#### A. Materiales y Equipos

Materiales:

- 50 [ml] de cada muestra de combustible
- Gotero

- Oxígeno
- Agua
- Lana
- Alambre de ignición
- Ácido Benzoico

Instrumentos:

- Balanza digital (Apreciación: 0,1 [g])
- Termómetros de mercurio (Rango: 20,9 a 27,1 [°C], apreciación: 0,01 [°C] y rango: -10 a 100 [°C], apreciación: 0,1 [°C])
- Prensa manual de tornillo y matricería.

Equipos:

- Bomba calorimétrica adiabática.

Implementos de seguridad industrial

- Mandil

## **B. Procedimiento**

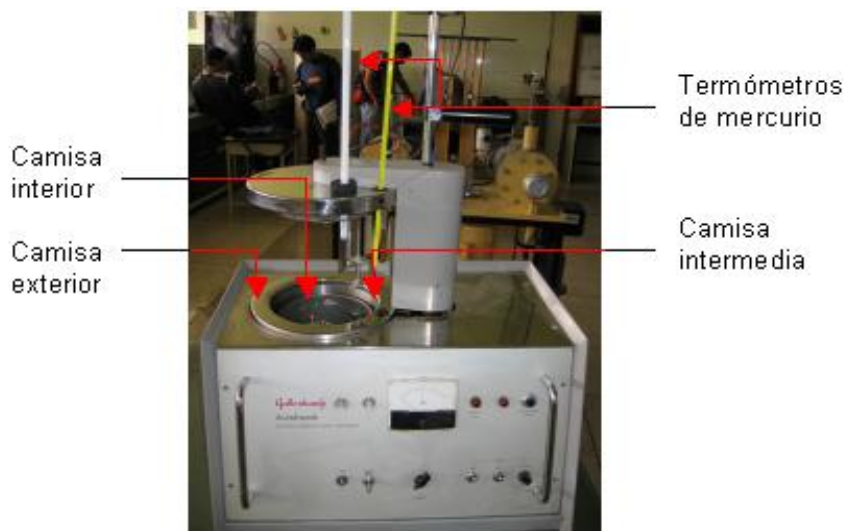
El ensayo empieza con la calibración de la bomba calorimétrica adiabática. Para esto se usa ácido benzoico, sustancia cuyo poder calórico es conocido. Primero se prepara una pastilla de ácido benzoico colocando 1 [g] del ácido en polvo en una matriz y prensándolo para formar una pastilla. Para calibrar la bomba se necesita conocer el poder calórico práctico del ácido benzoico, para lo cual se utiliza el mismo procedimiento que se utilizaría para medir el poder calórico de cualquier combustible sólido o líquido.

Se comienza colocando el alambre de ignición entre dos electrodos. Se ata un tramo de lana a dicho alambre, de manera que esta haga el papel de mecha hasta el crisol donde se coloca la muestra. Se encera la balanza con el peso del crisol vacío y con el gotero se colocan 0,8 [g] de la muestra de combustible. Luego se coloca el crisol con el combustible en el soporte que está sujeto a la tapa de la bomba tal como se ve en la figura 3.7.



**Figura 3.7** Bomba de calor

Adicionalmente, se coloca una gota de agua dentro de la bomba para que el ambiente quede saturado de humedad y por lo tanto el agua, producto de la combustión, se condensará en lugar de quedar como vapor de agua. Se procede a cerrar la bomba y se inyecta oxígeno a 15 [psi] de presión durante 50 [s]. Se coloca la bomba dentro de una camisa de agua (ver figura 3.8) a una temperatura muy cercana a 21 [°C]. Alrededor de esta camisa está, una camisa intermedia y luego una camisa exterior, que se encuentran siempre a la misma temperatura. De esta forma se logra que la camisa interior no pierda calor, ya que a medida que esta se calienta, la exterior lo hace en la misma medida por medio de resistencias eléctricas. Por esta razón, se coloca un termómetro para la camisa interior y otro para la exterior. La diferencia de temperaturas de estas camisas no debe ser mayor a 0,2 [°C]. Cabe mencionar que existe un agitador para la camisa interior.



**Figura 3.8** Bomba calorimétrica adiabática



Para tomar los datos se tapa el conjunto, se enciende el equipo y se comprueba que exista un buen contacto para la ignición. Una vez que las temperaturas estén reguladas a 21 [°C] se provoca la ignición con lo que se quema el combustible colocado en el crisol.

Para determinar el poder calórico se debe tomar la temperatura inicial ( $T_o$ ) y la temperatura final ( $T_f$ ) a la que se eleva el agua de la camisa interna. Con estos datos se procede a calcular el poder calórico con la siguiente ecuación:

$$PC_c = \frac{(Tf_c - To_c) * \frac{PC_B * m_B}{(Tf_B - To_B)}}{m_c} \quad (3.2)$$

donde:  $PC_c$  es el poder calórico buscado (del combustible),  $Tf_c$  es la temperatura final alcanzada (con el combustible),  $To_c$  es la temperatura inicial (con el combustible  $\approx 21$  [°C]),  $PC_B$  es el poder calórico del ácido benzoico (26454 [KJ/Kg]),  $m_B$  es la masa de ácido benzoico quemada (1 [g]),  $Tf_B$  es la temperatura final alcanzada (con el ácido benzoico),  $To_B$  es la temperatura inicial (con el ácido benzoico  $\approx 21$  [°C]) y  $m_c$  es la masa de combustible quemada (0,8 [g])

### 3.1.7 PUNTO DE NEBULIZACIÓN Y DE VERTIDO

Los ensayos de punto de nebulización y de vertido se los realiza según lo especificado en la norma ASTM D-2500 y D-97 respectivamente. Estos ensayos constan de procesos similares y tienen la finalidad de determinar las propiedades de fluidez a bajas temperaturas de los combustibles derivados del petróleo.

#### A. Materiales y Equipos

Materiales:

- 75 [ml] de cada muestra de combustible

Instrumentos:

- Termómetro de mercurio. (Rango: -30 a 50 [°C], apreciación: 0,5 [°C])
- Probeta (Rango: -10 a 100 [°C], apreciación: 1 [°C])
- Prensa manual de tornillo y matricería.

Equipos

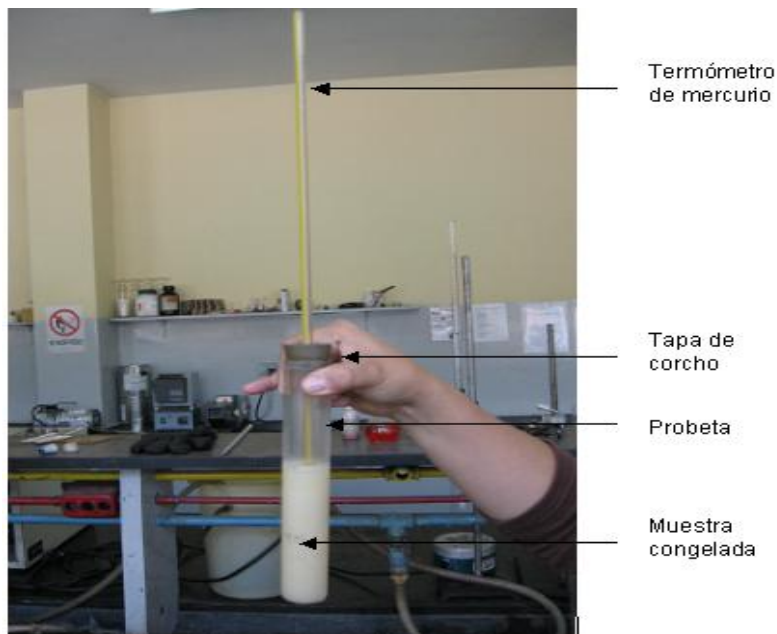
- Refrigerado para petróleos

Implementos de seguridad industrial

- Mandil

## B. Procedimiento

Primero se coloca 75 [ml] de la muestra en una probeta y se la guarda en la refrigeradora hasta que dicha muestra se congele (alrededor de 3 días). Transcurrido este tiempo, se introduce el termómetro dentro de la muestra y se la tapa por medio de un corcho y se espera a que se estabilice la temperatura (ver figura 3.9).



**Figura 3.9** Muestra de diesel ecuatoriano congelada

Para obtener el punto de vertido, se inclina el tubo un ángulo de 45°, si la muestra presenta movimiento o vertido, se ha encontrado el punto de vertido.

Caso contrario, se espera que la muestra suba 3 [°C] y se repite el procedimiento hasta que esta presente movimiento.

Para el caso del punto de nebulización se realiza una especie de juego con la temperatura de la muestra. Esto es, si la muestra presenta una apariencia transparente (no posee presencia de cristales), se la debe enfriar hasta que la cristalización ocurra. Cuando existe la primera manifestación de la presencia de cristales, se ha encontrado el punto de nebulización. Si ocurre lo contrario, es decir, cuando se observa una abundante presencia de cristales, se debe calentar la muestra para encontrar el punto de nebulización. Los intervalos de calentamiento o de enfriamiento son de 3 [°C].

## **3.2 PRUEBAS DE RENDIMIENTO A VELOCIDAD VARIABLE**

Estas pruebas se hacen principalmente para determinar el consumo específico de combustible, el torque y la potencia al freno. Al utilizar una aceleración constante, se puede controlar la variación de la velocidad con la carga aplicada sobre el eje y de esta forma hallar las curvas de estos parámetros de desempeño en relación a la velocidad. Para este estudio se evalúan también el consumo másico de combustible y de aire, la relación aire-combustible, la temperatura de los gases de escape, las eficiencias térmica y volumétrica y las emisiones de gases.

### **3.2.1 MEDICIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DESEMPEÑO**

Esta prueba persigue el objetivo de calcular los diferentes parámetros que determinan el desempeño de un motor, a partir de datos básicos como son: la carga, velocidad de giro, caída de presión, temperatura de escape y tiempo de consumo de un volumen de prueba. Esta prueba se la realiza en el banco de pruebas PLINT TE-16 perteneciente al laboratorio de Motores de la ESPE.

#### **A. Materiales y Equipos**

##### Materiales

- 2,5 Galones de cada combustible a evaluarse (Diesel y mezclas)

- Embudo
- Guaipes

#### Equipo

- Banco de pruebas PLINT TE-16 (ver Anexo C)

#### Implementos de seguridad

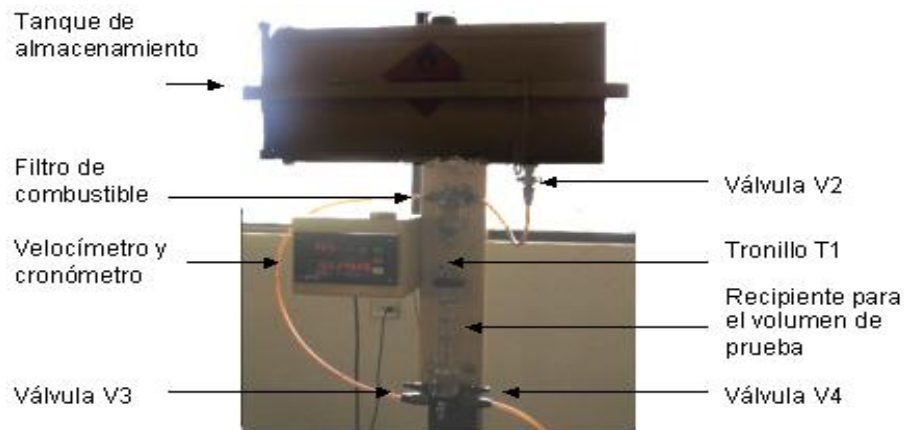
- Overol
- Orejeras
- Mascarilla

### **B. Procedimiento**

Para realizar esta prueba se comienza con la configuración inicial del banco, esto comprende asegurarse que: el banco esté alimentado, haya agua en el reservorio, esté conectada la bomba de agua, haya combustible en el tanque, las líneas de paso de combustible estén abiertas, así como que los accionadores de los cilindros de las bombas de inyección y que la palanca de descompresión esté accionada. Se debe tomar en cuenta que el sistema de combustible debe estar purgado. El calentamiento del motor se lo realiza en ralentí (cero aceleración) y con cero carga. Para el arranque del motor, se puede usar el freno eléctrico (generador) como motor de arranque. Se debe esperar entre 40 a 50 minutos a que el motor se caliente, lo que se controla con la temperatura del agua en el reservorio, que debe alcanzar los 70 [°C]. Durante el calentamiento se puede reducir el caudal del refrigerante para que el motor se caliente más rápido.

Para iniciar la toma de datos se debe esperar que la temperatura de los gases de escape este alrededor de los 480 [°C] con el motor funcionando a una aceleración del 80% y sometido a carga máxima (carga total del potenciómetro y activadas las 15 resistencias). Los datos de carga, caída de presión, temperatura de escape y velocidad de giro se los toma directamente en los instrumentos de medición. Para medir el consumo (ver figura 3.10), primero se abre el tornillo 1 y se espera que se llene el recipiente. Inmediatamente se cierra la válvula 3 y se cronometra el tiempo que el motor se demora en consumir el volumen de prueba establecido. Para la toma de datos se a

diferentes velocidades se debe disminuir la carga de acuerdo al objetivo que se persiga en las pruebas y permitiendo que el motor se estabilice. El motor no debe tener una variación mayor a  $\pm 10$  rpm durante un minuto como mínimo para considerar que el motor está estabilizado. La temperatura del refrigerante en el reservorio se debe mantener entre los 60 y 80 [°C].



**Figura 3.10** Sistema de medición del consumo de combustible

Como precaución adicional para la medición del tiempo en que se consume el volumen de prueba, se tomó también el dato de velocidad de giro total durante dicho tiempo. De esta forma es posible calcular una velocidad media de giro a la que se mantuvo el motor y compararla con la velocidad a la que se pretendía estabilizar el motor para el dato correspondiente. Para esto se estableció una tolerancia de  $\pm 5$  rpm. Para el caso de este estudio se ha determinado el límite máximo y mínimo de revoluciones que alcanza el motor, sin carga y con carga máxima respectivamente, con el fin de obtener alrededor de 10 datos dentro de este rango. Adicionalmente se debe considerar que se calentaron las mezclas diesel-aceite de palma aproximadamente hasta los 45 [°C] antes de introducirlas al tanque de combustible ya que estas presentaban cierta precipitación a temperatura ambiente.

### 3.2.2 MEDICIÓN DE LAS EMISIONES DE GASES DE ESCAPE

En estas pruebas se miden los diferentes contaminantes que conforman los gases de escape. Para este estudio se midieron los valores de las emisiones de CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HC y PM.

## **A. Materiales y Equipos**

### Materiales

- 2 Litros de cada combustible a evaluarse (Diesel puro y mezclas)
- Guaipes
- Manguera de 15 [m] de longitud y de 6 [mm] de diámetro interior

### Equipo

- Banco de pruebas PLINT TE-16 (ver Anexo C)
- Clean AIR Technologies, modelo Montana OEM2100 (figura 3.11a)

### Implementos de seguridad

- Overol
- Orejeras
- Mascarilla

## **B. Procedimiento**

El procedimiento inicia con la instalación del equipo de medición de gases “Clean AIR Technologies” perteneciente a la CORPAIRE. Dicho equipo posee dos bancos de prueba, de los cuales se obtiene un promedio como dato válido. Además posee dos sondas diferentes, una que se encarga de medir CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y HC; mientras que la segunda sonda mide el material particulado. Estas sondas van conectadas desde la salida del escape hacia los filtros que se encuentran ubicados en la parte posterior del equipo, como se puede observar en la figura 3.11 b. Cabe mencionar que es necesario limpiar los filtros y las sondas antes de instalarlas. El equipo también posee una manguera de la cual toma aire puro con el fin de encerarse; así como un sensor láser que mide las revoluciones del motor, lo que sirve como verificación del valor de revoluciones dado por el banco de pruebas.

Una vez conectado el equipo, se enciende el banco de pruebas (calentado previamente según lo indicado en 3.2.1 B) y se espera alrededor de 10 minutos para que el motor se estabilice y comenzar con la toma de datos. Los datos de emisiones se los obtiene en forma inmediata en el equipo de medición de

gases. Para dar continuidad a los ensayos, se reemplazó el tanque de almacenamiento de combustible propio del banco, por envases llenos con las diferentes mezclas, de tal forma que cuando se culminaba la toma de datos con una mezcla se podía realizar el cambio del tipo de combustible de forma inmediata sin necesidad de apagar el motor para sangrar el combustible.



Figura 3.11 Equipo Clean AIR Technologies perteneciente a la CORPAIRE

Para analizar las relaciones existentes entre los parámetros de rendimiento y las emisiones de gases, se usó la herramienta de análisis de regresión de Microsoft Excel. Se necesitan más de 30 datos para que estadísticamente se puedan usar regresiones distintas a la lineal. Esta herramienta permite combinar los datos de los parámetros de desempeño, así como de las emisiones a todas las velocidades y para todas las concentraciones. De esta forma, se obtienen 84 datos para los parámetros de desempeño hasta las 1810 rpm (149 datos en todo el rango de velocidad) y 71 datos para las emisiones. Consecuentemente, se pueden realizar análisis polinómicos de cualquier grado, así como otros tipos de ajustes. Adicionalmente, esta herramienta calcula la probabilidad de que se den las relaciones antes mencionadas.





# CAPÍTULO 4

## RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización descritos en 3.1. Los ensayos fueron realizados en el laboratorio de petróleos de la Universidad Central del Ecuador a excepción de los ensayos de poder calórico, los que se realizaron en el laboratorio de Termodinámica de la ESPE. Se caracterizaron las mezclas al 5, 10, 15, 20, 25 y 30% con diesel ecuatoriano y colombiano, además de los diesel y del aceite de palma puro. Los datos tabulados obtenidos en los ensayos de caracterización están documentados en el Anexo D (tablas AD-1 a la AD-16).

### 4.1 DENSIDAD

En la figura 4.1 se puede apreciar claramente que la densidad aumenta proporcionalmente con el aumento de la concentración. Se tiene aumentos del 0,48% por cada 5% de palma para mezclas con diesel ecuatoriano y de 0,29% para mezclas con diesel colombiano. Se puede apreciar que el diesel colombiano y sus mezclas presentan densidades mayores que sus contrapartes ecuatorianas

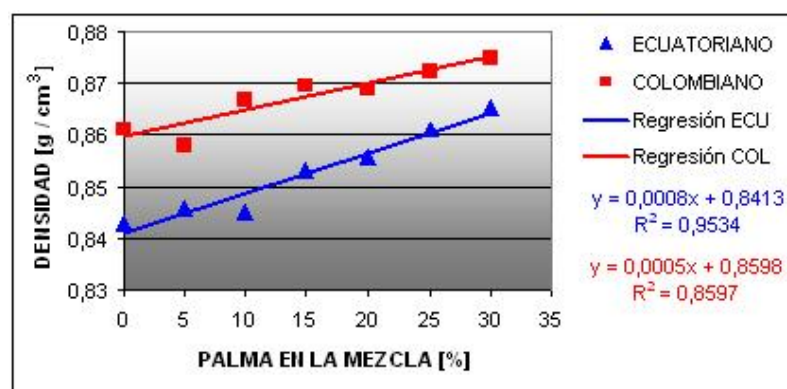


Figura 4.1 Variación de la densidad con la concentración

## 4.2 VISCOSIDAD CINEMÁTICA

En la figura 4.2 se puede observar que la viscosidad cinemática aumenta proporcionalmente con el aumento de la concentración. Se tiene aumentos del 9,6% por cada 5% de palma para mezclas con diesel ecuatoriano y de 10,7% para mezclas con diesel colombiano. Se puede apreciar que el diesel colombiano y sus mezclas presentan viscosidades mayores que las mezclas con diesel ecuatoriano.

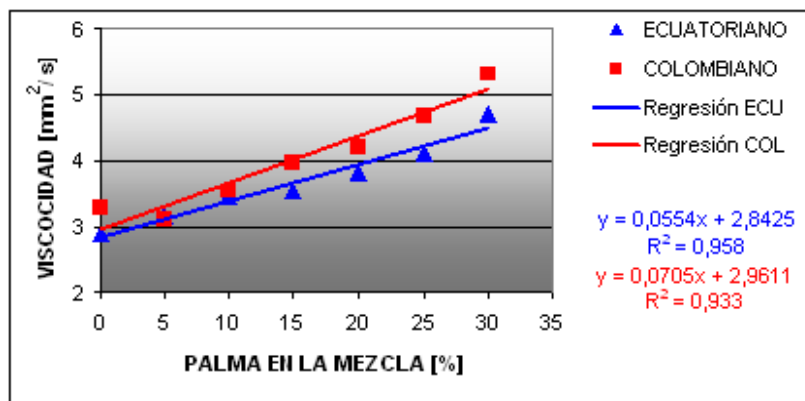


Figura 4.2 Variación de la viscosidad cinemática con la concentración

## 4.3 PUNTO DE INFLAMACIÓN

En la figura 4.3 se puede observar que el punto de inflamación presenta poca relación con la concentración de palma. En general se ve que el punto de inflamación se incrementa ligeramente. Este incremento es mayor para las mezclas con diesel colombiano.

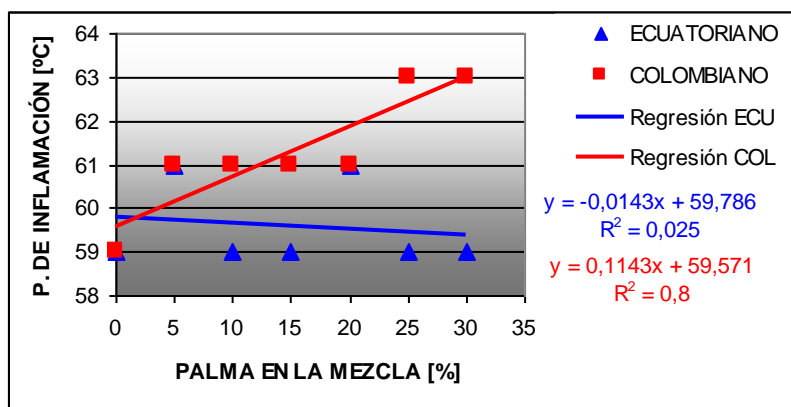
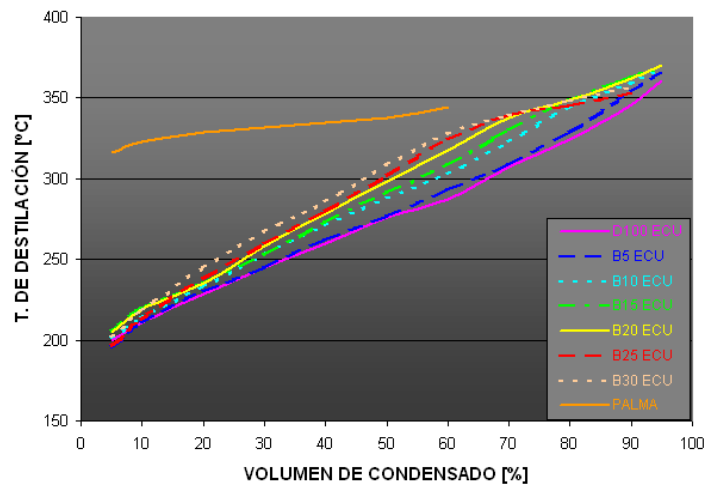


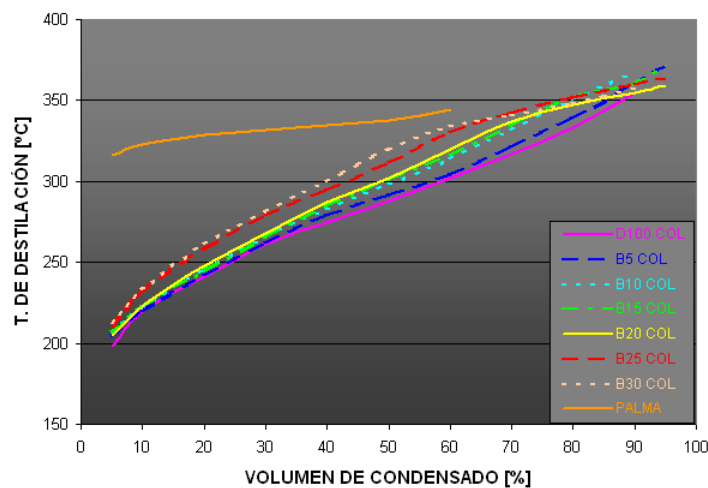
Figura 4.3 Variación del punto de inflamación con la concentración

## 4.4 DESTILACIÓN ASTM

En las figuras 4.4 y 4.5 se muestran las curvas de destilación para todos los combustibles. A simple vista se aprecia que la palma presenta temperaturas de destilación más altas para volúmenes de condensado pequeños en comparación a los dos diesel y a sus mezclas. Se observa que las temperaturas varían directamente con el volumen de condensado.



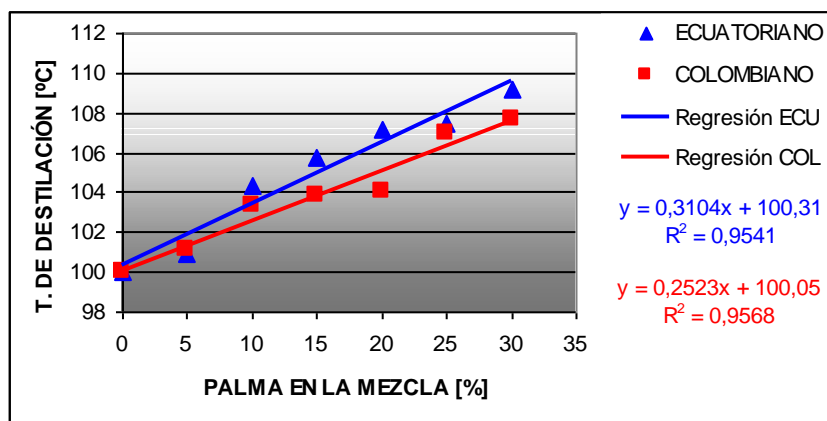
**Figura 4.4** Curva de destilación para mezclas con diesel ecuatoriano



**Figura 4.5** Curva de destilación para mezclas con diesel colombiano

En la figura 4.6 se muestra la variación porcentual de las temperaturas de destilación. Los diesel puros han sido tomados como valor referencial (100%). Las temperaturas de destilación aumentan directa y proporcionalmente con la concentración para las mezclas con ambos diesel. Se observa incrementos del 1,55% por cada 5% de palma para mezclas con diesel ecuatoriano y de 1,26%

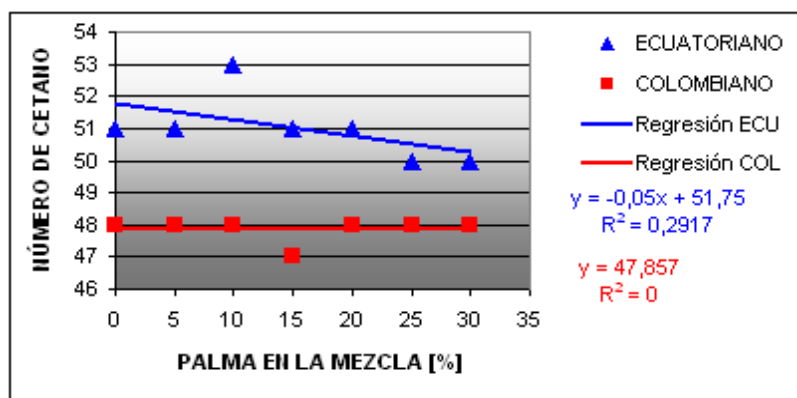
para mezclas con diesel colombiano. Adicionalmente, en el Anexo D se puede observar que el diesel colombiano y sus mezclas tienen temperaturas de destilación más altas que sus contrapartes ecuatorianas.



**Figura 4.6** Variación porcentual de las temperaturas de destilación desde T10 hasta T90.

## 4.5 NÚMERO DE CETANO

En la figura 4.7 se observa que el número de cetano presenta poca relación con la concentración. En general se ve que el número de cetano tiende a reducirse a medida que aumenta la concentración para mezclas con diesel ecuatoriano y a mantenerse constante para mezclas con diesel colombiano. El diesel ecuatoriano y sus mezclas presentan números de cetano más elevados.

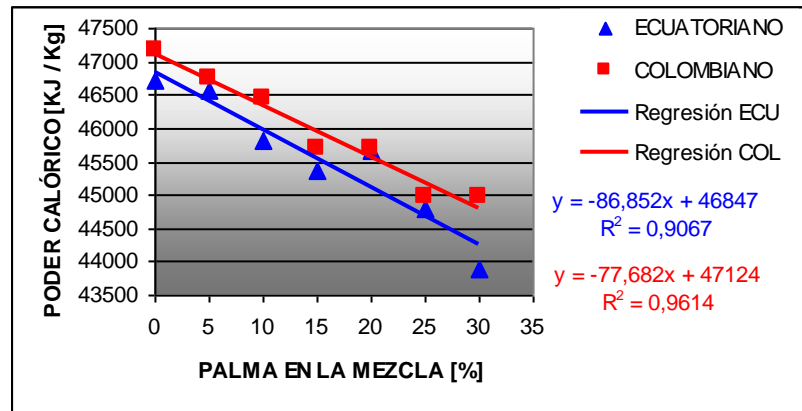


**Figura 4.7** Variación del número de cetano con la concentración

## 4.6 PODER CALÓRICO

En la figura 4.8 se observa que existe una reducción en el poder calórico en las mezclas con ambos diesel a medida que aumenta la concentración. Esta

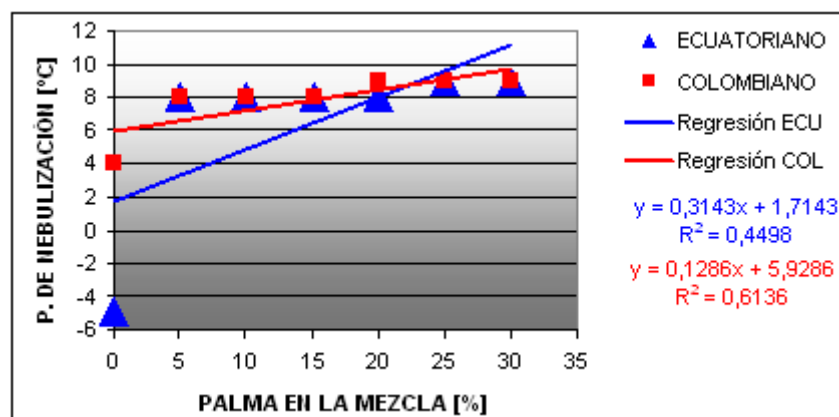
reducción es lineal y equivalente a 0,93% por cada 5% de palma para mezclas con diesel ecuatoriano y de 0,82% para mezclas con diesel colombiano. El diesel colombiano y sus mezclas presentan un mayor poder calórico superior. El error debido a la descalibración de la bomba calorimétrica adiabática es del 7% para el diesel ecuatoriano en comparación al valor obtenido en la UCN.



**Figura 4.8** Variación del poder calórico superior con la concentración

#### 4.7 PUNTO DE NEBULIZACIÓN Y DE VERTIDO

En la figura 4.9 se puede apreciar que el punto de nebulización tiende a incrementarse a medida que aumenta la concentración. Se observa que el punto de nebulización de las mezclas se mantiene alrededor de los 8 a 9 [°C]. Sin embargo, basta con concentraciones pequeñas de aceite de palma para que el punto de nebulización se incremente significativamente respecto a los diesel puros. Los puntos de vertido obtenidos son menores a 0 [°C] y están documentados en el Anexo D (tabla AD-16).



**Figura 4.9** Variación del punto de nebulización y de vertido con la concentración



## CAPITULO 5

### ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DEL FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DIESEL Y DE LAS EMISIONES DE GASES CONTAMINANTES DEBIDO AL USO DE MEZCLAS DIESEL - ACEITE DE PALMA COMO COMBUSTIBLE

#### 5.1 EVALUACIÓN EN CONDICIONES ESTÁNDAR DE UN MOTOR DIESEL

Se realizaron pruebas de rendimiento en un motor Diesel con mezclas diesel – aceite de palma en varias concentraciones a fin de comparar y evaluar el desempeño usando bio-combustible y diesel convencional. Las pruebas se las realizaron según lo especificado en 3.2.1. A continuación se muestran los datos obtenidos para el diesel ecuatoriano en las pruebas de rendimiento con el motor diesel PLINT TE-16 del laboratorio de Motores de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la ESPE. Los datos del diesel colombiano y de las mezclas diesel – aceite de palma están documentados en el Anexo E (tablas AE-1 a AE-14).

**Tabla 5.1** Datos de rendimiento para el diesel ecuatoriano

<b>N</b> <b>[rpm]</b>	<b>NT</b> <b>[rpm]</b>	<b>F</b> <b>[N]</b>	<b>Hg</b> <b>[mmH<sub>2</sub>O]</b>	<b>t</b> <b>[s]</b>	<b>Te</b> <b>[°C]</b>
1620	938	286	25,5	34,7	480
1660	950	287	27,0	34,3	490
1700	962	287	28,5	34,0	500
1740	985	288	30,0	33,9	510
1780	1074	281	31,5	36,3	510
1820	1491	229	34,0	49,2	450
1860	2492	119	38,0	80,4	320
1900	3469	57	41,0	109,7	240
1940	3973	28	43,0	122,8	200
1980	4326	7	44,5	131,1	190
2010	-	0	-	-	-

Con los datos de los parámetros medidos en los ensayos de rendimiento del motor diesel, propiedades termofísicas e hidráulicas y dimensiones del motor diesel y accesorios, se procede a realizar los cálculos de torque, potencia al freno, consumo másico de combustible, consumo específico de combustible, consumo másico de aire, relación aire – combustible, eficiencia térmica, eficiencia volumétrica.

*Datos:*

Bp: Brazo de palanca (318 [mm]).

Vp: Volumen de prueba (50 [cm<sup>3</sup>]).

dpo: Diámetro de la placa orificio (39 [mm]).

Patm: Presión atmosférica (73,327 [Pa]).

Ta: Temperatura ambiente (293 [K]).

R: Constante universal de los gases ideales ( 287 [N-m/Kg\*K]).

C1: Factor de transformación de unidades (9,81 [Pa/mm H<sub>2</sub>O]).

c: Coeficiente de pérdidas por fricción del aire (0,62).

Vd: Volumen desplazado de aire o cilindrada (1620 [cm<sup>3</sup>])

pa: Densidad del aire a 2800 metros sobre el nivel del mar (0,92 [Kg/m<sup>3</sup>]).

N: velocidad angular en [rpm].

NT: Revoluciones totales durante el consumo del Vp en [rpm].

F: carga del motor en [N].

Hg: caída de presión en la placa orificio en [mmH<sub>2</sub>O].

t: tiempo de consumo de un volumen de 50ml en [s].

Te: temperatura de los gases de escape a la salida del múltiple en [°C].

ρ: Densidad del combustible a 60 [°F] en [g/cm<sup>3</sup>] (tabla 4.1).

Q: Poder calórico del combustible en [KJ/Kg] (tabla 4.6).

*Parámetros a calcular:*

Tq: Torque en [N-m].

Pf: Potencia al freno en [Hp].

mc: Consumo másico de combustible en [Kg/h].

CEC: Consumo específico de combustible en [Kg/Kw-h].

ma: Consumo másico de aire en [Kg/h].



A/C: Relación aire – combustible.

$\eta_t$ : Eficiencia térmica [%].

$\eta_v$ : Eficiencia volumétrica en [%].

*Cálculos:*

$$Tq = F * Bp = 286 \text{ [N - m]} * 0,318 \text{ [m]} = 90,95 \text{ [N - m]}$$

$$Pf = N * Tq = \left( \frac{\pi}{30} * 1620 \right) \left[ \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] * 90,95 \text{ [N - m]} * \frac{1 \text{ [Hp]}}{746 \text{ [Kw]}} = 20,68 \text{ [Hp]}$$

$$mc = \frac{\rho * Vp}{t} = \frac{0,843 \left[ \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right] * 50 \text{ [cm}^3\text{]} * \frac{1 \text{ [Kg]}}{1000 \text{ [g]}}}{34,7 \text{ [s]} * \frac{1 \text{ [h]}}{3600 \text{ [s]}}} = 4,37 \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \right]$$

$$CEC = \frac{mc}{Pf} = \frac{4,37 \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \right]}{20,68 \text{ [Hp]} * \frac{0,746 \text{ [Kw]}}{1 \text{ [Hp]}}} = 0,283 \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{Kw - h}} \right]$$

$$ma = \frac{\pi * dpo^2 * c}{4} * \sqrt{\frac{2 * C1 * Hg * Patm}{R * Ta}}$$

$$ma = \frac{\pi * 0,039^2 \text{ [m}^2\text{]} * 0,62}{4} * \sqrt{\frac{2 * 9,81 \left[ \frac{\text{Pa}}{\text{mmH}_2\text{O}} \right] * 25,5 \text{ [mmH}_2\text{O]} * 73327 \text{ [Pa]}}{287 \left[ \frac{\text{N - m}}{\text{Kg - K}} \right] * 293 \text{ [K]}}} * \frac{3600 \text{ [s]}}{1 \text{ [h]}}$$

$$ma = 55,69 \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \right]$$

$$A / C = \frac{ma}{mc} = \frac{55,69 \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \right]}{4,37 \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \right]} = 12,73$$

$$\eta_t = \frac{P_f}{Q * mc} * 100 = \frac{20,68 \text{ [Hp]} * \frac{0,746 \text{ [Kw]}}{1 \text{ [Hp]}}}{46710 \left[ \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right] * 4,37 \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \right] * \frac{1 \text{ [h]}}{3600 \text{ [s]}}} * 100 \text{ [%]} = 27,18 \text{ [%]}$$

$$\eta_v = \frac{ma}{\frac{C_i * N}{2} * \rho_a} * 100 = \frac{55,69 \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \right]}{0,00162 \left[ \text{m}^3 \right] * 1620 \left[ \frac{\text{rev}}{\text{min}} \right] * \frac{60 \text{ [min]}}{1 \text{ [h]}} * 0,92 \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right]}{2} * 100 = 76,89 \text{ [%]}$$

De esta forma se construye la tabla 5.2. Los cálculos de los parámetros de rendimiento al utilizar el diesel colombiano y las mezclas diesel – aceite de palma están documentados en el Anexo F (tablas AF-1 a la AF-14).

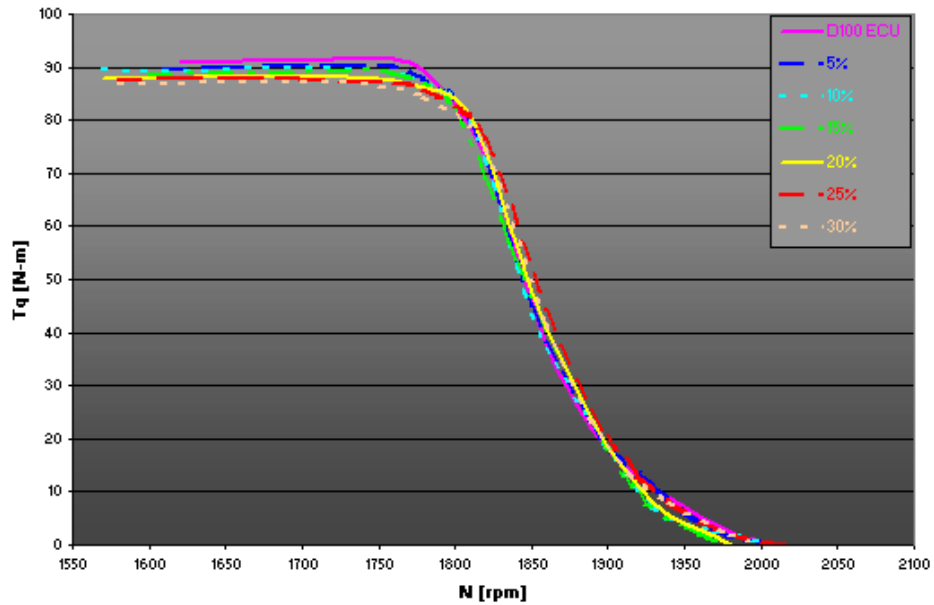
**Tabla 5.2** Parámetros de rendimiento para el diesel ecuatoriano

<b>N</b> <b>[rpm]</b>	<b>Tq</b> <b>[N-m]</b>	<b>Pf</b> <b>[Hp]</b>	<b>mc</b> <b>[Kg/h]</b>	<b>CEC</b> <b>[Kg/Kw-h]</b>	<b>ma</b> <b>[Kg/h]</b>	<b>A/C</b>	<b>ηt</b> <b>[%]</b>	<b>ηv</b> <b>[%]</b>
1620	90,95	20,68	4,37	0,284	55,69	12,73	27,18	76,89
1660	91,27	21,27	4,43	0,279	57,31	12,95	27,63	77,21
1700	91,27	21,78	4,46	0,275	58,88	13,19	28,05	77,46
1740	91,58	22,37	4,48	0,268	60,41	13,49	28,72	77,64
1780	89,36	22,33	4,18	0,251	61,90	14,80	30,70	77,77
1820	72,82	18,60	3,09	0,222	64,31	20,84	34,67	79,02
1860	37,84	9,88	1,89	0,256	67,98	36,01	30,09	81,75
1900	18,13	4,83	1,38	0,384	70,62	51,04	20,09	83,13
1940	8,90	2,42	1,24	0,683	72,32	58,51	11,28	83,37
1980	2,23	0,62	1,16	2,509	73,57	63,54	3,07	83,10
2010	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-

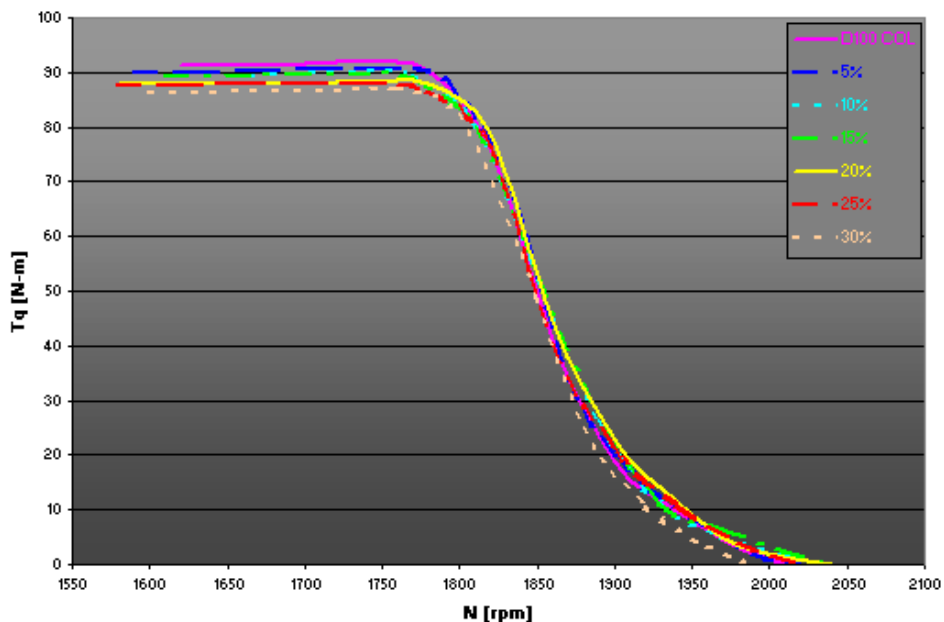
### 5.1.1 POTENCIA AL FRENO Y TORQUE

En las figuras 5.1 y 5.2 se presentan las curvas de torque obtenidas para todos los valores de velocidad y para las diferentes mezclas. Se puede apreciar que el torque se mantiene prácticamente constante hasta las 1780 - 1800 rpm. A partir de esta velocidad, este parámetro decae para todos los combustibles. En general las mezclas tienden a mantener el torque un poco más estable en los valores altos, lo que genera un incremento del torque con respecto al diesel

puro entre las 1800 y las 1900 rpm. A partir de las 1900 rpm existe nuevamente una pequeña pérdida de torque. En las figuras 5.1 y 5.2, se observa además que el torque para las mezclas con diesel ecuatoriano y con diesel colombiano tiene el mismo comportamiento.



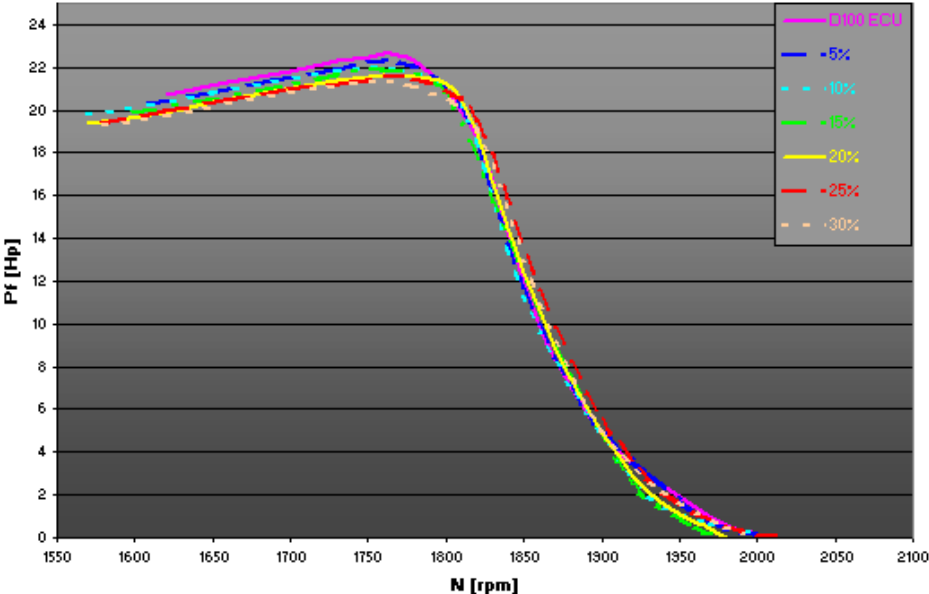
**Figura 5.1** Curva comparativa del torque para mezclas con diesel ecuatoriano



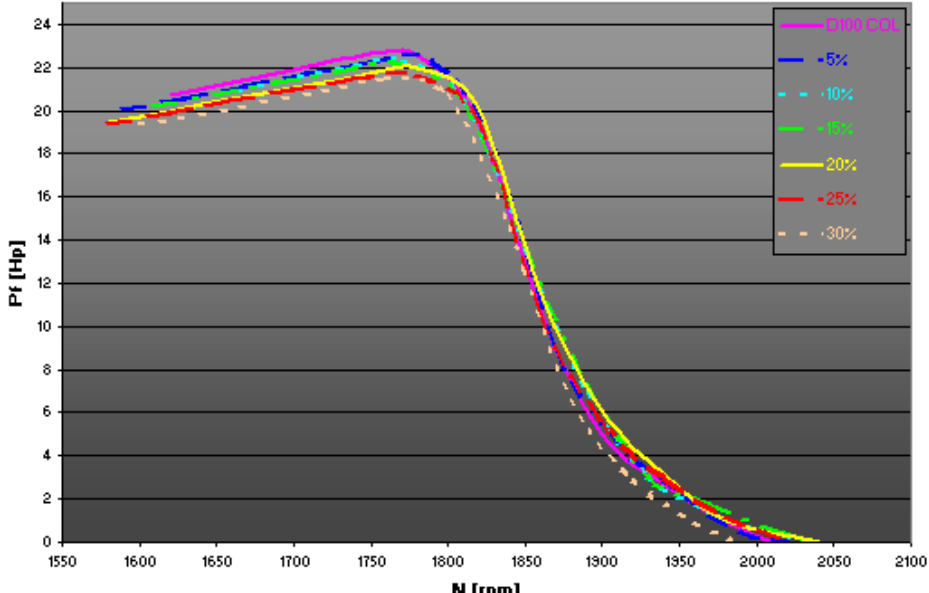
**Figura 5.2** Curva comparativa del torque para mezclas con diesel colombiano

En las figuras 5.3 y 5.4 se puede apreciar las curvas de potencia al freno para todos los valores de velocidad y para las diferentes mezclas con diesel

ecuatoriano y colombiano. En general se observa que la potencia se comporta de igual forma que el torque. Se puede apreciar que la potencia máxima se da alrededor de las 1780 a 1800 rpm. Se ve que las mezclas muestran una menor potencia cuando las cargas son elevadas, es decir entre las 1600 a 1800 rpm.



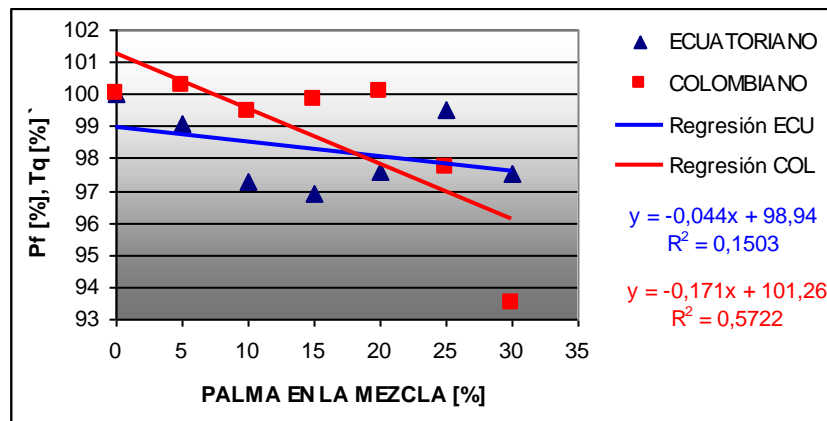
**Figura 5.3** Curva comparativa de la potencia al freno para mezclas con diesel ecuatoriano



**Figura 5.4** Curva comparativa de la potencia al freno para mezclas con diesel colombiano

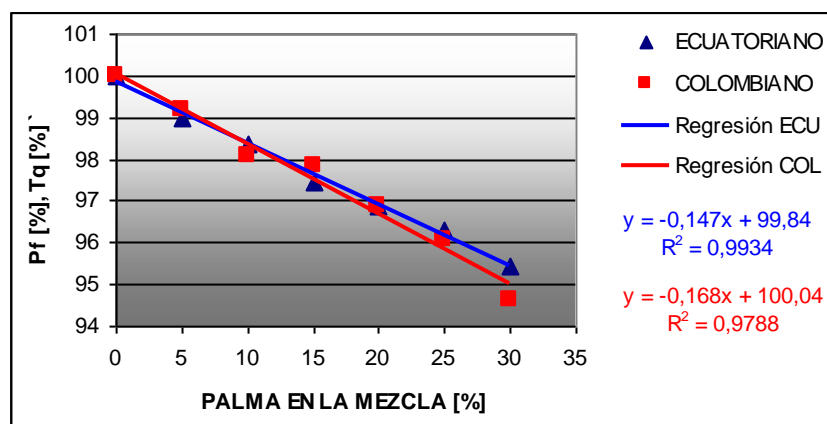
Comparando las áreas bajo las curvas se puede cuantificar porcentualmente la variación del torque y de la potencia al freno. Para esta cuantificación, el diesel

puro se lo toma como un valor referencial del 100%. Esto significa que todo valor sobre el 100% debe ser interpretado como ganancia y todo valor bajo este, será interpretado como pérdida. Como se puede apreciar en la figura 5.5; existe una reducción, tanto del torque como de la potencia, para casi todas las mezclas a excepción de las mezclas al 5 y al 20% con diesel colombiano. Se ve que los coeficientes de regresión lineal tienen un ajuste pobre para los datos por lo que no se puede establecer una tendencia en este rango.



**Figura 5.5** Variación porcentual del torque y de la potencia entre las 1650 y 1970 rpm

En la figura 5.6 se ve que existe un mejor ajuste lineal ya que el motor se mantiene más estable en ese rango de velocidad. Aproximadamente existe una reducción de 0,74% de potencia y de torque por cada 5% de palma para las mezclas con diesel ecuatoriano y de 0,84% para mezclas con diesel colombiano.



**Figura 5.6** Variación porcentual del torque y de la potencia entre las 1650 y 1810 rpm  
 En la figura 5.7 se observa que el diesel colombiano y sus mezclas presentan valores mayores de potencia y torque en comparación a sus contrapartes con

diesel ecuatoriano. Se puede observar que a velocidades cercanas a 1780 rpm la potencia y el torque varían inversamente con la concentración de la mezcla. Sin embargo, el comportamiento de estos parámetros se vuelve inestable y caótico a medida que aumenta la velocidad.

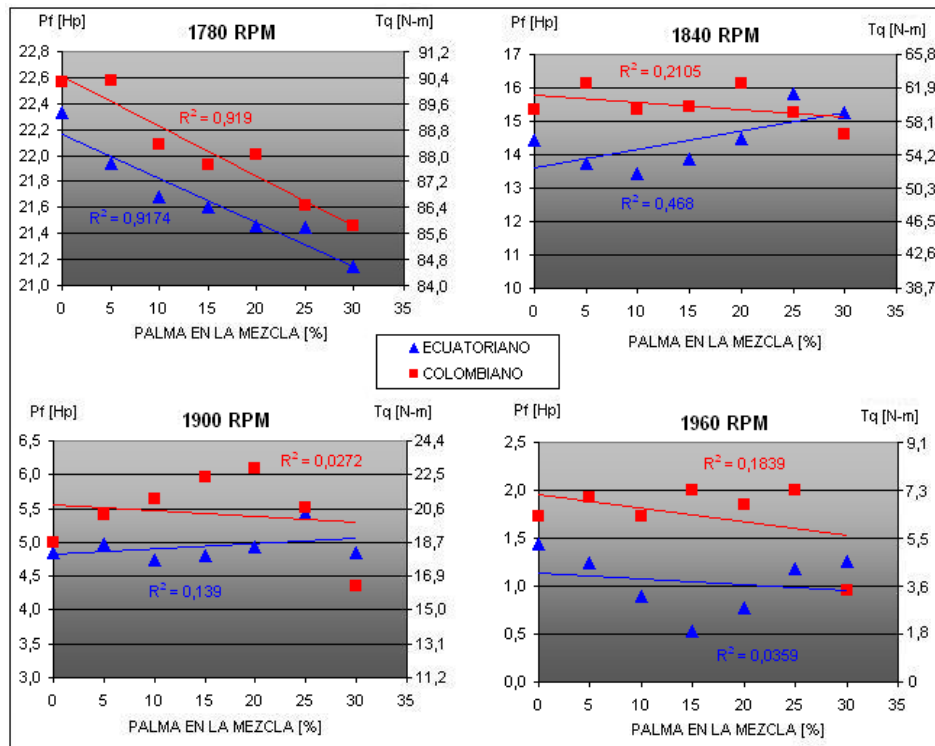
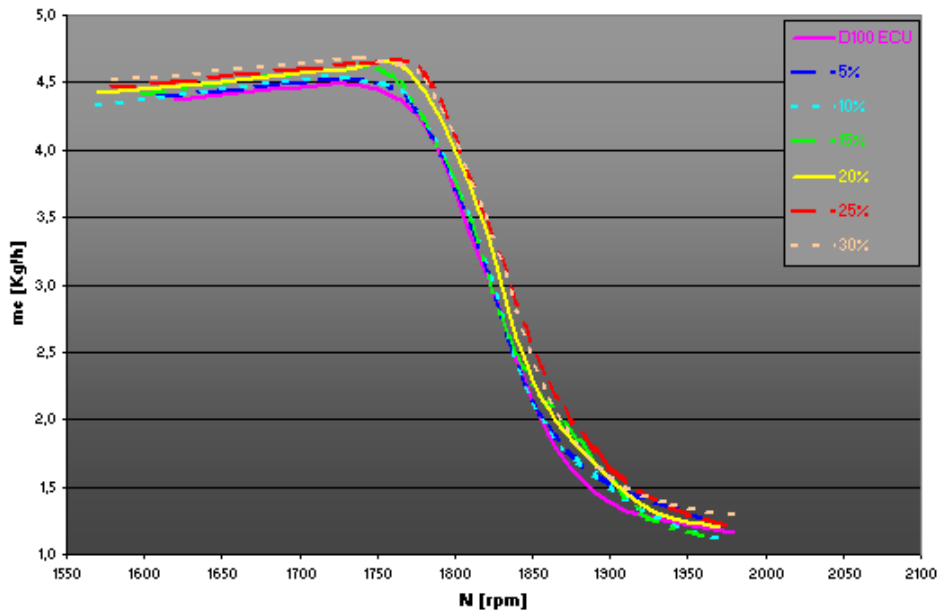


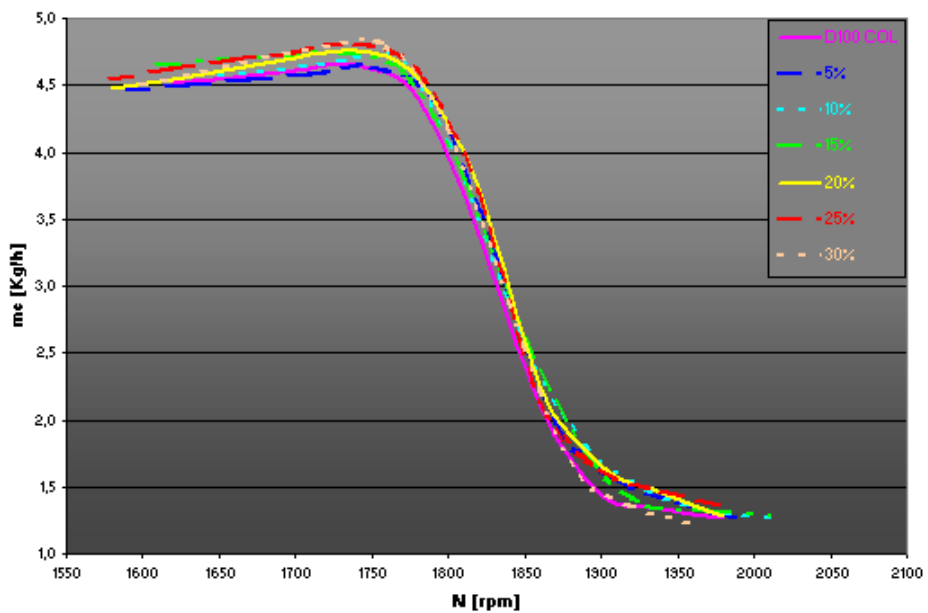
Figura 5.7 Variación de la potencia al freno y del torque a diferentes velocidades

### 5.1.2 CONSUMO MÁSCICO DE COMBUSTIBLE

En las figuras 5.8 y 5.9 se presentan las curvas de consumo másico de combustible obtenidas para todas las mezclas para todo el rango de velocidad analizado. Se observa que estas curvas tienen el mismo comportamiento que las curvas de potencia y torque. El consumo se mantiene alto cuando el motor está sometido a altas cargas. A medida que éstas disminuyen, la velocidad aumenta y el consumo disminuye. Se ve que existe un decremento drástico del consumo a partir de las 1780 a 1800 rpm hasta las 1900 rpm y en adelante el motor tiende a estabilizarse en un consumo bajo.

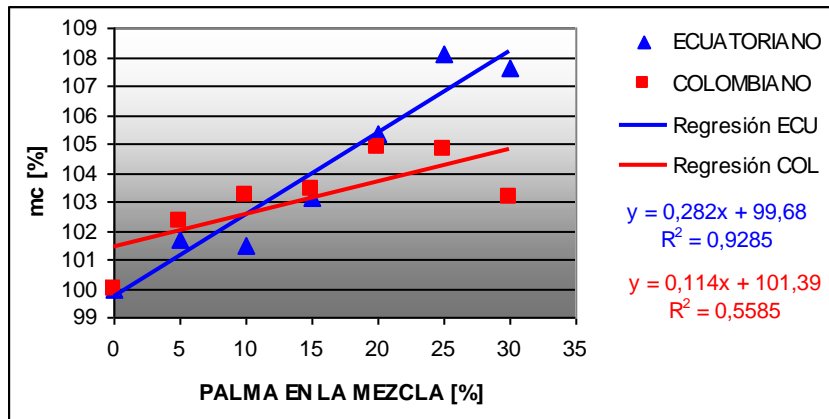


**Figura 5.8** Curva comparativa del *mc* para mezclas con diesel ecuatoriano



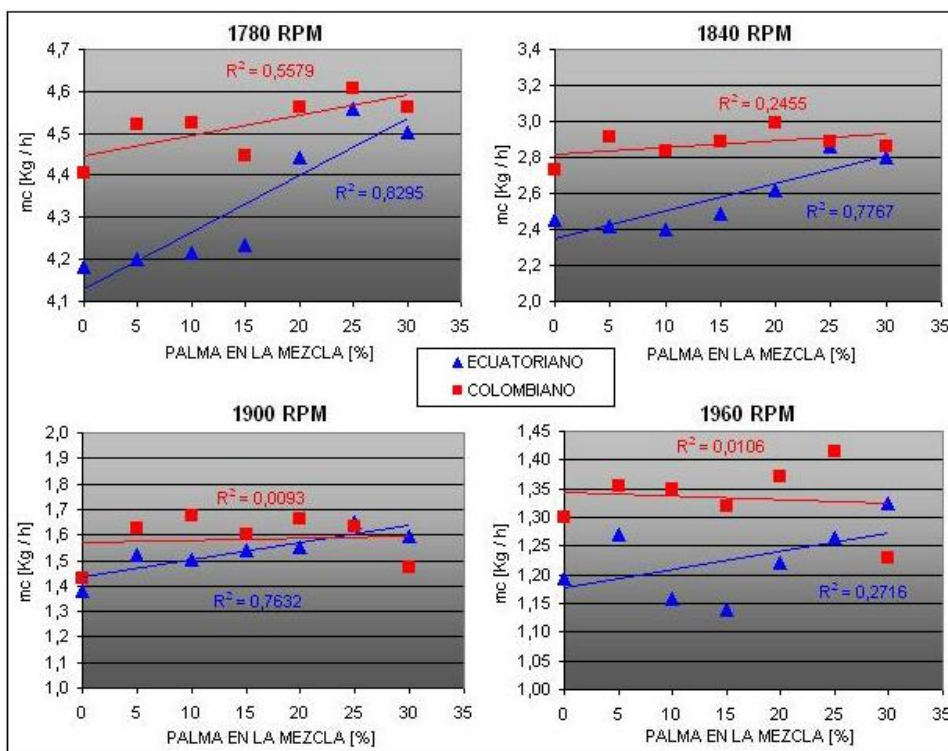
**Figura 5.9** Curva comparativa del *mc* para mezclas con diesel colombiano

Se observa que estas curvas tienen el mismo comportamiento que las curvas de potencia y torque. El consumo se mantiene alto cuando el motor está sometido a altas cargas. A medida que éstas disminuyen, la velocidad aumenta y el consumo disminuye. Se ve que existe un decremento drástico del consumo a partir de las 1780 a 1800 rpm hasta las 1900 rpm y en adelante el motor tiende a estabilizarse en un bajo consumo.



**Figura 5.10** Variación porcentual del mc entre las 1650 y 1950 rpm

Se observa en la figura 5.10 que existe un aumento del consumo másico de combustible a medida que aumenta la concentración de palma en la mezcla. Dicho aumento está alrededor de 1,4% por cada 5% de palma para las mezclas con diesel ecuatoriano y de 0,57% para mezclas con diesel colombiano.



**Figura 5.11** Variación del consumo másico de combustible a diferentes velocidades

En la figura 5.11 se muestra la variación cuantitativa del consumo másico de combustible a diferentes velocidades. Se puede apreciar que el consumo de combustible es mayor para el diesel colombiano y sus mezclas en todas las



velocidades. Los mayores aumentos en el consumo másico de combustible se dan a las 1840 rpm. A esta velocidad el aumento máximo del consumo de combustible es de 0,4 [Kg/h] entre el diesel ecuatoriano y su mezcla al 25%. De esto se comprende que estos aumentos son cuantitativamente pequeños.

### 5.1.3 CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTIBLE

En las figuras 5.12 y 5.13 se muestran las curvas de consumo específico de combustible en función de la velocidad para todos los combustibles.

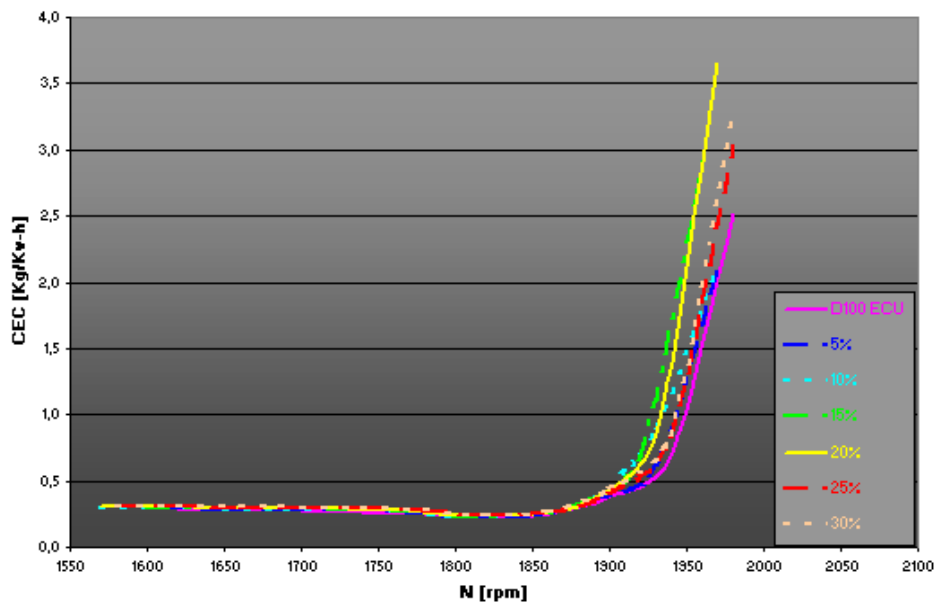


Figura 5.12 Curva comparativa del CEC para mezclas con diesel ecuatoriano

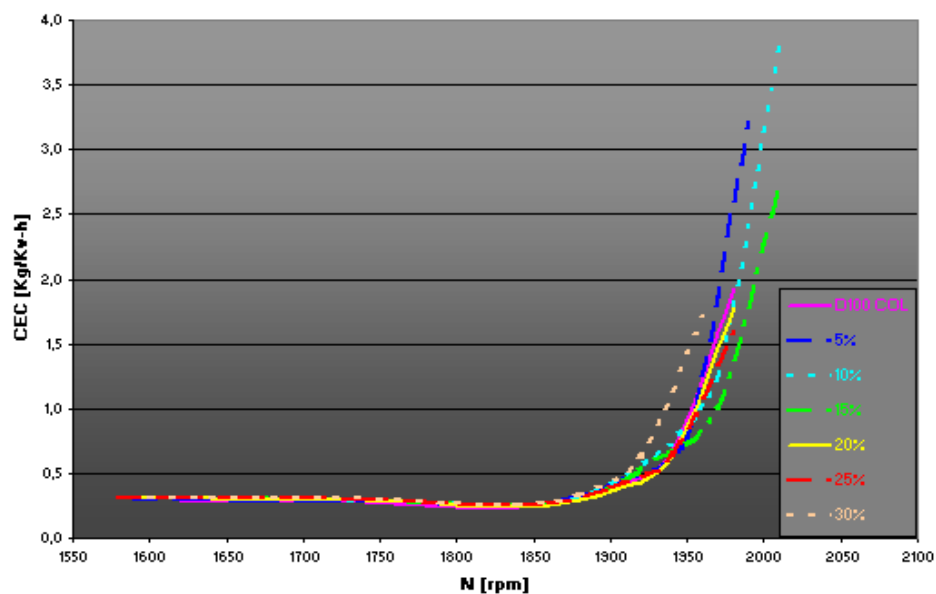
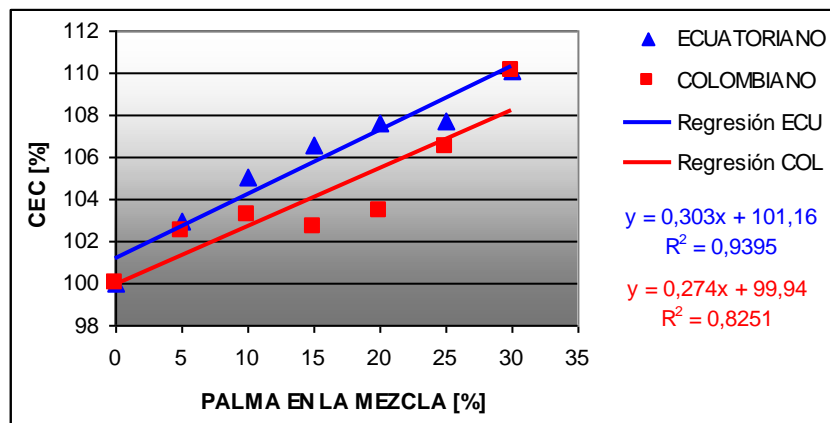


Figura 5.13 Curva comparativa del CEC para mezclas con diesel colombiano

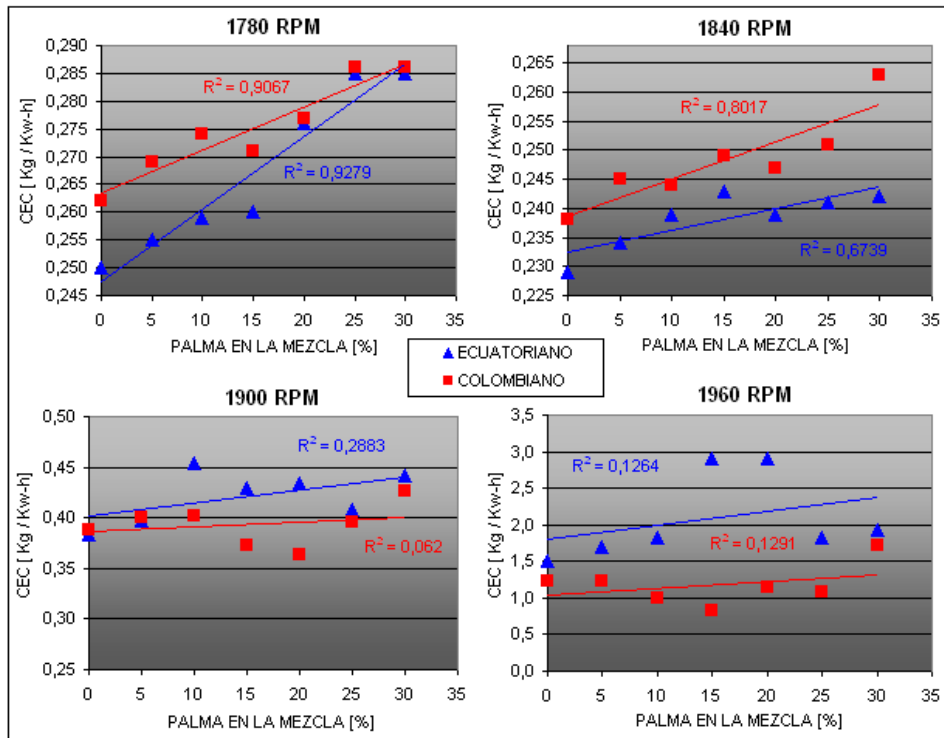
Se puede observar que el consumo específico de combustible se mantiene prácticamente invariable en un valor cercano al 0,27 [Kg/Kw-h], hasta las 1900 rpm. A partir de este punto, el consumo específico se eleva drásticamente para todas las mezclas hasta valores alrededor de 3 [Kg/Kw-h]. En esta zona se aprecia un cierto caos. Adicionalmente se observa que el mínimo consumo específico de combustible se da a las 1850 rpm.



**Figura 5.14** Variación porcentual del CEC entre las 1650 y 1910 rpm

En la figura 5.14 se puede constatar que el consumo específico de combustible varía directamente con la concentración de la mezcla en el rango especificado. Como se observa en las figuras 5.12 y 5.13, el comportamiento del CEC es caótico a partir de las 1910 rpm por lo que no se realiza ningún análisis adicional. En el rango de 1600 a 1900 rpm, el CEC tiene un buen ajuste lineal por lo que se obtiene de las ecuaciones un aumento aproximado de 1,5% por cada 5% de palma en las mezclas con diesel ecuatoriano de 1,4% para mezclas con diesel colombiano.

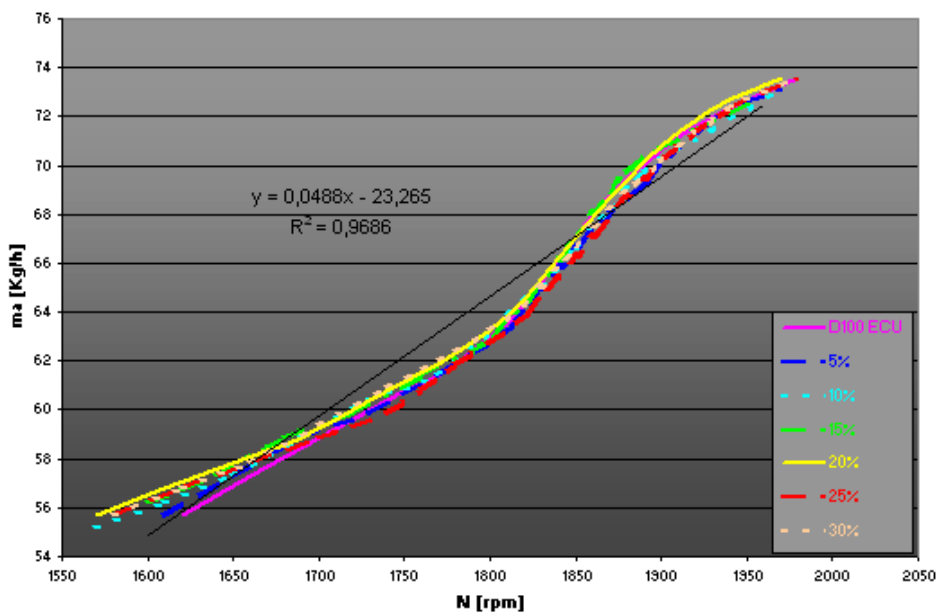
En la figura 5.15 se expone que, bajo altas cargas, el diesel colombiano y sus mezclas presentan un mayor CEC que sus contrapartes con diesel ecuatoriano. También se ve que el CEC varía directamente proporcional con la concentración a velocidades de 1780 y 1840 rpm, mientras que a mayores velocidades, el comportamiento se vuelve caótico.



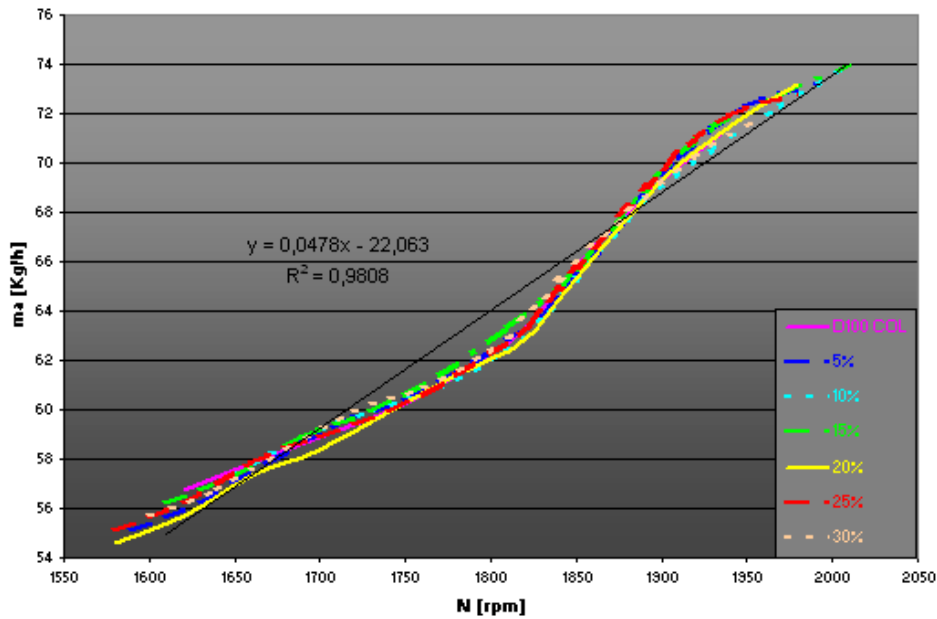
**Figura 5.15** Variación del CEC a diferentes velocidades

#### 5.1.4 CONSUMO MÁSIKO DE AIRE

En las figuras 5.16 y 5.17 se presentan las curvas de consumo másiko de aire, obtenidas para todos los valores de velocidad y para las diferentes mezclas para ambos combustibles

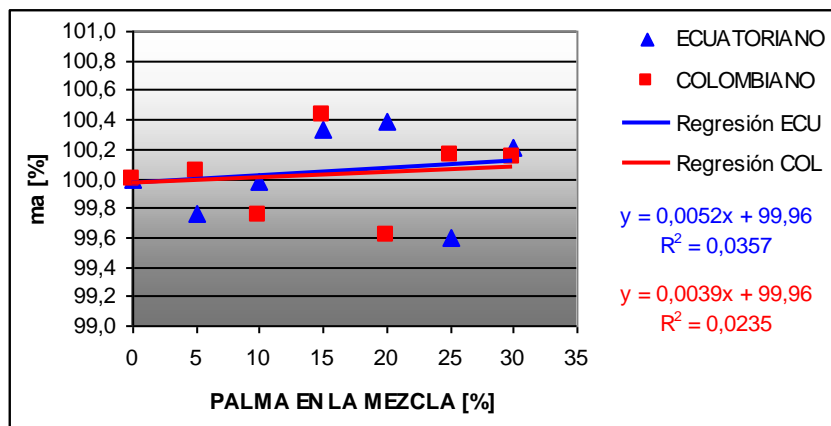


**Figura 5.16** Curva comparativa del  $ma$  para mezclas con diesel ecuatoriano



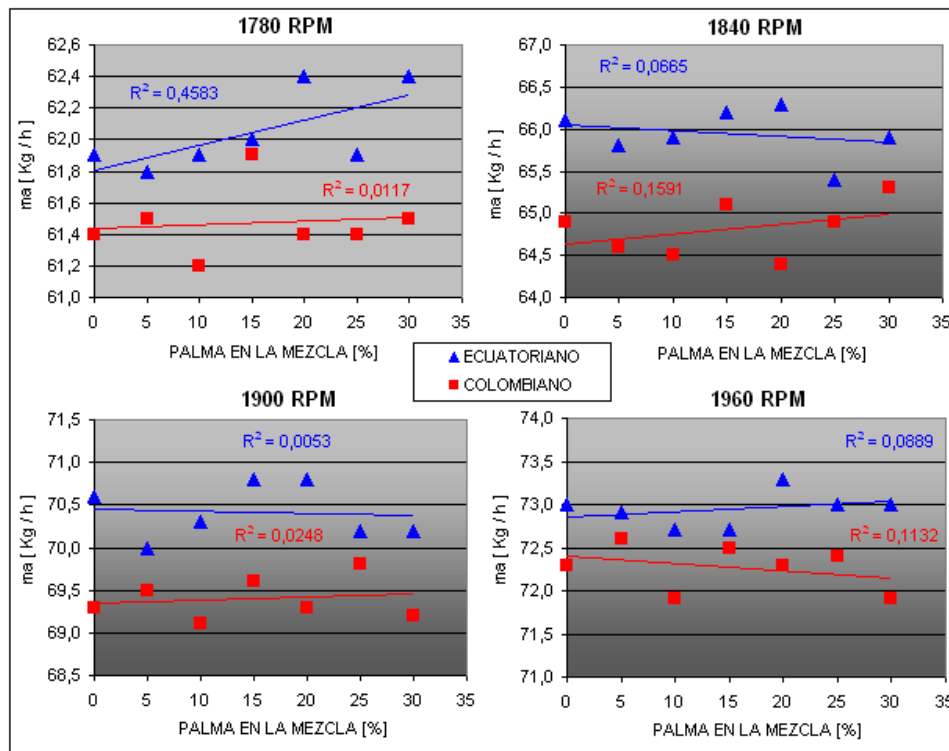
**Figura 5.17** Curva comparativa del  $ma$  para mezclas con diesel colombiano

Se puede ver que el consumo másico de aire varía directamente con la velocidad del motor, en el rango analizado. El comportamiento es prácticamente lineal tanto para las mezclas con diesel ecuatoriano como con el diesel colombiano, aunque se puede leer que la pendiente aumenta entre las 1820 a 1900 rpm y a partir de esta velocidad vuelve a disminuir. Aproximadamente existe un incremento de 4,8 a 4,9 [Kg/h], por cada 100 rpm, para todas las mezclas.



**Figura 5.18** Variación porcentual del consumo másico de aire entre las 1650 y 1950 rpm

En la figura 5.18 se muestra la variación porcentual del consumo de aire de las mezclas en comparación al diesel puro. El ajuste lineal no es bueno aunque las variaciones del consumo de aire no superen el 0,5%.



**Figura 5.19** Variación del consumo másico de aire a diferentes velocidades

Cuantitativamente, se puede apreciar (ver figura 5.19) que el consumo de aire varía poco en todas las velocidades, manteniéndose en consumos del 61 al 66 [kg/h] en cargas altas y llegando a valores de 70 a 73 [kg/h] en cargas bajas. Se puede constatar que en general, el consumo de aire tiende a mantenerse constante e independiente de la concentración. También se observa que el éste es ligeramente mayor para mezclas con diesel ecuatoriano que para mezclas con diesel colombiano.

### 5.1.5 RELACIÓN AIRE - COMBUSTIBLE

En las figuras 5.20 y 5.21 se exponen las curvas de la relación aire - combustible obtenidas para todos los valores de velocidad. Se aprecia que a cargas de freno elevadas, la relación A/C tiende a mantenerse cerca de la estequiométrica. A partir de las 1800 rpm se observa que la relación A/C aumenta proporcionalmente a medida que aumenta la velocidad. Aproximadamente a las 1940 rpm, la relación A/C tiende a aumentar en menor cantidad a medida que aumenta la velocidad. Hasta las 1800 rpm existe poca diferencia entre los datos de las mezclas y los de los diesel puros. A partir de

este valor las relaciones A/C de las mezclas se van dispersando y en general mostrando valores menores a los de los diesel puros.

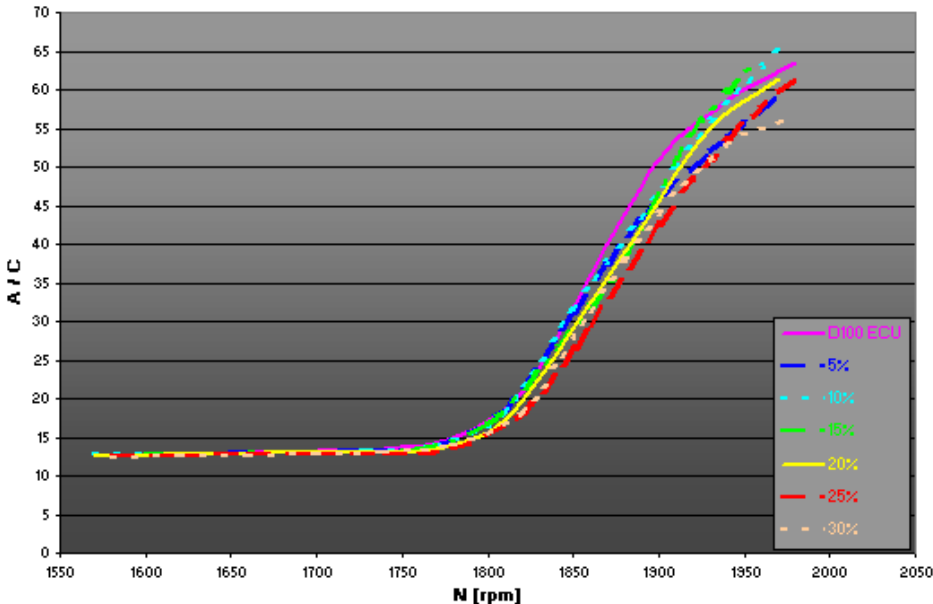


Figura 5.20 Curva comparativa de la A/C para mezclas con diesel ecuatoriano

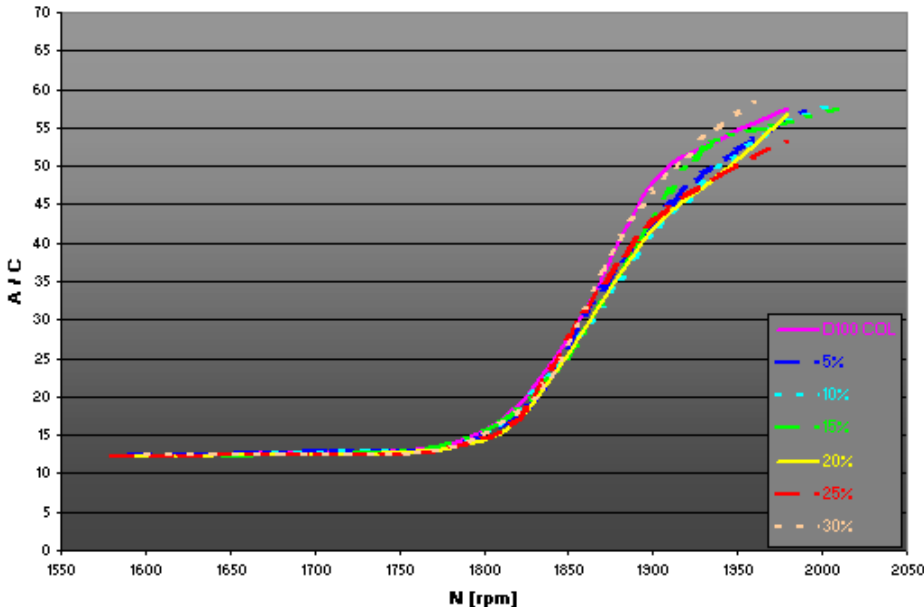
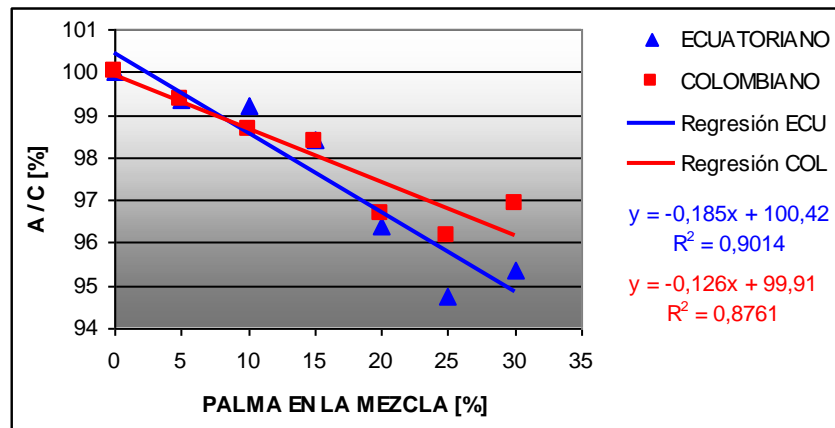


Figura 5.21 Curva comparativa del A/C para mezclas con diesel colombiano

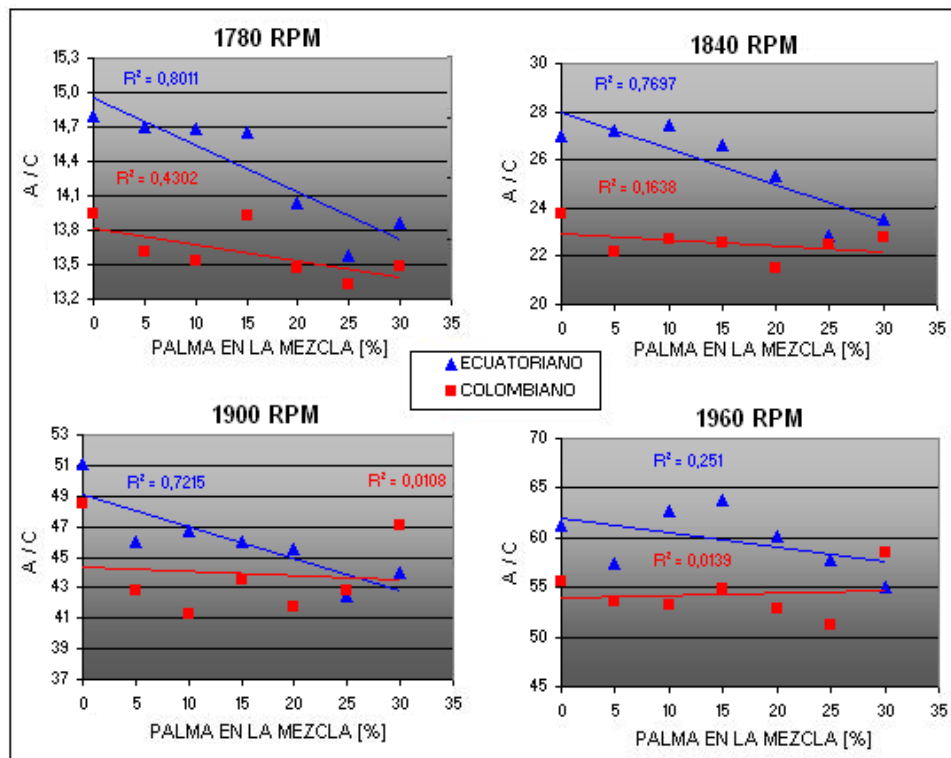
En la figura 5.22 se muestra la variación porcentual de la relación A/C en relación a la concentración de las mezclas. Se puede notar que la relación A/C tiende a disminuir proporcionalmente para las mezclas con ambos diesel, en este rango de velocidad. Esta reducción es de 0,93% por cada 5% de palma

para mezclas con diesel ecuatoriano y en 0,63 % para mezclas con diesel colombiano.



**Figura 5.22** Variación porcentual de la relación A / C entre las 1650 y 1810 rpm

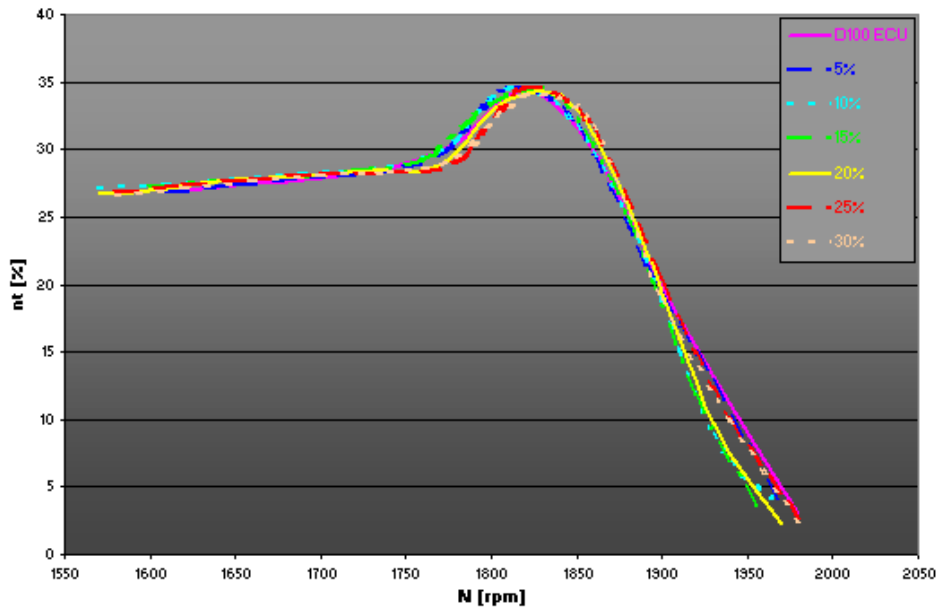
En la figura 5.23 se ve que las mezclas con diesel ecuatoriano tienen relaciones A/C más elevadas que las mezclas con diesel colombiano. Se observa también que la relación A/C tiende a decrecer en todas las velocidades para las mezclas con diesel ecuatoriano, mientras que para las mezclas con diesel colombiano, este parámetro tiende a mantenerse más constante.



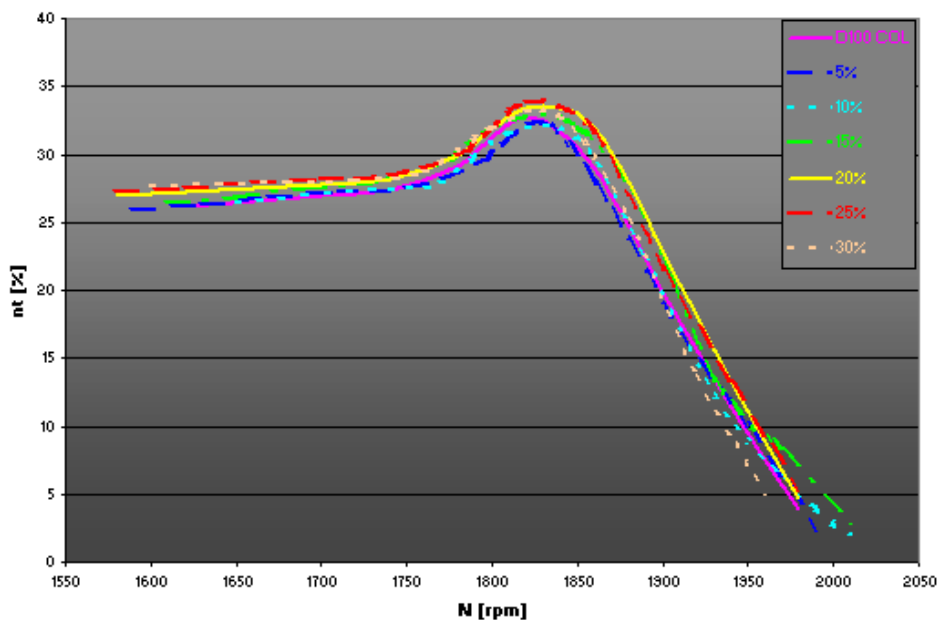
**Figura 5.23** Variación de la relación A/C a diferentes velocidades

### 5.1.6 EFICIENCIA TÉRMICA

En las figuras 5.24 y 5.25 se presentan las curvas de la relación aire - combustible en función de la velocidad para todos los combustibles.



**Figura 5.24** Curva comparativa de la eficiencia térmica para mezclas con diesel ecuatoriano

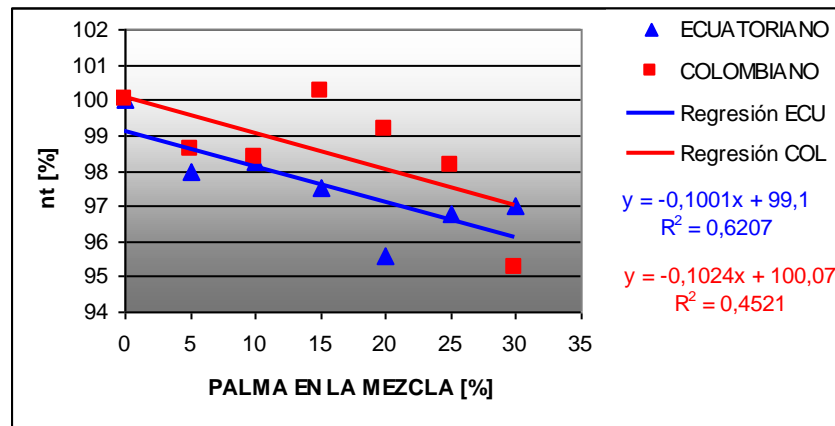


**Figura 5.25** Curva comparativa de la eficiencia térmica para mezclas con diesel colombiano

Se puede apreciar que se obtiene la máxima eficiencia térmica (34 - 35%) a una velocidad cercana a las 1840 rpm. La eficiencia se mantiene creciente durante todo el rango que el motor está sometido a cargas altas. Durante este

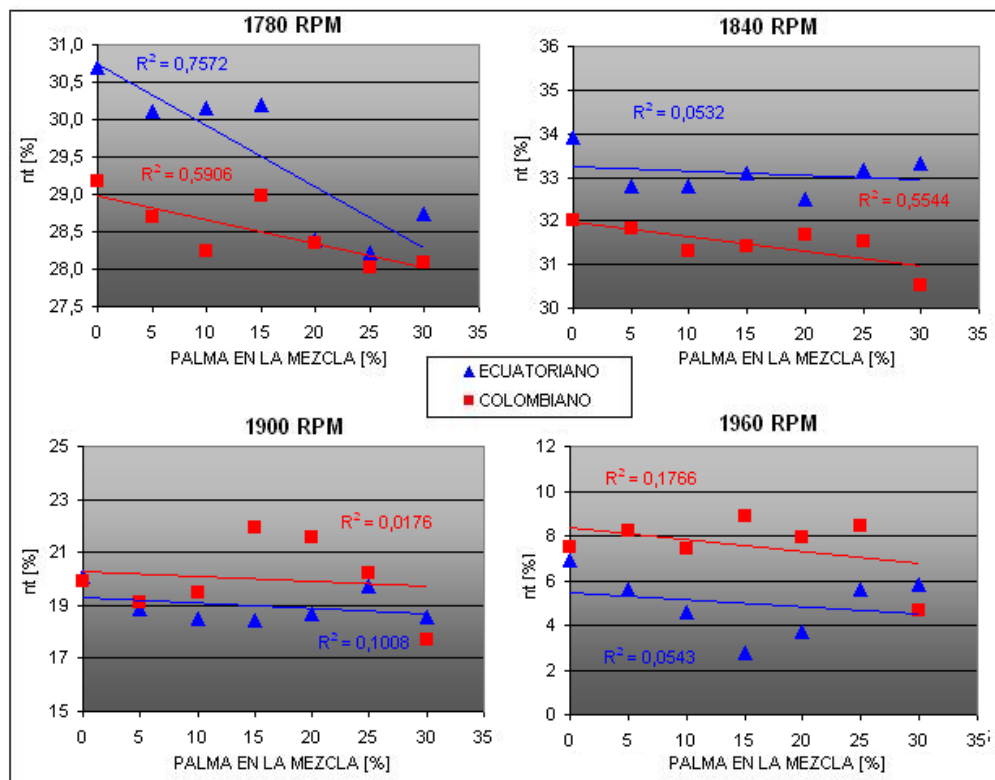


rango la eficiencia aumenta de un 25 a un 30%. Finalmente la eficiencia disminuye casi linealmente a medida que aumenta la velocidad.



**Figura 5.26** Variación porcentual de la eficiencia térmica entre las 1650 y 1910 rpm

En la figura 5.26 se puede notar que la eficiencia térmica disminuye con el aumento de la concentración. Esta disminución es de 0,5% por cada 5% de palma en la mezcla para las mezclas con diesel ecuatoriano. Para las mezclas con diesel colombiano no se tiene un ajuste lineal aceptable por lo que no se puede establecer exactamente cual es la relación.



**Figura 5.27** Variación de la eficiencia térmica a diferentes velocidades

En la figura 5.27 se observa que a 1780 rpm se tiene un decremento de la eficiencia térmica para todas las mezclas. A velocidades superiores, la eficiencia térmica tiende a mantenerse un poco más constante aunque también un comportamiento menos lineal.

### 5.1.7 TEMPERATURA DE LOS GASES DE ESCAPE

En las figuras 5.28 y 5.29 se muestran las curvas de la temperatura de los gases de escape en función de la velocidad para todos los combustibles.

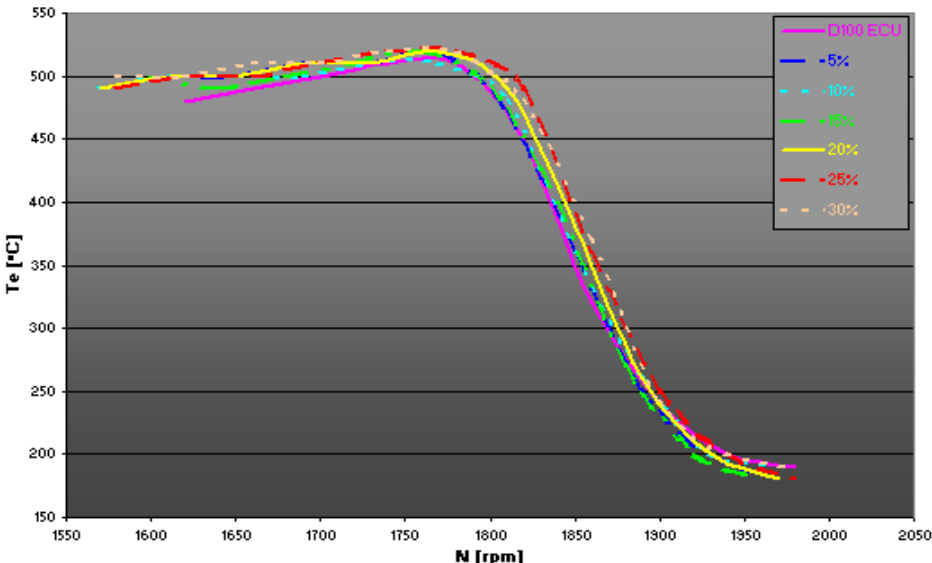


Figura 5.28 Curva comparativa de la Te para mezclas con diesel ecuatoriano

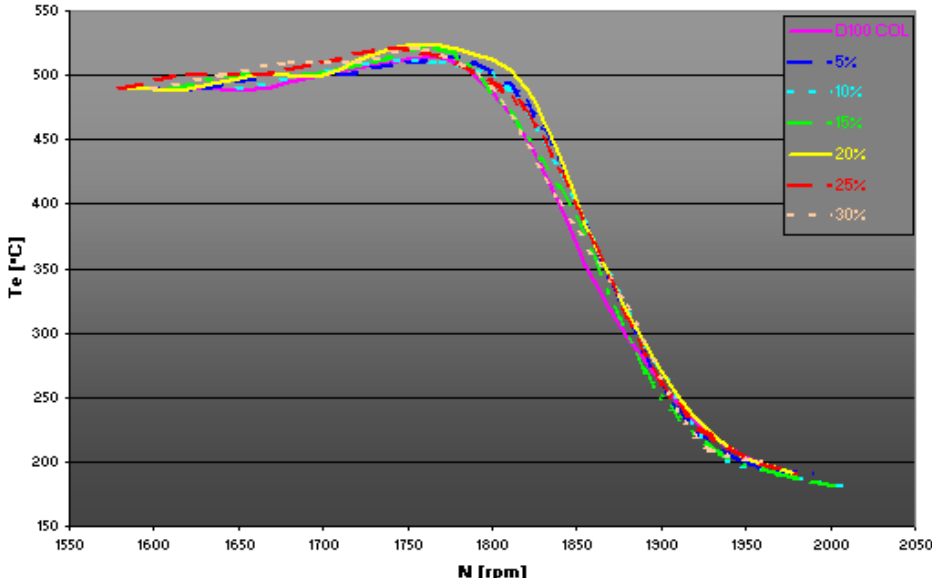
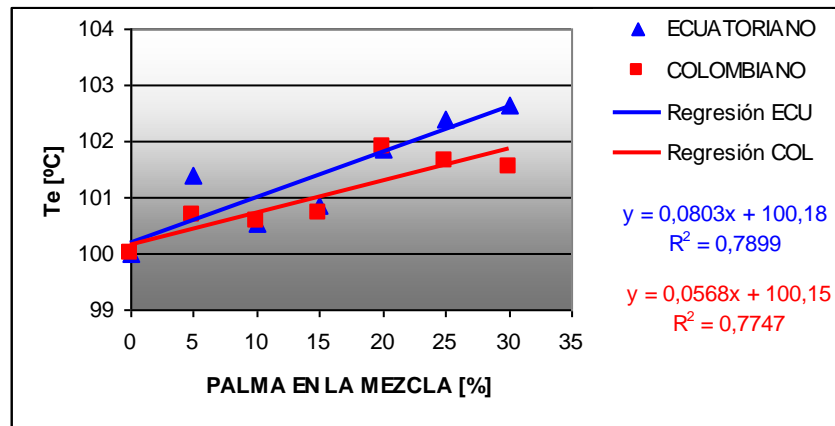


Figura 5.29 Curva comparativa del Te para mezclas con diesel colombiano

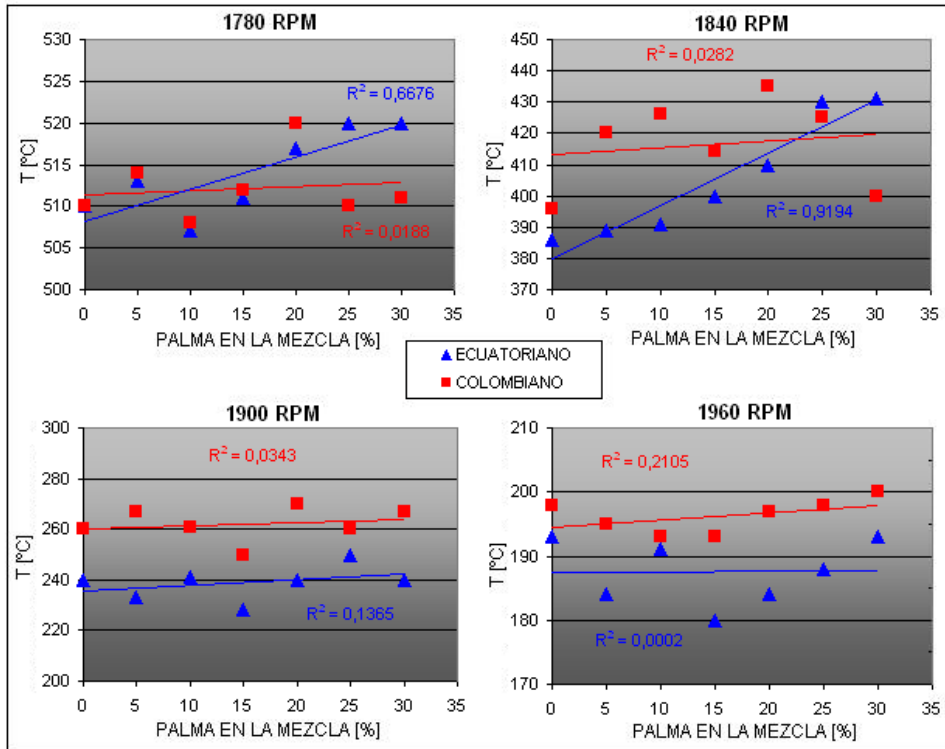
Se puede observar que las mayores temperaturas están alrededor de los 500 [°C] cuando el motor está sometido a cargas altas. A partir de las 1800 rpm, disminuye la carga y también lo hace la temperatura, llegando a valores un poco menores a los 200 [°C] a las 1950 rpm. Se observa que el comportamiento es similar al de las curvas de potencia y consumo másico de combustible.



**Figura 5.30** Variación porcentual de la temperatura de escape entre las 1650 y 1810 rpm

En la figura 5.30 se puede ver que existe un incremento en la temperatura de los gases de escape a medida que aumenta la concentración de palma en las mezclas con ambos diesel. Este incremento es mayor para las mezclas con diesel ecuatoriano, las que aumentan en un 0,4% por cada 5% de palma. Las mezclas con diesel colombiano aumentan en 0,28% por cada 5% de palma en el rango de velocidad especificado.

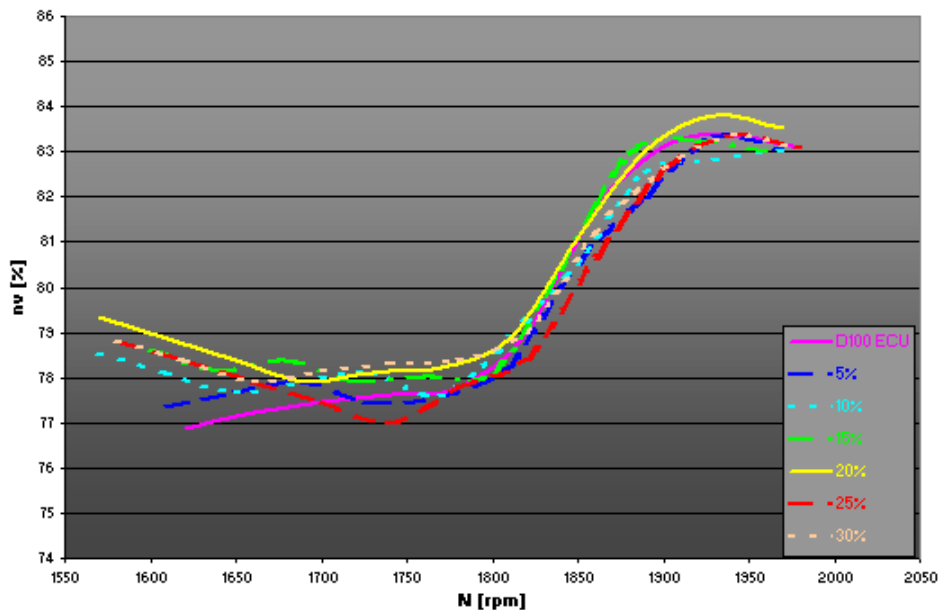
En la figura 5.31 se muestran los valores de temperatura a distintas velocidades. Se puede ver que a cargas elevadas, las mezclas presentan valores de temperatura más elevados que los de los diesel puros. A bajas cargas las temperaturas de las mezclas se mantienen más cercanas a los de los valores de los diesel puros. Se puede apreciar las mezclas con diesel ecuatoriano varían directamente con la concentración en cargas altas (1780 y 1840 rpm). No se puede establecer una relación para las mezclas con diesel colombiano ya que su ajuste lineal no es bueno.



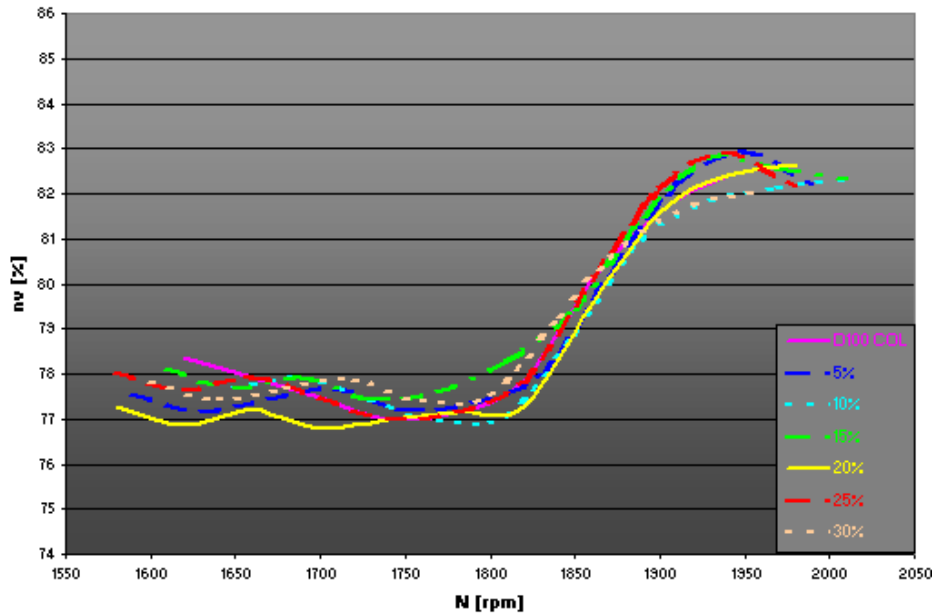
**Figura 5.31** Variación de la temperatura de escape a diferentes velocidades

### 5.1.8 EFICIENCIA VOLUMÉTRICA

En las figuras 5.32 y 5.33 se muestran las curvas de eficiencia volumétrica obtenidas para todos los valores de velocidad y para las diferentes mezclas.



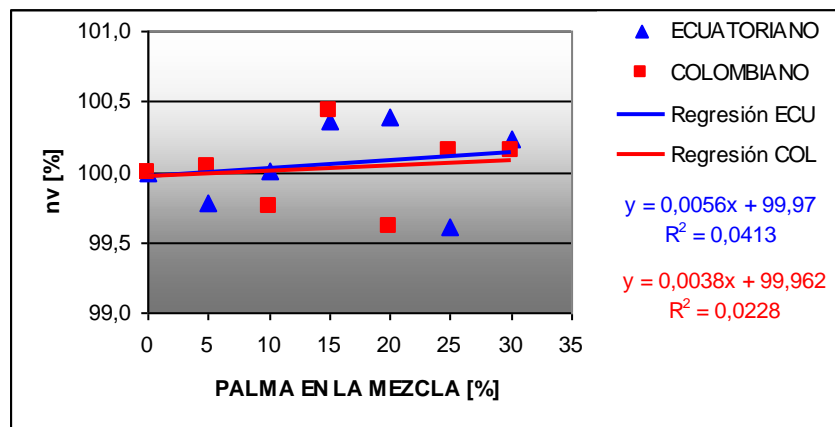
**Figura 5.32** Curva comparativa de la  $\eta_v$  para mezclas con diesel ecuatoriano



**Figura 5.33** Curva comparativa de la  $\eta_v$  para mezclas con diesel colombiano

Como se ve, la eficiencia tiende a mantenerse estable en un valor alrededor del 78% hasta las 1800 rpm. A partir de esta velocidad, la eficiencia se incrementa hasta un 83% donde parece alcanzar su máximo a las 1950 rpm.

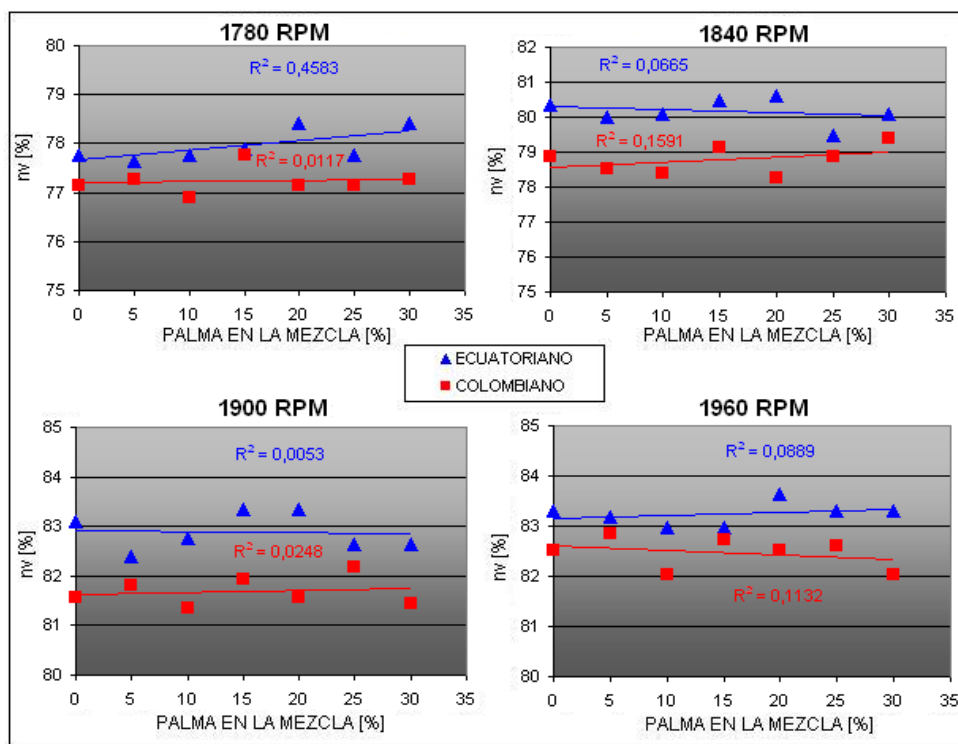
En la figura 5.34 se puede apreciar que no existe una relación entre la eficiencia volumétrica y la concentración de las mezclas. Las variaciones de eficiencia son menores al 0,5% para todos los casos.



**Figura 5.34** Variación porcentual de la eficiencia volumétrica entre las 1650 y 1950 rpm

En la figura 5.35 se puede apreciar que la eficiencia volumétrica del diesel ecuatoriano y sus mezclas es aproximadamente mayor en 1% a la del diesel

colombiano y sus mezclas. Se observa que en general la eficiencia se mantiene constante en todas las velocidades.



**Figura 5.35** Variación de la eficiencia volumétrica a diferentes velocidades

## 5.2 PRUEBAS DE EMISIONES DE GASES CONTAMINANTES

Se realizaron pruebas de emisiones en el mismo motor diesel con mezclas diesel – aceite de palma en varias concentraciones a fin de comparar y evaluar su efecto en las emisiones de gases contaminantes. Las pruebas se las efectuaron según lo especificado en 3.2.2. A continuación se presenta en la tabla 5.3, los datos obtenidos para el diesel ecuatoriano en las pruebas de emisiones de gases. Los datos del diesel colombiano y de las mezclas diesel – aceite de palma están documentados en el Anexo G (tablas AG-1 a la AG-14).

**Tabla 5.3** Datos de emisiones para el diesel ecuatoriano

N [rpm]	CO [%]	CO <sub>2</sub> [%]	O <sub>2</sub> [%]	THC [ppm]	NO <sub>x</sub> [ppm]	PM [mg/m <sup>3</sup> ]
1740	1,068	6,32	11,1	103	733	53,7
1780	0,586	6,66	10,2	181	1051	45,3
1840	0,001	5,94	11,3	156	1290	12,8
1900	0,012	3,78	14,9	160	616	8,7
1960	0,078	2,75	16,3	129	247	8,3

### 5.2.1 EMISIONES DE CO<sub>2</sub> Y DE O<sub>2</sub>

En las figuras 5.36 y 5.37 se presentan las curvas de O<sub>2</sub> y de CO<sub>2</sub> obtenidas para todos los valores de velocidad y para las diferentes mezclas con diesel ecuatoriano y colombiano.

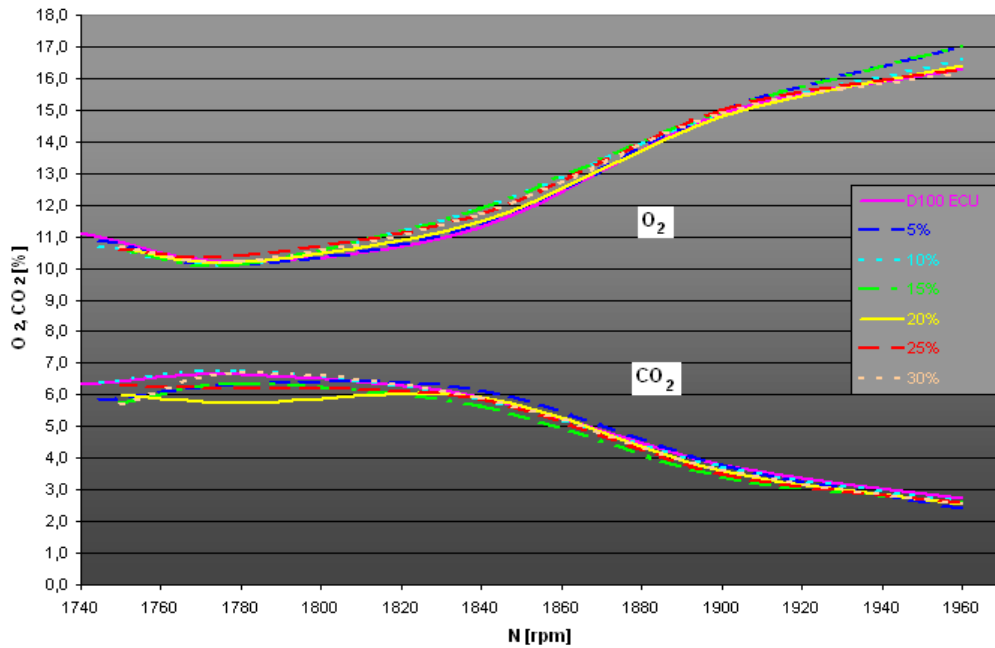


Figura 5.36 Curva comparativa de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> para mezclas con diesel ecuatoriano

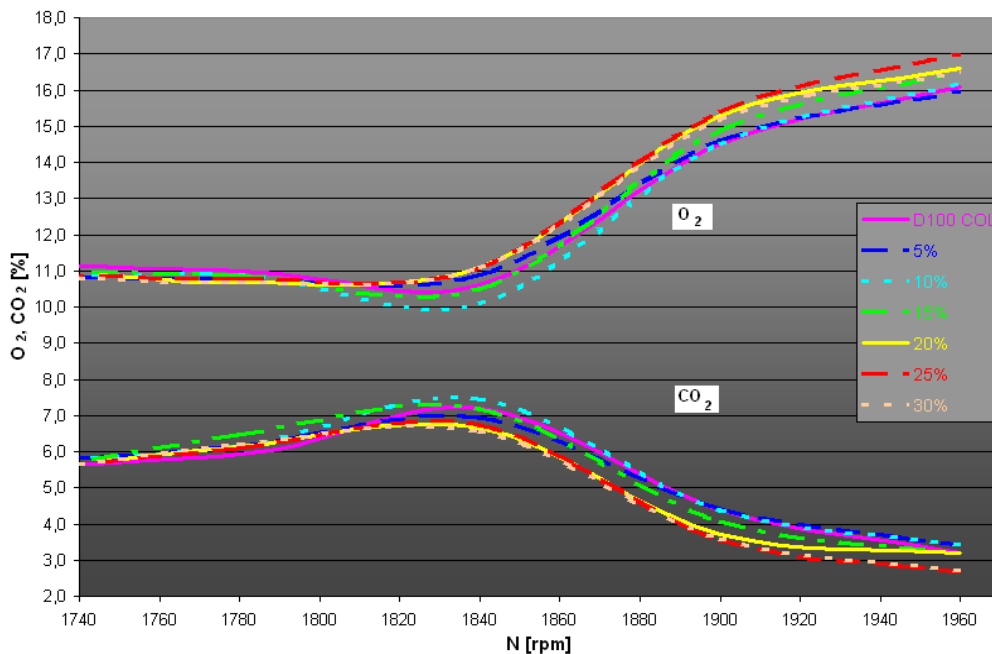
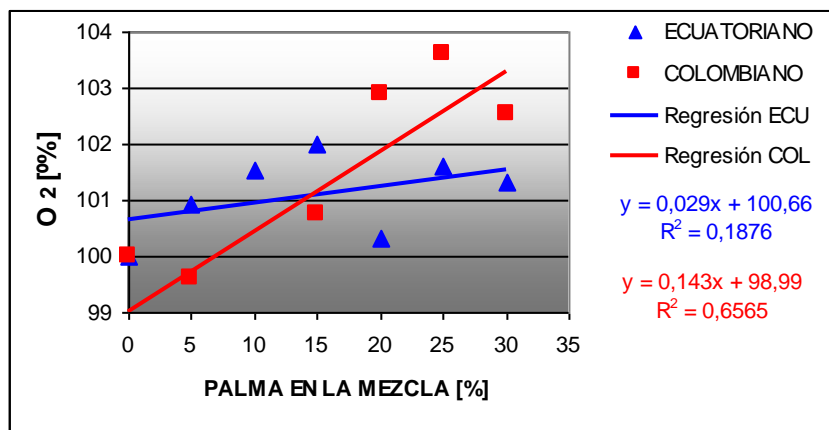


Figura 5.37 Curva comparativa de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> para mezclas con diesel colombiano

Como se puede apreciar, las curvas de CO<sub>2</sub> se mantienen en valores alrededor del 6,5% cuando el motor está sometido a cargas altas. Es posible ver que para el diesel ecuatoriano y sus mezclas, el CO<sub>2</sub> se mantiene relativamente constante entre las 1750 a 1840 rpm. En el caso del diesel colombiano y de sus mezclas, el CO<sub>2</sub> tiende a aumentar en este rango de velocidad de un 5,5 a un 7%. A partir de las 1840 rpm, se puede observar claramente que las emisiones de CO<sub>2</sub> disminuyen.

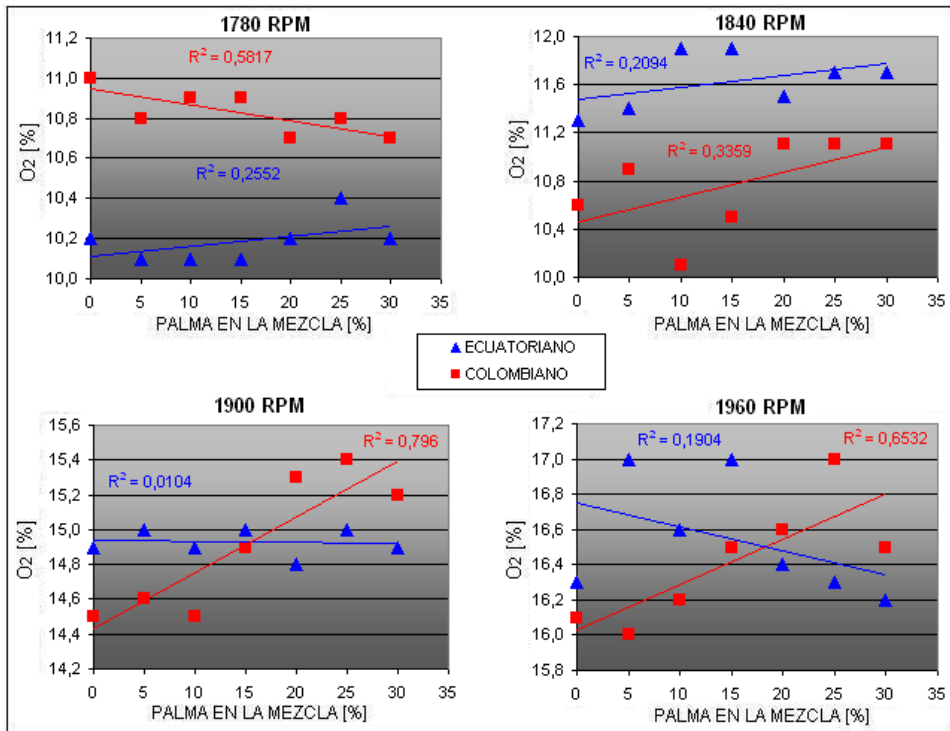


**Figura 5.38** Variación porcentual del O<sub>2</sub> entre las 1750 y 1960 rpm

Las curvas de O<sub>2</sub> se comportan de forma contraria a las curvas de CO<sub>2</sub> (ver figuras 5.36 y 5.37). Se observa que estas se mantienen en sus valores más bajos (alrededor de 11%) cuando la carga es elevada, y a partir de las 1840 rpm el O<sub>2</sub> aumenta a medida que la velocidad también lo hace. Adicionalmente se puede apreciar que para las mezclas con diesel ecuatoriano, las menores emisiones de O<sub>2</sub> se dan a 1780 rpm, mientras que para las mezclas con diesel colombiano estas ocurren a las 1840 rpm.

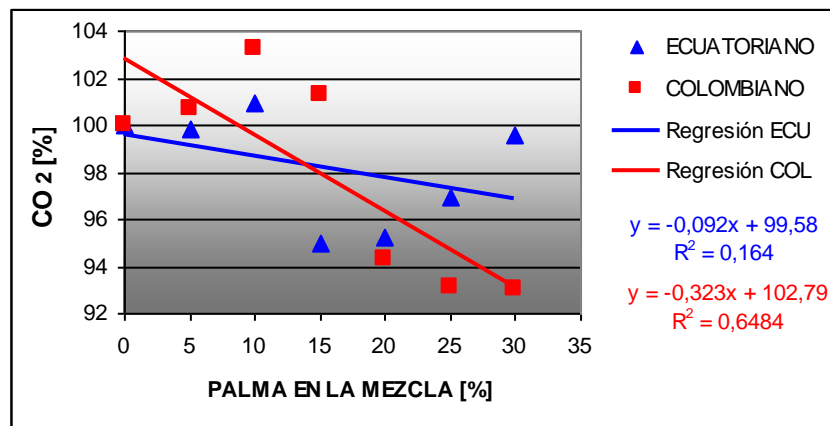
Se puede apreciar en la figura 5.38 que las emisiones de O<sub>2</sub> aumentan conforme aumenta la concentración de las mezclas. Este aumento es de 0,72% por cada 5% de palma para las mezclas con diesel colombiano. Para las mezclas con diesel ecuatoriano se puede constatar un aumento, sin embargo, no se puede establecer una dependencia lineal de la concentración.





**Figura 5.39** Variación del O<sub>2</sub> a diferentes velocidades

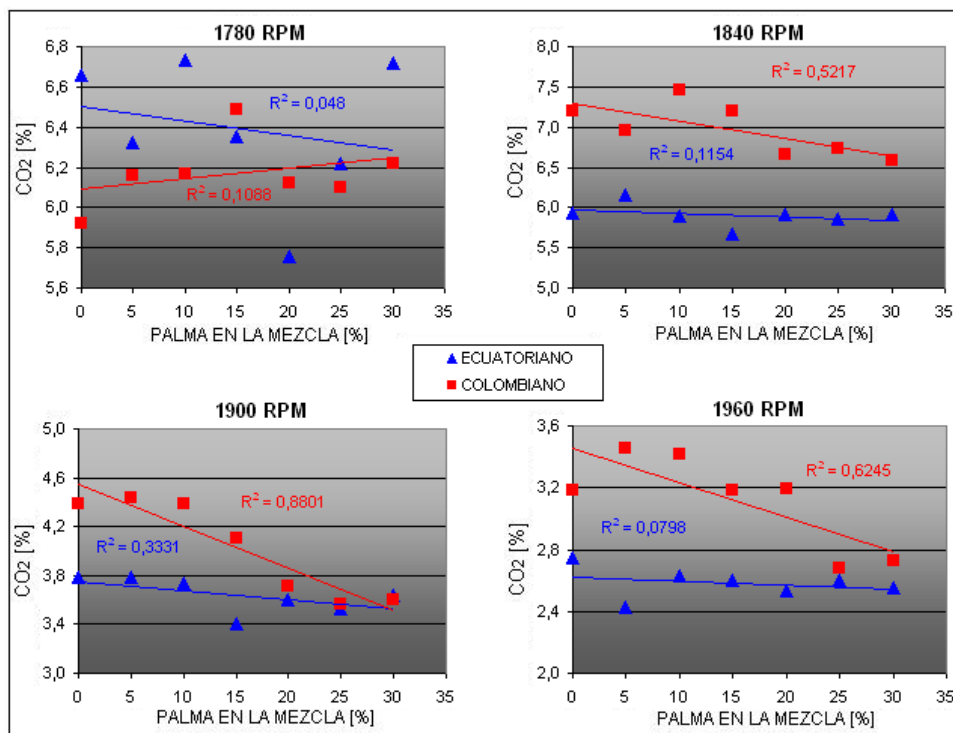
En la figura 5.39 se puede apreciar que para las mezclas con diesel colombiano, las emisiones de O<sub>2</sub> aumentan a todas las velocidades excepto a 1780 rpm. Por otro lado, las mezclas con diesel ecuatoriano presentan reducciones de O<sub>2</sub> a 1960 rpm y se mantienen constantes a 1900 rpm.



**Figura 5.40** Variación porcentual del CO<sub>2</sub> entre las 1750 y 1960 rpm

Las emisiones de CO<sub>2</sub> tienden a disminuir a medida que aumenta la concentración de las mezclas (ver figura 5.40). Esta reducción está alrededor del 1,6% por cada 5% de palma para las mezclas con diesel colombiano. De

igual forma se aprecia una reducción de CO<sub>2</sub> en las mezclas con diesel ecuatoriano pero no se puede establecer una relación con la concentración.



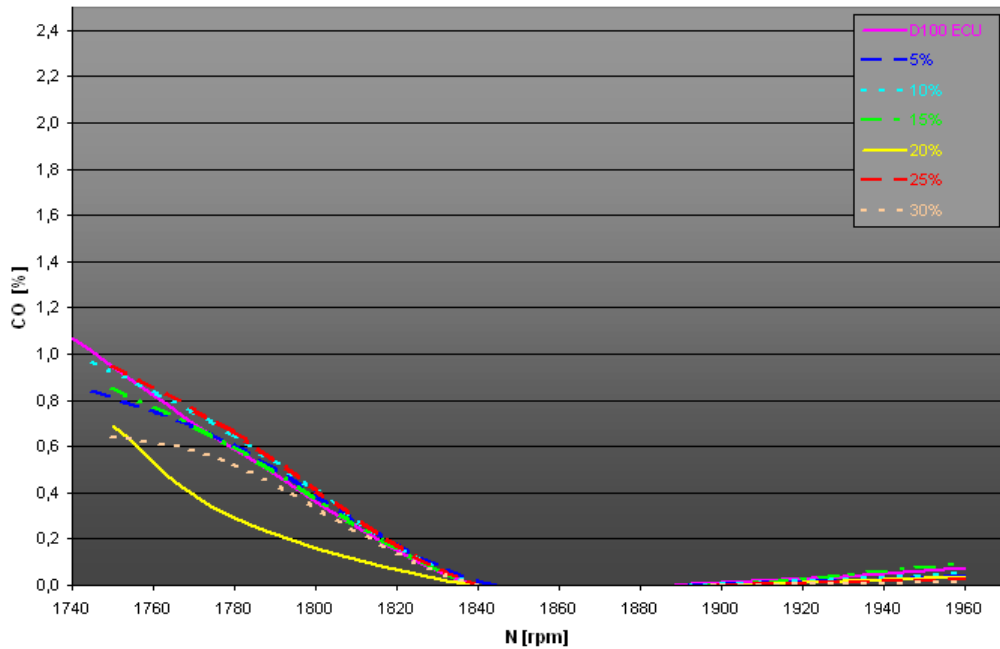
**Figura 5.41** Variación del CO<sub>2</sub> a diferentes velocidades

En la figura 5.41 se observa de igual manera que prácticamente a todas las velocidades hay reducción de CO<sub>2</sub> excepto para las mezclas con diesel colombiano a 1780 rpm. En general se aprecia que las emisiones de CO<sub>2</sub> son mayores para el diesel colombiano y sus mezclas. También se ve que las mezclas con diesel colombiano tienden a variar linealmente con la concentración mientras que las mezclas con diesel ecuatoriano presentan factores de correlación muy pobres.

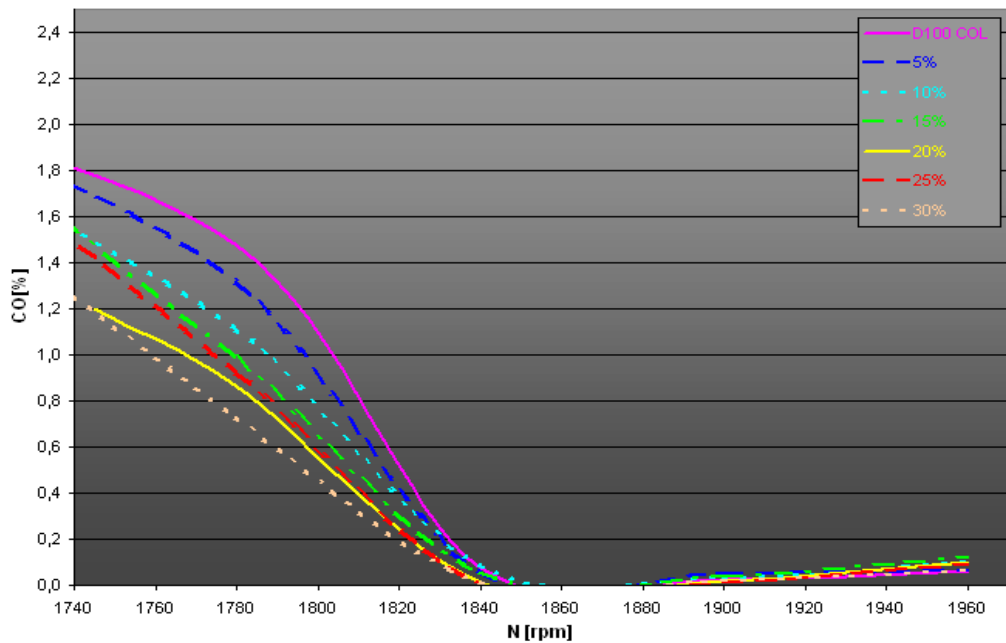
## 5.2.2 EMISIONES DE CO

En las figuras 5.42 y 5.43 se presentan las curvas de CO obtenidas para todos los valores de velocidad y para las diferentes mezclas con ambos diesel. Se observa que las emisiones de CO disminuyen en el rango de 1750 a 1840 rpm para todos los combustibles. Esta disminución tiende a ser lineal en este rango lo que es más notable en el diesel ecuatoriano y sus mezclas. A partir de las 1840 rpm se aprecia que las emisiones de CO disminuyen a 0% y a partir de las

1880 rpm, el CO vuelve a incrementarse ligeramente. Adicionalmente se puede apreciar que la mezcla al 20% con diesel ecuatoriano presenta un valor de CO bajo en relación a las otras mezclas a 1780 rpm. Se puede constatar lo mismo en el valor del CO<sub>2</sub> a la misma velocidad en la figura 5.35.



**Figura 5.42** Curva comparativa de CO para mezclas con diesel ecuatoriano



**Figura 5.43** Curva comparativa de CO para mezclas con diesel colombiano

En la figura 5.44 se muestra la variación porcentual del CO en relación a la concentración. Se puede observar el CO tiende a disminuir a medida que

aumenta la concentración de las mezclas. Las mezclas con diesel colombiano presentan reducciones del 7,9% por cada 5% de palma. Las mezclas con diesel ecuatoriano no presentan un ajuste lineal aceptable.

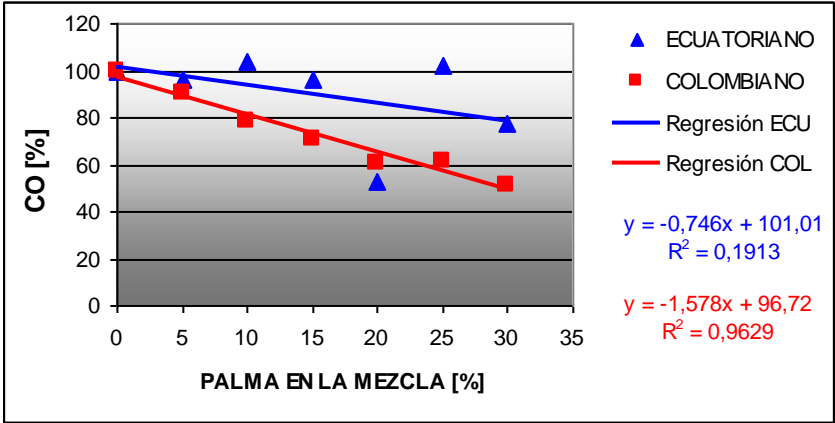


Figura 5.44 Variación porcentual del CO entre las 1750 y 1960 rpm

En la figura 5.45 se puede observar que las emisiones de CO son mayores para el diesel colombiano y sus mezclas. Este comportamiento se repite en todas las velocidades. En general el CO disminuye a todas las velocidades, excepto para las mezclas con diesel colombiano a 1960 rpm.

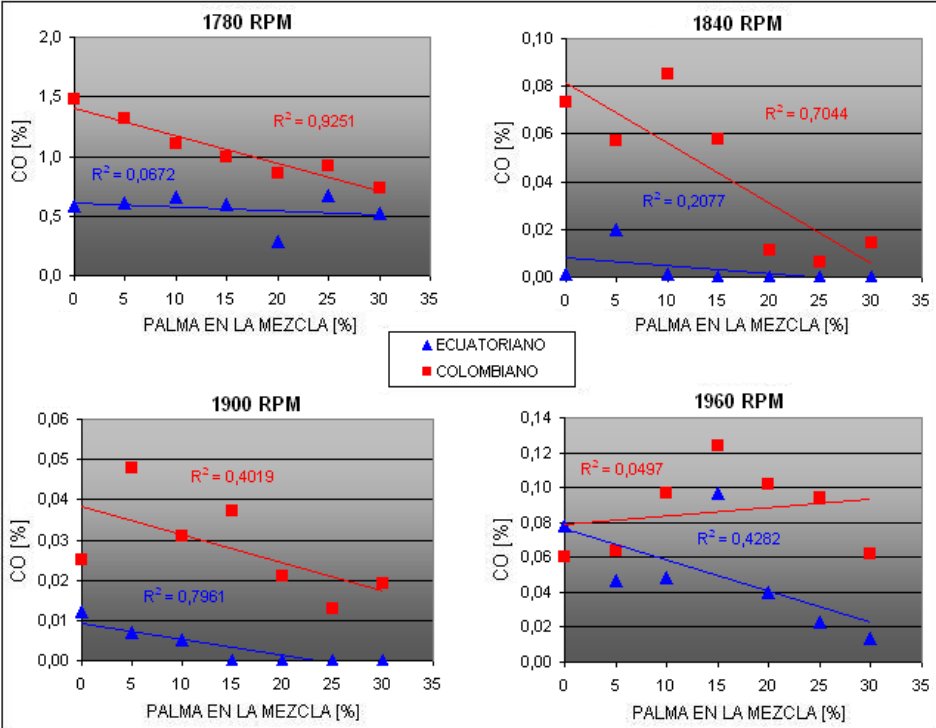
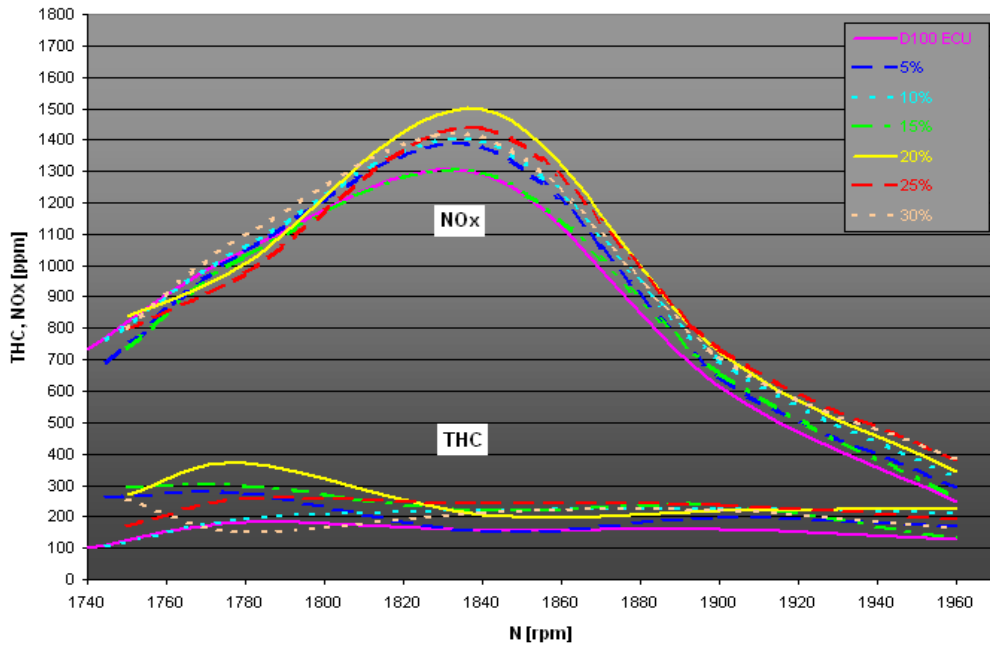


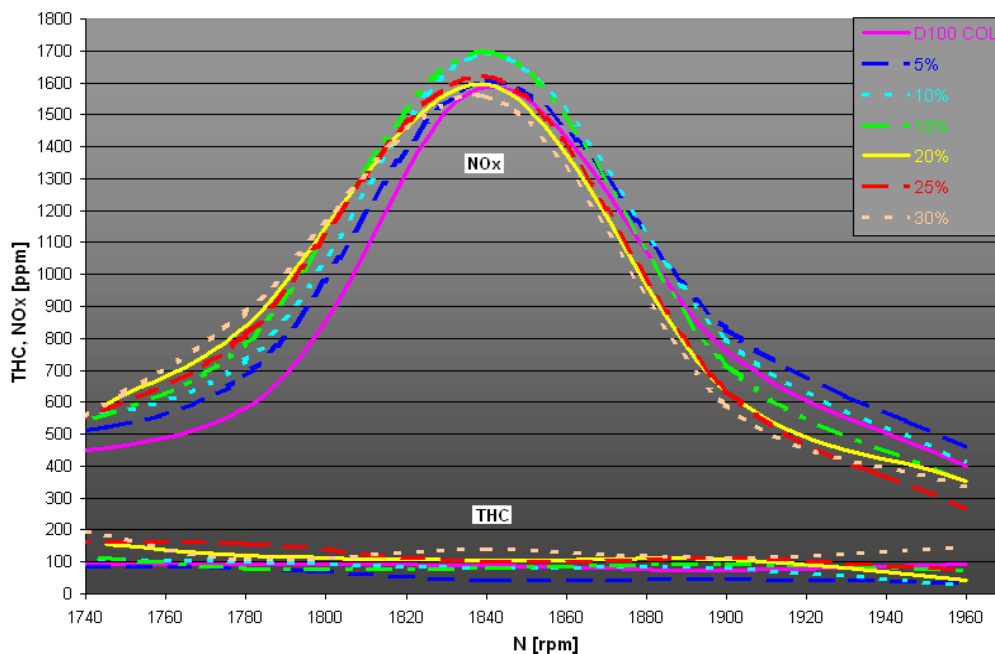
Figura 5.45 Variación del CO a diferentes velocidades

### 5.2.3 EMISIONES DE THC

En las figuras 5.46 y 5.47 se presentan las curvas del THC obtenidas para todos los valores de velocidad y para todos los combustibles.



**Figura 5.46** Curva comparativa del THC y NOx para mezclas con diesel ecuatoriano



**Figura 5.47** Curva comparativa del THC y NOx para mezclas con diesel colombiano

En general se puede ver que existe poca variación del THC a medida que aumenta la velocidad. Se percibe que hay una ligera disminución de este

contaminante mostrándose más elevado en velocidades cercanas a 1780 rpm. Adicionalmente también se aprecia que la mezcla al 20% presenta un valor de THC alto a 1780 rpm en comparación a las demás mezclas.

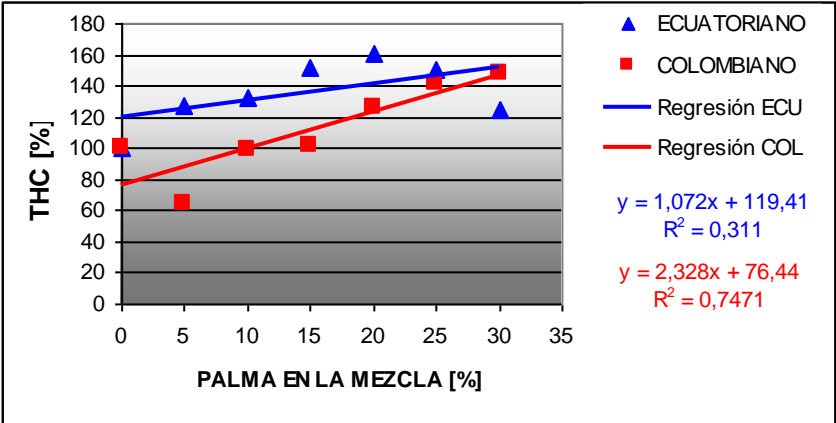


Figura 5.48. Variación porcentual del THC entre las 1750 y 1960 rpm

En la figura 5.48 se observa que existe un incremento del THC para mezclas con ambos diesel. Este incremento es lineal y dependiente de la concentración para mezclas con diesel colombiano y es de un 11,6% por cada 5% de palma. En general se observa que el incremento porcentual es mayor en las mezclas con diesel ecuatoriano.

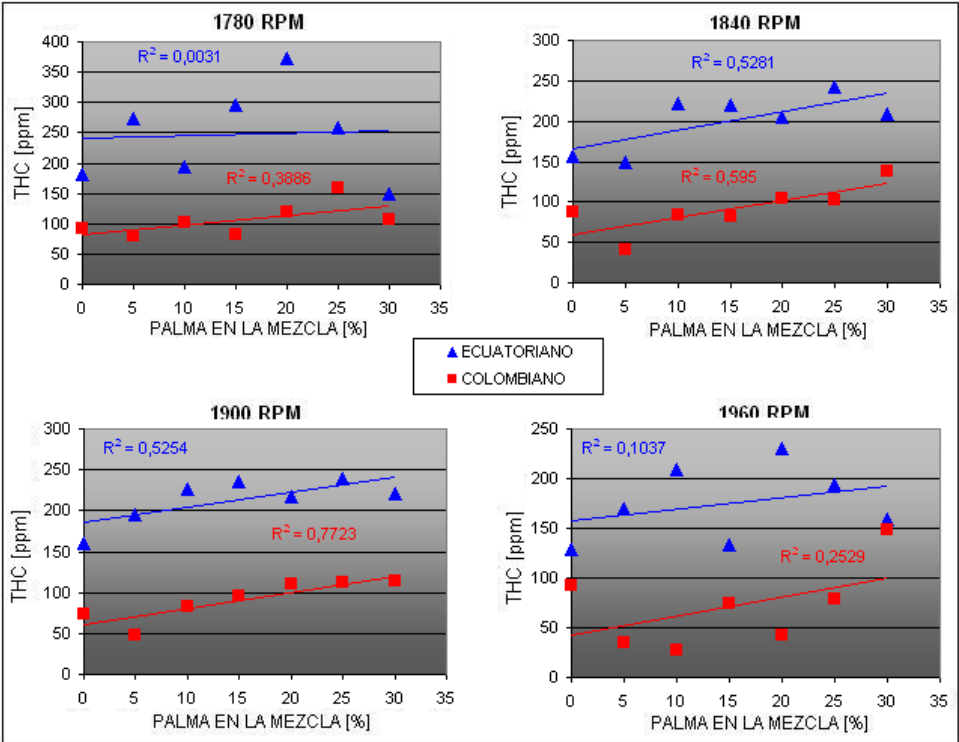
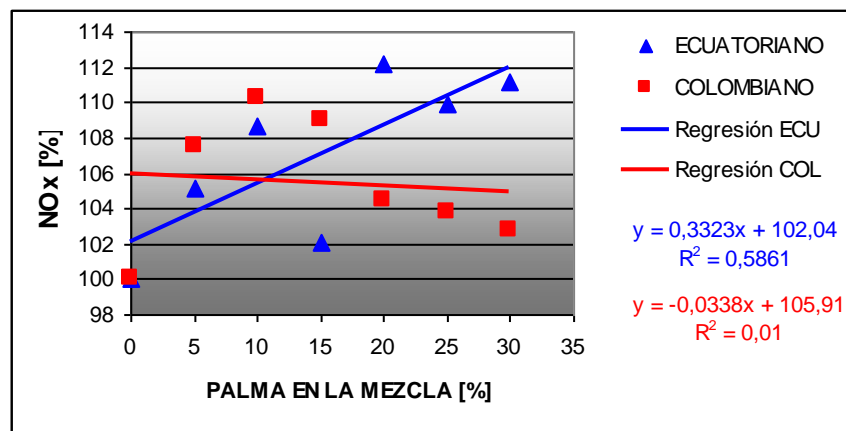


Figura 5.49 Variación del THC a diferentes velocidades

En la figura 5.49 se muestran los valores medidos del THC a diferentes velocidades para todas las mezclas analizadas. Claramente se observa que el TCH es mayor para el diesel ecuatoriano y sus mezclas en todas las velocidades. Por lo general esta diferencia está alrededor de las 100 [ppm].

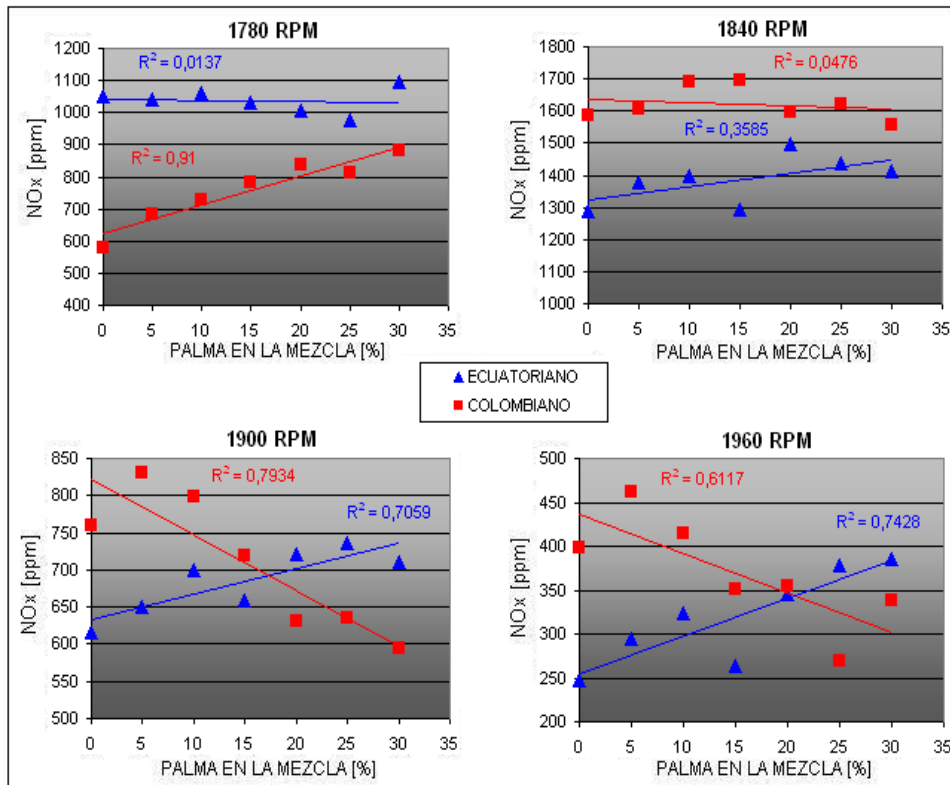
#### 5.2.4 EMISIONES DE NOx

En las figuras 5.46 y 5.47 se presentan las curvas de NOx obtenidas para todos los valores de velocidad y para las diferentes mezclas con ambos diesel. Se puede apreciar que los NOx tienden a aumentar en cargas altas hasta llegar a su máximo alrededor de las 1840 rpm y a partir de esta velocidad disminuyen y se observa también que la pendiente cambia a las 1900 rpm. Se constata que las máximas emisiones de NOx para mezclas con diesel ecuatoriano están alrededor de las 1400 [ppm] y de las 1600 [ppm] para las mezclas con diesel colombiano.



**Figura 5.50** Variación porcentual de los NOx entre las 1750 y 1960 rpm

En la figura 5.50 se puede observar que los NOx aumentan para las mezclas con ambos diesel. Para las mezclas con diesel ecuatoriano se tiene un incremento del 1,66% por cada 5% de palma. Para las mezclas con diesel colombiano no se observa una relación lineal con la concentración, sin embargo, todos sus valores de NOx son mayores que el del diesel ecuatoriano.



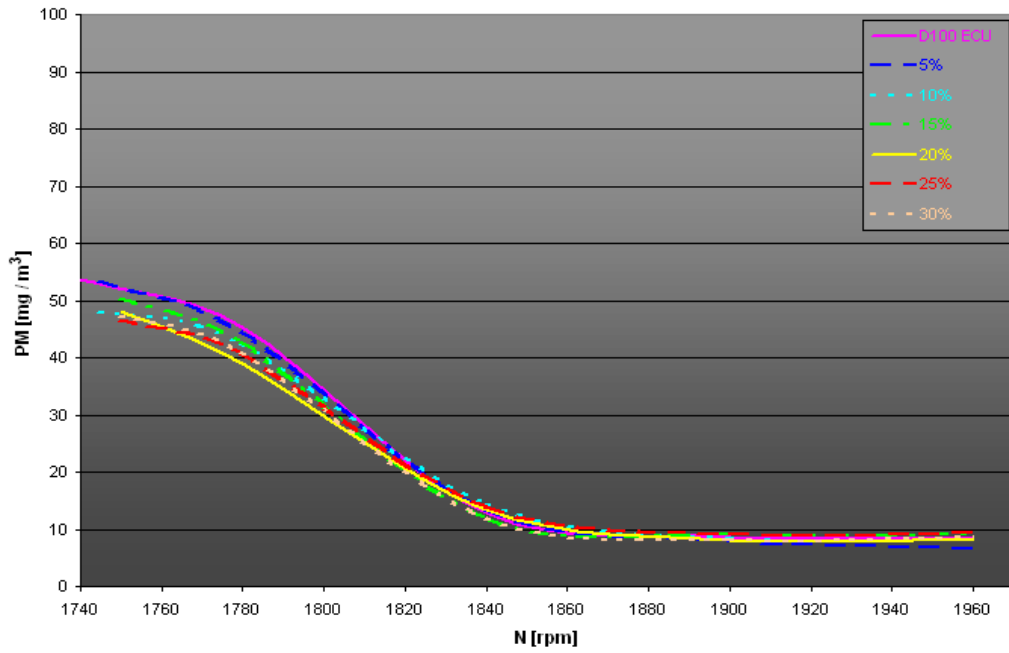
**Figura 5.51** Variación del NOx a diferentes velocidades

En la figura 5.51 se puede apreciar que las emisiones de NOx son por lo general mayores con las mezclas de diesel colombiano, sobre todo para las mezclas con concentraciones bajas. Se observa también que los NOx disminuyen a 1900 y a 1960 rpm para las mezclas con este tipo de combustible.

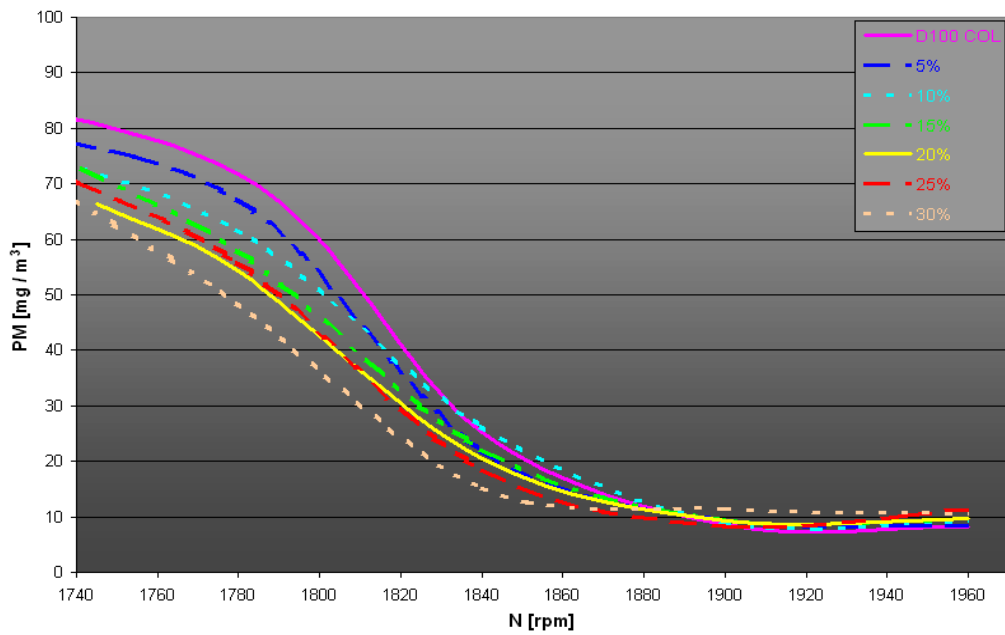
### 5.2.5 EMISIONES DE PM

En las figuras 5.52 y 5.53 se presentan las curvas del PM obtenidas para todos los valores de velocidad y para las diferentes mezclas con ambos diesel. Se observa que el PM varía inversamente con la velocidad, mostrando sus valores más elevados cuando la carga es elevada. Estos valores están alrededor de 45 [ppm] para el diesel ecuatoriano y sus mezclas y de 70 para el diesel colombiano y sus mezclas. Se tiene la mayor reducción de PM entre las 1750 a 1870 rpm. A partir de esta velocidad, el PM se mantiene en 10 [ppm].



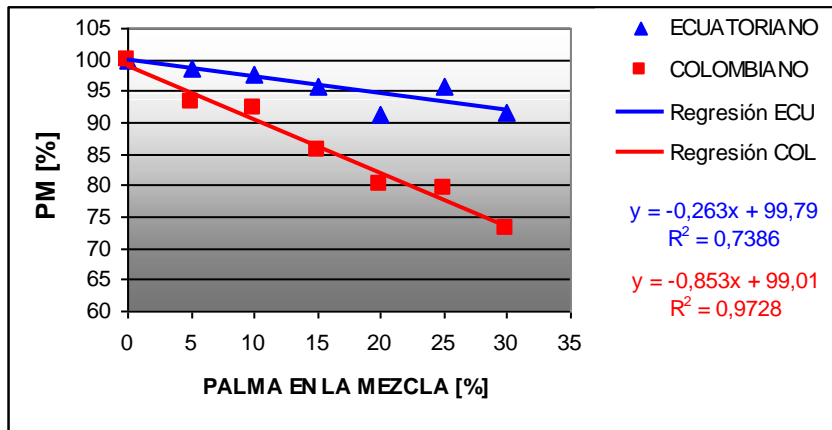


**Figura 5.52** Curva comparativa del PM para mezclas con diesel ecuatoriano



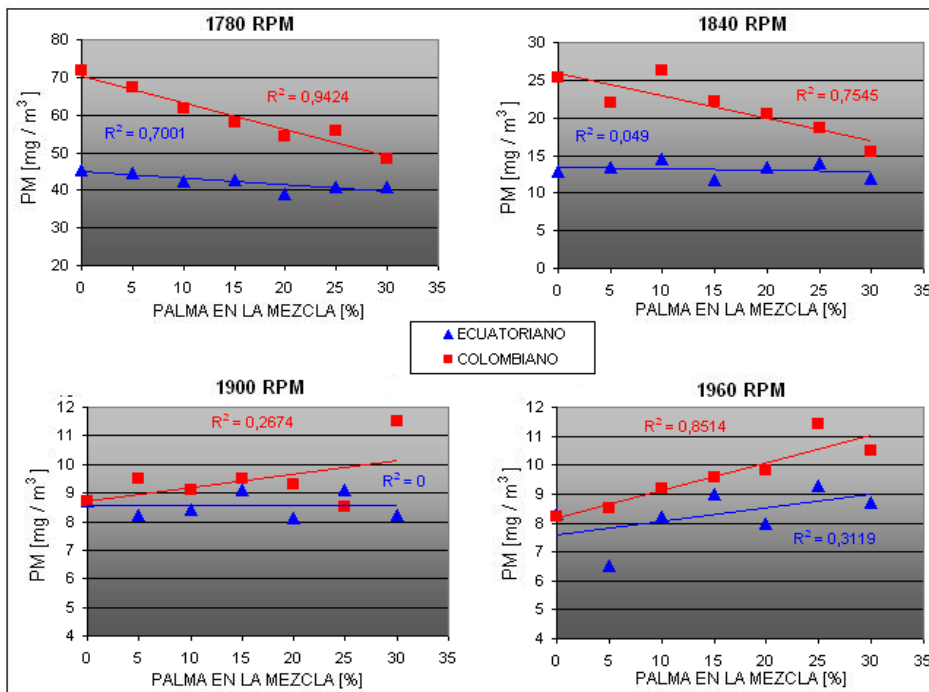
**Figura 5.53** Curva comparativa del PM para mezclas con diesel colombiano

En la figura 5.54 se observa que en efecto existe una disminución del PM a medida que aumenta la concentración de las mezclas. Las reducciones son del 1,3% por cada 5% de palma para las mezclas con diesel ecuatoriano y de 4,27% para las mezclas con diesel colombiano.



**Figura 5.54** Variación porcentual del PM entre las 1750 y 1960 rpm

En la figura 5.55 se muestra la variación del PM respecto a la concentración de las mezclas. Se aprecia que cuando el motor está sometido a cargas elevadas, el PM tiende a reducirse a medida que aumenta la concentración de las mezclas. A medida que se disminuye la carga, se observa que el PM tiende a incrementarse con la concentración aunque la relación ya no tiene un ajuste lineal bueno. Adicionalmente se observa que las emisiones de PM son mayores en todos los casos para el diesel colombiano y sus mezclas



**Figura 5.55** Variación del PM a diferentes velocidades

## **CAPITULO 6**

### **ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

#### **6.1 PARÁMETROS DE DESEMPEÑO**

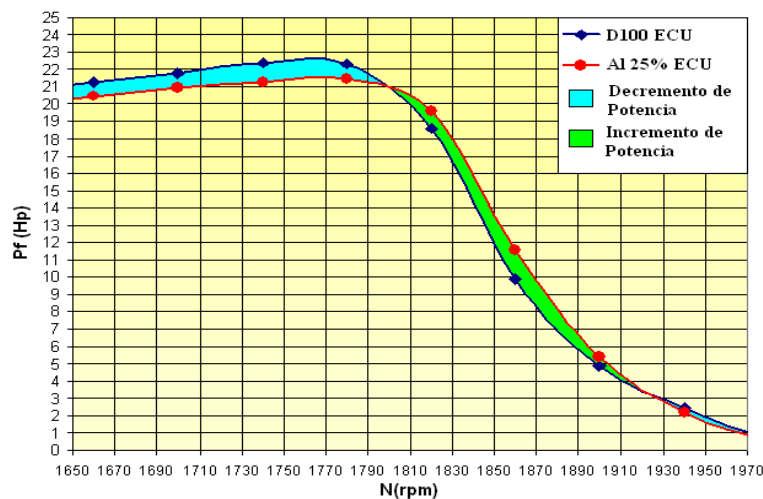
En la caracterización de los combustibles se observó que existe una reducción del poder calórico a medida que aumenta la concentración. Esta propiedad impacta significativamente en la potencia del motor. Por otro lado, se tiene un aumento en la densidad (mezclas más concentradas) que contribuye a que la reducción de potencia sea menos notoria pero a su vez se refleja en parte del aumento del consumo másico de combustible.

##### **6.1.1 ANÁLISIS DEL TORQUE, POTENCIA Y DEL CONSUMO MÁSIKO DE COMBUSTIBLE**

La potencia, el torque y el consumo de combustible son los parámetros de desempeño más importantes en un motor de combustión interna. El torque y la potencia al freno se comportan de igual forma ya que la potencia depende directamente del torque. Generalmente en un motor se obtiene el torque máximo cuando la eficiencia volumétrica es máxima, sin embargo en este motor se puede observar que la eficiencia volumétrica continua aumentando luego de las 1780 rpm (donde el torque es máximo) y parece que empieza a disminuir a las 1950 rpm (ver figuras 5.32 y 5.33). Esto indica que el torque decae a las 1780 rpm debido a que el regulador de combustible controla la entrada de combustible a esa velocidad, provocando que la masa de combustible inyectada disminuya. Por esta razón se observa que las curvas de potencia, torque, consumo másico de combustible y temperatura tienen el mismo comportamiento en función de la velocidad.

Al aumentar la concentración de las mezclas, se constata que el consumo másico de combustible aumenta proporcionalmente (ver figura 5.10). La disminución del poder calórico de las mezclas desencadena en una

disminución de la potencia en cargas elevadas. Probablemente, esta reducción de potencia provocó que el regulador de combustible permita el paso de un poco más de combustible a estas velocidades (hasta las 1780, 1800 rpm). Esto causa que el motor se mantenga estable en valores altos de potencia y torque por unas 10 a 20 rpm más, lo que finalmente da origen a ciertas zonas de ganancia de potencia y torque (de las mezclas vs. los diesel puros) a partir de las 1800 rpm (ver figura 6.1). Esto hace suponer que la potencia no depende de la concentración en la totalidad del rango de velocidad analizado (ver figura 5.5). Por eso se analizan las tendencias de los parámetros de rendimiento hasta las 1810 rpm ya que este es el rango de velocidad más estable (ver figura 5.6). En general se puede atribuir las pérdidas de potencia y torque a la disminución del poder calórico de las mezclas (ver figura 4.8), ya que todos estos disminuyen proporcionalmente.



**Figura 6.1** Áreas de incremento y de decremento de potencia

En la tabla 6.1 se muestran las probabilidades de que la potencia, torque y consumo másico de combustible sean dependientes de la concentración.<sup>1</sup>

**Tabla 6.1** Probabilidades de dependencia

PARÁMETRO	PROBABILIDAD RANGO TOTAL [%]	PROBABILIDAD HASTA LAS 1810 RPM [%]
Tq	71,6	>99,9
Pf	67,3	>99,9
mc	40,3	97,7

<sup>1</sup> El análisis de probabilidad fue realizado con la herramienta regresión de Microsoft Excel

### **6.1.2 ANÁLISIS DEL CEC Y DE LA EFICIENCIA TÉRMICA**

El consumo específico de combustible aumenta (ver figura 5.14) debido al aumento del consumo másico de combustible y a la disminución de la potencia. Estos aumentos son relativamente pequeños (centésimas de [Kg/Kw-h], ver figura 5.15), por lo menos hasta las 1850 rpm donde el CEC es mínimo. A partir de este punto, los bajos valores de potencia obtenidos luego de las 1930 rpm, hacen que el CEC se dispare. La probabilidad de que el CEC dependa linealmente de la concentración hasta las 1810 rpm es mayor al 99,9%. Para todo el rango de velocidad esta probabilidad es del 35,8%.

La eficiencia térmica disminuye ligeramente al aumentar la concentración de las mezclas (ver figura 5.26), ya que el motor necesita una mayor cantidad de combustible para producir una menor potencia. Esta disminución porcentual es atenuada por el decremento del poder calórico por lo que ésta es menor que la del CEC. Se obtiene la mayor eficiencia térmica cerca de las 1850 rpm (ver figuras 5.24 y 5.25), pues el consumo de combustible decae un poco antes que la potencia. La probabilidad de que la eficiencia térmica dependa linealmente de la concentración hasta las 1810 rpm es mayor al 99,9%. Para todo el rango de velocidad esta probabilidad es del 50%.

### **6.1.3 ANÁLISIS DEL CONSUMO MÁSIKO DE AIRE, DE LA RELACIÓN A/C Y DE LA EFICIENCIA VOLUMÉTRICA**

El consumo másico de aire varia directamente proporcional con la velocidad del motor, en el rango de velocidad analizado (ver figuras 5.16 y 5.17). Sin embargo, existe un aumento más drástico entre las 1800 y 1900 rpm. Esto se debe a que la eficiencia volumétrica aumenta en mayor medida a esas velocidades. A medida que aumenta la velocidad se necesita que una mayor masa de aire ingrese a la cámara en menor tiempo por lo que es lógico que el consumo de aire varíe directamente con la velocidad. Al aumentar la concentración de las mezclas, el consumo de aire se mantiene casi constante por lo que se podría considerar que es independiente de la concentración (ver

figura 5.18). El consumo de aire es ligeramente mayor para las mezclas con diesel ecuatoriano (en comparación a las mezclas con diesel colombiano) porque la eficiencia volumétrica también es mayor para esas mezclas.

La relación aire – combustible prácticamente muestra un comportamiento inverso al del consumo másico de combustible, ya que el consumo másico de aire se crece a un ritmo constante. La relación se mantiene cerca de su valor estequiométrico cuando las cargas son elevadas. A partir de las 1800 rpm, la mezcla se empobrece rápidamente (ver figuras 5.20 y 5.21) pues a partir de esta velocidad, el consumo de combustible decae (ver figuras 5.8 y 5.9). De la misma forma, la relación A/C resulta linealmente dependiente de la concentración de las mezclas (ver figura 5.22), pues el incremento del consumo de combustible hace que la relación A/C se enriquezca a medida que aumenta la concentración. Existe una probabilidad del 89,9% de que la relación A/C sea linealmente dependiente de la concentración. Puesto que el consumo de combustible es mayor para las mezclas con diesel colombiano, la relación A/C es mayor para las mezclas con diesel ecuatoriano (ver figura 5.23). Las diferencias en las propiedades de flujo como la densidad y en la viscosidad entre el diesel ecuatoriano y el colombiano, pueden ser las responsables de este aumento en el consumo de combustible por parte del diesel colombiano. Sin embargo, hace falta realizar otro tipo de pruebas para poder verificar esta hipótesis.

La eficiencia volumétrica depende de la velocidad del motor, llegando así a su máximo cuando el arrastre del aire que entra (debido al vacío creado por los gases de escape que salen) y el menor tiempo de llenado existente (a medida que aumenta la velocidad), llegan a un equilibrio. En la presente investigación, el equilibrio se alcanza a las 1940 rpm. Por lo tanto, se puede señalar que la eficiencia volumétrica no depende del tipo de combustible utilizado sino de los factores constructivos del motor, como lo son el diseño de las válvulas, su calibración, diseño de los múltiples de admisión y escape, etc. De esta forma, y como se aprecia en la figura 5.34, la eficiencia volumétrica se mantiene constante e independiente de la concentración de las mezclas. No obstante, la

eficiencia es mayor para mezclas con diesel ecuatoriano que para mezclas con diesel colombiano. Puede que esto se deba a errores en la toma de datos.

#### **6.1.4 ANÁLISIS DE LA TEMPERATURA DE LOS GASES DE ESCAPE**

La temperatura de los gases de escape varía de la misma forma que el consumo másico de combustible en relación a la velocidad (ver figuras 5.28 y 5.29), ya que al existir una mayor masa de combustible dentro de la cámara, se dispone de una mayor energía para ser quemada produciéndose así un incremento en la temperatura. El incremento en el consumo de combustible debido al incremento en la concentración también colabora a un aumento en la temperatura (ver figura 5.30), ya que existe una mayor cantidad de oxígeno (de las mezclas). A partir de las 1810 rpm, no se puede establecer con certeza una relación de dependencia lineal de la temperatura con la concentración de las mezclas. La probabilidad de que la temperatura dependa linealmente de la concentración hasta las 1810 rpm es del 98,9%. Para todo el rango de velocidad esta probabilidad es del 13%.

## **6.2 EMISIONES DE GASES CONTAMINANTES**

De la caracterización de las mezclas se tiene que existe un aumento de la viscosidad alrededor del 10% por cada 5% de palma en las mezclas. El incremento en esta propiedad hace que el tamaño de la gota en atomización también aumente, por lo que existe menor área de contacto (mezcla) entre el combustible y el aire dentro de la cámara de combustión antes de que la mezcla se encienda. Esto sugiere que la afectación a la combustión por llama premezclada es significativa y por ende, a las emisiones provenientes de la misma.

Por otro lado, las mezclas tienen también un aumento en las temperaturas de destilación en alrededor de un 1,4% por cada aumento del 5% en la concentración. Esto significa que la volatilidad del combustible disminuye en la misma proporción, a medida que se incrementa la concentración del aceite de palma. Al ser menos volátiles, se dificulta también la difusión del combustible

con el aire afectando así también a la combustión especialmente por llama premezclada.

### **6.2.1 ANÁLISIS DE LAS EMISIONES DE CO<sub>2</sub> Y DE O<sub>2</sub>**

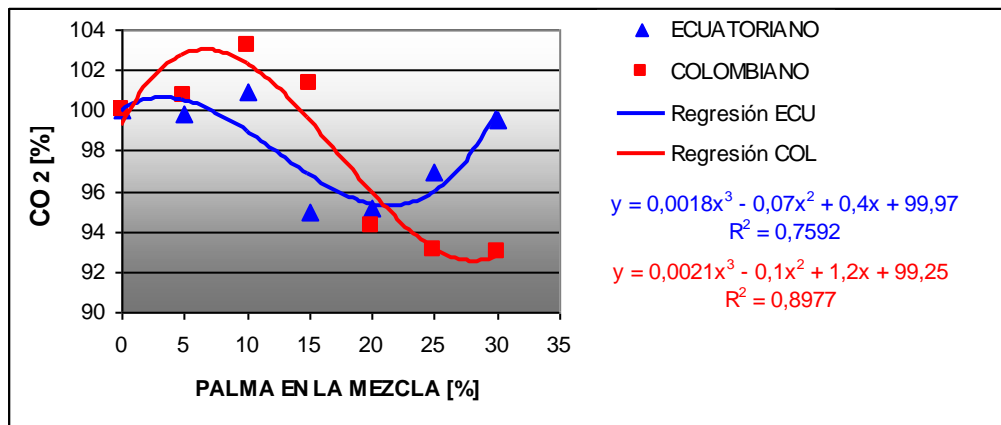
Se puede ver en las figuras 5.36 y 5.37 que para el diesel ecuatoriano y sus mezclas, el CO<sub>2</sub> se mantiene relativamente constante entre las 1750 a 1840 rpm. En el caso del diesel colombiano y de sus mezclas, el CO<sub>2</sub> tiende a aumentar en este rango de velocidad de un 5,5 a un 7%. Esto probablemente ocurre por problemas operativos del motor. A partir de las 1840 rpm, se puede observar claramente que las emisiones de CO<sub>2</sub> disminuyen. Esto se debe a que la cantidad de combustible inyectado también disminuye a esta velocidad (ver figuras 5.8 y 5.9). A partir de las 1900 rpm, el CO<sub>2</sub> disminuye en menor medida por la misma razón.

Por otro lado, las curvas de O<sub>2</sub> (ver figuras 5.36 y 5.37) y las curvas de CO<sub>2</sub> varían inversamente. Esto es lógico ya que mientras más combustible se queme, más O<sub>2</sub> se consume y más CO<sub>2</sub> se produce. Adicionalmente en la figura 5.38 se muestra que el porcentaje de O<sub>2</sub> en los gases de escape tiende a aumentar a medida que aumenta la concentración de palma y el de CO<sub>2</sub> a disminuir (ver figura 5.40). El incremento de O<sub>2</sub> se puede explicar por dos factores. El primero es el 11,6% de O<sub>2</sub> extra en la composición de la palma en comparación a los diesel puros. El segundo es que la disminución del CO<sub>2</sub> es un símbolo de un deterioro en la combustión probablemente debido a una peor atomización.

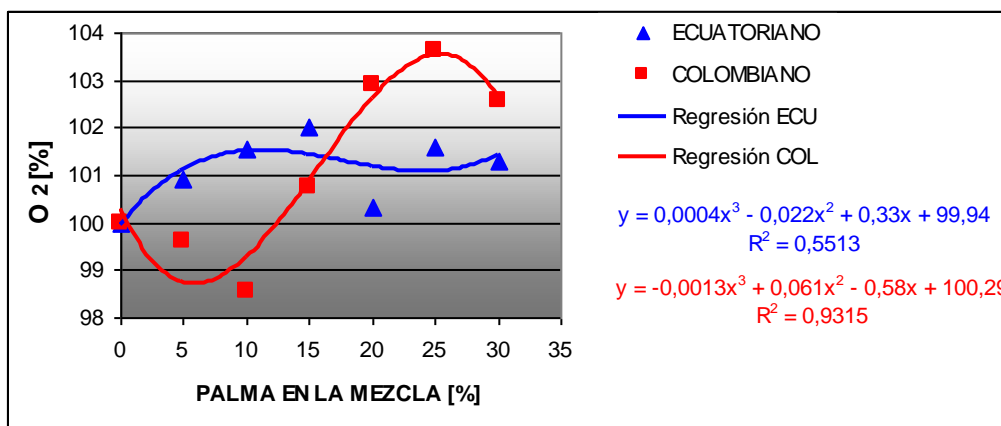
Por los datos obtenidos para las mezclas con diesel colombiano, se observa en figura 5.40 que existe un aumento de CO<sub>2</sub> para las mezclas hasta el 15% siendo esta emisión máxima al 10%. De igual forma se constata que las mezclas al 20, 25 y 30% experimentan disminuciones de CO<sub>2</sub> de alrededor del 7%. Esto parece indicar que el aumento de la viscosidad así como la disminución de la volatilidad afecta significativamente las propiedades de la atomización lo que incide principalmente en la combustión por llama premezclada. Ya que el incremento de la viscosidad no es tan grande para



mezclas con poca concentración, éstas muestran una mejora en la combustión debido a la mayor cantidad de O<sub>2</sub>. Sin embargo parece que estas propiedades llegan a un equilibrio en la mezcla al 10% y a partir de ahí los efectos negativos del aumentos de la viscosidad ejercen una supremacía sobre los efectos positivos del aumento del O<sub>2</sub>. Para las mezclas con diesel ecuatoriano, no es posible determinar si estas emisiones son dependientes de la concentración (por lo menos linealmente), sin embargo la mezcla al 10% muestra también una mejora en la combustión y se ve que esta empeora considerablemente para mezclas de mayor concentración. Se debe rescatar que la mezcla al 15% es la que menos CO<sub>2</sub> emite, por lo que el aumento de temperatura existente debe mejorar parte de la combustión por llama difusa.



**Figura 6.2** Variación porcentual del CO<sub>2</sub> con ajuste polinómico de tercer grado



**Figura 6.3** Variación porcentual del O<sub>2</sub> con ajuste polinómico de tercer grado

Existe una probabilidad del 88,5% para las emisiones de O<sub>2</sub> y del 98,7% para las de CO<sub>2</sub> de que estas sean dependientes de la concentración con un ajuste

polinómico de tercer grado, lo que reflejaría el comportamiento antes mencionado (ver figuras 6.2 y 6.3). Cabe destacar, que el aceite de palma usado, contiene en su composición un 6,8% más de carbono que el diesel ecuatoriano y un 4,6% más que el diesel colombiano (ver Anexo B). Esto colabora en parte al aumento de las emisiones compuestas por átomos de carbono (CO, CO<sub>2</sub>, THC y PM).

### **6.2.2 ANÁLISIS DE LAS EMISIONES DE CO**

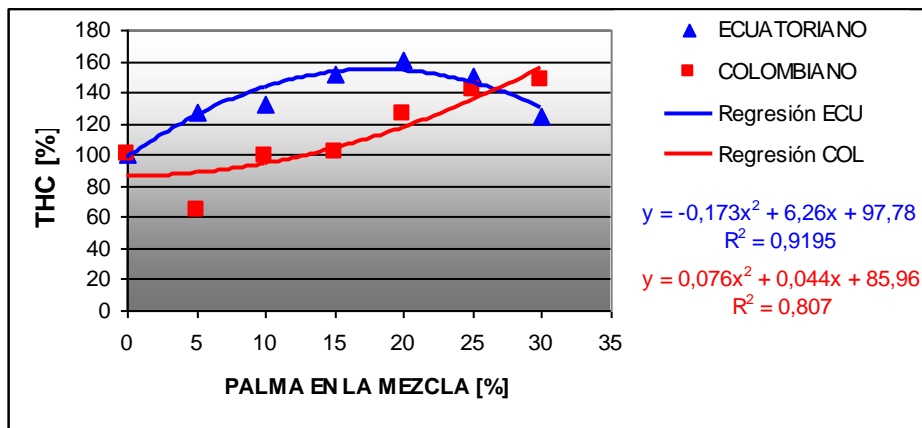
En cuanto al CO, se observa en las figuras 5.41 y 5.42, que este disminuye en el rango de las 1750 y las 1840 rpm para todos los combustibles. Esto se debe a que el consumo másico de combustible disminuye drásticamente desde las 1750 hasta las 1900 rpm. De igual forma se constata que esta disminución tiende a ser lineal en este rango, lo que es más notable en el diesel ecuatoriano y sus mezclas, pues el motor estuvo más estable. A partir de las 1840 rpm se aprecia que las emisiones de CO disminuyen a 0% debido a la disminución de la cantidad de combustible inyectado. A partir de las 1880 rpm, el CO vuelve a incrementarse ligeramente; ya que al aumentar la velocidad, existe un menor tiempo para que se queme toda la mezcla (aire-combustible) y por lo tanto la combustión es más incompleta. Se puede apreciar que en general existe una disminución del CO para las mezclas. En el caso de las mezclas con diesel colombiano es factible ver que esta disminución es linealmente dependiente de la concentración (ver figura 5.43). En general al combinar todos los datos obtenidos se tiene que existe una probabilidad del 87,1% de que esta disminución del CO sea dependiente de la concentración.

La disminución del CO es un símbolo de una combustión más completa. Esto se debe probablemente a la diferencia entre las emisiones generadas por la combustión en llama premezclada y difusa. Como se menciono anteriormente, la llama premezclada se empeora, sin embargo, el aumento de la temperatura mejora la combustión por llama difusa, lo que aparentemente provoca una disminución del CO.

Como se puede ver en la figura 5.11, el diesel colombiano y sus mezclas presentan un mayor consumo másico de combustible que sus contrapartes ecuatorianas. Por esto se observa que en general, las emisiones de gases contaminantes son mayores para el diesel colombiano y sus mezclas. Por otro lado, se observa que estas emisiones experimentan una mayor reducción a medida que aumenta la concentración de las mezclas. El aumento de temperatura para las mezclas con diesel colombiano es por lo general mayor que para las mezclas con diesel ecuatoriano (ver figura 5.31), lo que probablemente se debe a que se inyecta una mayor masa de combustible. Al existir una mayor temperatura se debe producir una mejor combustión por llama difusa generando así una disminución más notoria en las emisiones.

### **6.2.3 ANÁLISIS DE LAS EMISIONES DE THC**

En general existe un incremento del THC para mezclas con ambos diesel a medida que aumenta la concentración. Este incremento se debe probablemente al deterioro de la combustión por llama premezclada. Adicionalmente, al mezclarse el aceite que escapa del motor con los hidrocarburos de mayor punto de ebullición, se forman minúsculas gotas de aceite que son más resistentes a la combustión y que escapan a la atmósfera durante el traslape. Se aprecia una disminución del THC para mezclas al 5 y al 10% y un ligero aumento para la mezcla al 15% con diesel colombiano. En el caso de las mezclas con diesel ecuatoriano, el THC aumenta en todos los casos. En los casos más críticos se tienen aumentos del 50% para la mezcla al 30% con diesel colombiano y del 60% para la mezcla al 20% con diesel ecuatoriano. Las mezclas con poca concentración presentan incrementos menores del THC debido a que su viscosidad es menor que la de las mezclas con alta concentración, lo que afecta en menor medida a la atomización. Las mezclas con alta concentración también presentan incrementos menores que las mezclas con concentración media, debido al incremento de la temperatura. La probabilidad de que las emisiones de THC dependan de la concentración con un ajuste polinómico de segundo grado es mayor al 99,9%. Este comportamiento se lo muestra en la figura 6.4.



**Figura 6.4** Variación porcentual del THC con ajuste polinómico de segundo grado

Adicionalmente se observa en la figura 5.49 que el TCH es mayor para el diesel ecuatoriano y sus mezclas en todas las velocidades. Esto puede deberse a que la combustión de las mezclas con diesel colombiano provocan una mayor temperatura dentro de la cámara logrando así que se los TCH se quemen de mejor forma, durante la combustión por llama difusa.

#### 6.2.4 ANÁLISIS DE LAS EMISIONES DE NOx

Se puede apreciar en las figuras 5.46 y 5.47, que los NOx tienden a aumentar en cargas altas hasta llegar a un máximo alrededor de las 1840 rpm. A partir de esta velocidad disminuyen y se observa también que la pendiente cambia a las 1900 rpm. Este comportamiento se debe a que las emisiones de NOx están sumamente relacionadas con la temperatura, ya que, cuando la temperatura supera los 860 [°C] el N<sub>2</sub> presente en aire se disocia del mismo y reacciona con el O<sub>2</sub> existente en la cámara de combustión formándose principalmente NO y NO<sub>2</sub>. La temperatura de los gases de escape llega a su máximo alrededor de las 1780 a 1800 rpm, de lo que se puede suponer que dentro de la cámara de combustión la temperatura superó en mayor medida los 860 [°C]. Esto combinado con la mayor cantidad de aire entrante (más N<sub>2</sub>) a velocidades superiores (1840 rpm), provocan un máximo de NOx a esa velocidad.

Los NOx también tienden a aumentar a medida que se incrementa la concentración de las mezclas. Sin embargo, este aumento no parece deberse solo al aumento de temperatura. Si se comparan las figuras 5.40 y 5.50, se puede apreciar que para las mezclas con diesel colombiano los datos de NOx y

de CO<sub>2</sub> tienen un comportamiento muy similar. Por lo tanto los NO<sub>x</sub> siempre aumentan ya que la temperatura también lo hace, pero parece que su comportamiento va determinado por las mejoras y deterioros en la combustión que fueron descritos en el análisis de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

La combustión, en motores de combustión interna, se inicia tanto en un punto (donde la mezcla A/C ha alcanzado las condiciones de presión y temperatura necesarias para su ignición) como en varios puntos, los mismos que exhiben las mayores concentraciones de temperatura dentro de la cámara. Mientras éstas sean más elevadas, mayores serán las temperaturas de las áreas que los rodean. La presencia del oxígeno en las mezclas provoca incrementos de temperatura en estos puntos de ignición, aumentando así el tamaño de estas áreas y que además poseen temperaturas mayores a los 860 [°C]. Esto sugiere que el aumento de los NO<sub>x</sub>, se da como producto de la combustión por llama premezclada. No obstante, la probabilidad de que los NO<sub>x</sub> sean linealmente dependientes de la concentración, es solo del 31,1%. Adicionalmente, las emisiones de NO<sub>x</sub> son por lo general mayores para las mezclas de diesel colombiano. Probablemente, esto se debe a la mayor temperatura que éstas registraron en comparación a las mezclas con diesel ecuatoriano.

D. Y. C. Leung et al. <sup>(61)</sup> sugieren que se controle el incremento de los NO<sub>x</sub> retrasando el tiempo de inyección para disminuir así la temperatura producto de la combustión por llama premezclada. Esto disminuye la formación de puntos de ignición (con temperaturas mayores a los 860 [°C]) y en consecuencia, también los NO<sub>x</sub>. Por otro lado, se disminuye también la duración de la inyección para mantener recuperar la eficiencia perdida por la disminución de la combustión premezclada. Para esto se varía la presión y del tiempo de inyección, así como del diámetro de los émbolos de la bomba.

### **6.2.5 ANÁLISIS DE LAS EMISIONES DE PM**

Se observa que el PM varía inversamente con la velocidad (ver figuras 5.52 y 5.53) debido a que al inyectarse menos combustible, el PM también disminuye. De esta forma las curvas de este contaminante tienden a variar de la misma

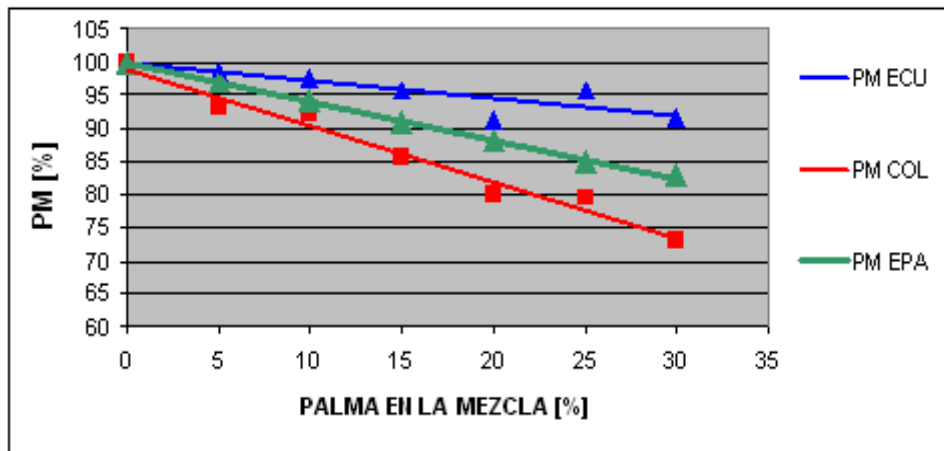
forma que lo hacen las curvas de consumo másico de combustible en función de la velocidad. Como se esperaba, se tienen en efecto disminuciones del PM a medida que aumenta la concentración de las mezclas. La probabilidad de que esto sea así es del 75,6%, sin embargo se observan buenos ajustes lineales para este contaminante (ver figura 5.54).

Debido al aumento de temperatura dentro de la cámara en llama difusa, se quema una mayor cantidad de las partículas sólidas que forman el PM (hollín). Esto se sustenta en que se observó una reducción en la opacidad del humo proveniente del escape del motor a medida que se incrementaba la concentración de las mezclas. Adicionalmente, ya que la palma es libre de azufre, los sulfatos que también forman parte del PM también deben reducirse. Esto se puede observar en las ecuaciones de combustión planteadas en el Anexo B. La reducción de estos componentes debe ser mayor que el incremento en la SOF debido al aumento de los hidrocarburos no quemados que la componen. Por esta razón disminuye el PM.

También se aprecia en la figura 5.55 que cuando el motor está sometido a cargas elevadas, el PM tiende a reducirse a medida que aumenta la concentración de las mezclas, ya que la temperatura dentro de la cámara también aumenta con la concentración a esa velocidad. A medida que se disminuye la carga, se observa que el PM tiende a incrementarse con la concentración. Esto se debe a que a que la temperatura se comporta de igual forma a esas cargas y velocidades en relación a la concentración. Adicionalmente se observa que las emisiones de PM son mayores en todos los casos para el diesel colombiano y sus mezclas debido a que se inyecta una mayor cantidad de combustible, razón por la cual, la reducción del PM es más notoria para las mezclas con diesel colombiano.

En la figura 6.5 se puede comparar los valores de PM obtenidos para el diesel ecuatoriano, el colombiano y el promedio de varios estudios documentados por la EPA <sup>(3)</sup>. Se puede apreciar que la reducción de PM de la EPA es mayor que la obtenida para el diesel ecuatoriano y menor que la obtenida para el diesel colombiano. De esto se puede asumir que el promedio de las reducciones

porcentuales de PM entre el diesel colombiano y el ecuatoriano van acorde con las reducciones promedio de las investigaciones documentadas por EPA.



**Figura 6.5** Comparación de la reducción porcentual del PM

### 6.3 DETERMINACIÓN DE LA MEZCLA ÓPTIMA

Inicialmente se determinó que la mezcla óptima no debe tener una viscosidad mayor a 6 [mm<sup>2</sup>/s], pues es este el límite máximo permitido para biodiesel según lo expresa la norma ASTM D-6751. Tal cual como se observó esta propiedad es de suma importancia para el buen desempeño del motor, sobre todo en lo que a emisiones se refiere.

Tras realizar las pruebas de rendimiento, se determinó que existen pérdidas de potencia máxima alrededor del 1,8% para mezclas con concentración del 10%. El torque se comportó de igual manera que la potencia en el motor utilizado. Por otro lado, se registraron aumentos en el consumo másico de combustible alrededor del 2,5% para mezclas al 10%. Básicamente estos son los tres parámetros que determinan el desempeño del motor.

En cuanto a las emisiones, se observó que la atomización se deterioró al aumentar la concentración. No obstante, existe una mejora en la combustión para mezclas con concentraciones hasta del 10% con ambos diesel. Es en este punto donde se obtiene el mejor balance de emisiones. Sin embargo, la reducción de particulado es sólo del 5% con estas concentraciones. Podría ser recomendable el uso de mezclas al 30% cuando se utilice catalizadores de

oxidación y un sistema de calentamiento para el bio-combustible. El hecho de que las mezclas tienen una menor cantidad de azufre (ver Anexo B), podría permitir el uso de estos catalizadores, para así reducir principalmente los THC que son parte mayoritaria de la SOF y por ende del material particulado. Sin embargo, se requiere estudios usando catalizadores para confirmar la suposición planteada. No obstante, el diesel ecuatoriano necesita ser reformulado en su proceso productivo para que sea considerado de bajo sulfuro (es decir apto para el uso de estos catalizadores). Necesitaría reducir su contenido de azufre en un 75%. Como es obvio con una mezcla al 30% solo se reduce el 30% de azufre en el combustible.

Por otro lado, debido a los altos puntos de nebulización y de vertido que presenta el bio-combustible, no es recomendable el uso de mezclas con concentraciones mayores al 20%, aun si se utiliza un sistema de calentamiento. Esto se debe a que existe precipitación a la temperatura ambiente y puede por consiguiente tapar los filtros e inyectores. Se percibió que la precipitación fue dependiente de la concentración. Basta una pequeña concentración de aceite de palma, para que el punto de nebulización se eleve considerablemente; lo que sugiere que no existe una buena solubilidad de la palma en el diesel. Para mezclas hasta del 10%, la precipitación no es tan notoria como para mezclas con concentraciones mayores. Cabe rescatar que es necesario calentar este combustible sobre su punto de nebulización, por lo que es necesario un sistema de calentamiento en el tanque de almacenamiento y en los filtros de combustible.



# CAPITULO 7

## ANÁLISIS ECONÓMICO

En este capítulo se detallan los costos incurridos en la realización del presente estudio

### 7.1 PERSONAL

El costo del personal que colaboró en la realización de los diferentes ensayos de caracterización, pruebas de rendimiento y de emisiones, se encuentra incluido en los costos de los ensayos.

### 7.2 MISCELÁNEOS

**Tabla 7.1** Costos misceláneos

DESCRIPCIÓN	COSTO [USD]
Suministros de Oficina	50
Servicios básicos	300
Normas INEN	3,36
Normas ASTM	61,6
<b>TOTAL 7.2</b>	<b>414,96</b>

### 7.3 COSTOS DIRECTOS

#### 7.3.1 HONORARIOS A PROFESIONALES

**Tabla 7.2** Costos referentes a los honorarios a profesionales

NÚMERO	POSICIÓN	TIEMPO [h]	SALARIO [USD/h]	TOTAL
1	Director de Tesis	20	50	1000,00
1	Codirector de Tesis	20	25	500,00
<b>TOTAL 7.3.1</b>				<b>1500,00</b>

### 7.3.2 APOORTE DE ESTUDIANTES

**Tabla 7.3** Costos referentes a la remuneración de estudiantes

NÚMERO	POSICIÓN	TIEMPO [h/estudiante]	SALARIO [USD/h]	TOTAL
2	Estudiantes	240	3	1440,00
<b>TOTAL 7.3.2</b>				<b>1440,00</b>

### 7.3.3 ADQUISICIÓN DE MATERIALES

**Tabla 7.4** Costos de los materiales adquiridos

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	COSTO UNITARIO [USD]	TOTAL [USD]
30	Galones de diesel colombiano	1,67	50,01
30	Galones de diesel ecuatoriano	1,06	32,10
2	Canecas de aceite de palma	20,00	40,00
5	Canecas plásticas de 12 Galones	3,92	19,60
20	Metros de cable flexible N° 8	0,88	17,67
1	Cinta contra el calor	8,82	8,82
20	Amarras plásticas	0,02	0,40
3	Borneras	1,45	4,35
1	Bornera plástica	1,00	1,00
20	Recipientes plásticos de 2 Litros	0,67	13,40
20	Guaipes	0,05	1,00
1	Unión de 2 ½ " (tubería)	2,50	2,50
<b>TOTAL 7.3.3</b>			<b>190,95</b>

### 7.3.4 COSTOS DE ENSAYOS Y DE PRUEBAS DE LABORATORIO

**Tabla 7.5** Costos de ensayos y pruebas realizadas en laboratorio

ENSAYO / PRUEBA	LABORATORIO	EQUIPOS	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL [USD]
Densidad API	Laboratorio de petróleos de la UCE	Hidrómetro ASTM	4,48 [USD/ensayo]	67,20

**Tabla 7.5** Costos de ensayos y pruebas realizadas en laboratorio (CONTINUACIÓN)

<b>ENSAYO / PRUEBA</b>	<b>LABORATORIO</b>	<b>EQUIPOS</b>	<b>COSTO UNITARIO</b>	<b>COSTO TOTAL [USD]</b>
Medición de la viscosidad cinemática	Laboratorio de petróleos de la UCE	Viscosímetro Canon ASTM, Baño	6,72 [USD/ensayo]	100,80
Poder calórico	Laboratorio de termodinámica, ESPE Sangolquí	Bomba calorimétrica adiabática.	22,40 [USD/ensayo]	336,00
Número de cetano	Laboratorio de petróleos de la UCE	Balón graduado, termómetro ASTM e hidrómetro ASTM	7,84 [USD/ensayo]	117,60
Destilación ASTM	Laboratorio de petróleos de la UCE	Equipo de destilación ASTM, Termómetros, Balón y Probeta graduados ASTM,	8,96 [USD/ensayo]	134,40
Punto de inflamación	Laboratorio de petróleos de la UCE	Copa cerrada de Pensky – Martens	5,60 [USD/ensayo]	84,00
Punto de vertido y de nebulización	Laboratorio de petróleos de la UCE	Tubo de vidrio, termómetros ASTM, refrigeradora hasta -30 [°C]	5,60 [USD/ensayo]	84,00
Nitrógeno total	Laboratorio de petróleos de la UCE	Espectrofotómetro de Hach	11,20 [USD/ensayo]	22,40
Azufre	Laboratorio de petróleos de la UCE	Espectrofotómetro de difracción de rayos X	22,40 [USD/ensayo]	44,80
Variación de la velocidad.	Laboratorio de motores de combustión interna, ESPE, Sangolquí	Banco de pruebas PLINT TE-16	51 [USD/h]	1530,00
Medición de gases combustión CO, THC, NO <sub>x</sub> , CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> y PM	Laboratorio de motores de combustión interna, ESPE, Sangolquí	Clean AIR Technologies, modelo Montana OEM2100	20 [USD/ensayo]	300,00
<b>TOTAL 7.3.4</b>				<b>2821,20</b>
<b>TOTAL 7.3</b>				<b>5952,15</b>

## 7.4 COSTO TOTAL

COSTO TOTAL = TOTAL 7.2 + TOTAL 7.3 = 414,96 + 5952,15 = 6367.11 [USD]



## CAPITULO 8

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 8.1 CONCLUSIONES

1. Las mezclas diesel – aceite de palma presentaron aumentos en la densidad, viscosidad y en los puntos de nebulización y vertido. De la misma forma, existe una disminución del poder calórico, así como de la volatilidad de las mezclas. Estas propiedades varían linealmente con la concentración para mezclas de hasta el 30% de aceite de palma a excepción del punto de nebulización. El punto de inflamación y el número de cetano no presentaron variaciones significativas en relación al aumento de la concentración.
2. El torque y la potencia al freno disminuyeron en alrededor del 0,8% por cada aumento del 5% de aceite de palma en las mezclas. Esta disminución es proporcional al incremento de la concentración entre las 1650 a 1810 rpm. De igual forma, el consumo másico de combustible aumentó en un promedio de 0,85% por cada aumento del 5% en la concentración, en el mismo rango de velocidad. En general se atribuye este comportamiento a la disminución del poder calórico de las mezclas, producto del incremento de la concentración.
3. Se observó disminuciones de PM promedio del 2,8% por cada aumento del 5% en la concentración. Esta disminución es proporcional al aumento de la concentración y se debe a la mejora de la combustión por llama difusa. Las emisiones de NOx aumentan debido al incremento en la temperatura dentro de la cámara de combustión y a la mayor cantidad de oxígeno presente en esta. Sin embargo, no se puede concluir que estos sean dependientes de la concentración. También se registran disminuciones de CO y aumentos de THC.
4. A concentraciones del 10% con ambos diesel, se tiene el mejor balance de disminución de emisiones versus reducción de torque y potencia y aumento

del consumo de combustible. A concentraciones mayores, se observa que el aumento de viscosidad que presentan las mezclas, además de la disminución de la volatilidad; deterioran significativamente la combustión por llama premezclada. Adicionalmente, el alto punto de nebulización de las mezclas aumenta la deposición de sedimentos en todo el sistema de combustible, lo que puede llegar a obstruir los filtros, inyectores de combustible.

## **8.2 RECOMENDACIONES**

1. Se recomienda que se realice estudios con catalizadores oxidantes para disminuir las emisiones de THC y aumentar las reducciones de PM. Para esto resulta importante la utilización de combustibles diesel de bajo sulfuro.
2. Se recomienda el uso de filtros con calentamiento, así como el aprovechamiento del calor disponible en los gases de escape, para calentar el bio-combustible almacenado en el tanque de combustible. Para lo mencionado, se pueden utilizar sistemas híbridos en los que se encienda el motor con diesel puro, con el que se calienta el motor y el bio-combustible para proceder luego a la utilización del mismo. Adicionalmente los tanques de combustible, deben disponer de un mezclador para evitar la acumulación de sedimentos. Es recomendable que se estudie el efecto que tienen los aditivos que mejoran la fluidez del combustible a bajas temperaturas, en las mezclas diesel – aceite de palma; así como también, métodos que mejoren la solubilidad del aceite de palma RBD en el diesel.
3. Resulta conveniente la realización de estudios sobre la estabilidad, lubricidad, compatibilidad de materiales y durabilidad de distintos motores Diesel al utilizar mezclas diesel – aceite de palma al 10% o en concentraciones menores. De igual forma, se necesita evaluar el comportamiento de los parámetros de desempeño y de las emisiones de gases contaminantes, en pruebas en estado transitorio.

## REFERENCIAS

1. <http://es.wikipedia.org/wiki/Portada>, Wikipedia enciclopedia libre, Español, 2006.
2. CD, Biblioteca de Consulta Microsoft® Encarta®, Microsoft Corporation, 2005.
3. EEUU, US Department of Energy, (2006), *Biodiesel Handling and Use Guidelines*, (S.E.), US Department of Energy, 2<sup>da</sup> Edición, p. 68, Springfield, EEUU.
4. Michael S. Graboski y Robert L. McCormick, (1998), *Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in Diesel engines*, Editorial Elsevier science, Colorado Institute for Fuels and High Altitude Engine Research and Department of Chemical Engineering and Petroleum Refining, Colorado School of Mines, p. 40, EEUU.
5. <http://www.mambiente.munimadrid.es/contamiweb.html#seccion16>, *Emisiones contaminantes*, Español, (s.f.)
6. <http://prueba.corpaire.org/paginas/articulos/inventario03.pdf>, *Inventario de emisiones para el Distrito Metropolitano de Quito*, Español, 2003.
7. [http://www.biodiesel.org/pdf\\_files/fuelfactsheets/emissions.pdf](http://www.biodiesel.org/pdf_files/fuelfactsheets/emissions.pdf), *Emisiones*, Inglés, (s.f.).
8. [www.danec.com](http://www.danec.com), *Características del aceite de Palma y proceso de refinación*, Español, 2006.
9. <http://www.andrew.cmu.edu/user/jitkangl/Palm%20Oil/Refinery%20of%20Palm%20Oil.htm>, *Refinación del aceite de Palma*, Inglés, (s.f.)
10. [http://www.superban.gov.ec/downloads/articulos\\_financieros/sector%20palma%20africana.pdf](http://www.superban.gov.ec/downloads/articulos_financieros/sector%20palma%20africana.pdf), *Palma Africana en el Ecuador*, Español, 2002.
11. J.A. Chodorge, L. Kerdraon, (2000), *Biodiesel vía transesterificación de aceites vegetales*.
12. [http://www.biofuels.coop/pdfs/4\\_commercial.pdf](http://www.biofuels.coop/pdfs/4_commercial.pdf), *Tecnología de producción del Biodiesel*, Inglés, (s.f.).
13. [http://www.biodiesel.org/pdf\\_files/fuelfactsheets/BTU\\_Content\\_Final\\_Oct2005.pdf](http://www.biodiesel.org/pdf_files/fuelfactsheets/BTU_Content_Final_Oct2005.pdf), *Contenido Energético*, Inglés, 2005
14. Signer, M., Heinze et al, (1996), Soc. Automotive Eng. Technical Paper No. 961074.
15. Peterson, C. L. et al, (1996), *Development of rapeseed biodiesel for use in high-speed diesel engines*, S.E., Reportado a U.S.D.O.E., University of Idaho, p. 302.
16. Clark, S. J. et al, (1984), *J. Am. Oil Chemistry Society*, S.E., S.L., p. 1632.
17. EEUU, Midwest Biofuels Inc., (1993), *Biodiesel Cetane Number Engine Testing Comparison to Calculated Cetane Index Number*, S.E., Midwest Biofuels, Overland Park, Kansas.
18. Sims, R., (1985), *Trans ASAE*, S.E., S.L.

19. Geyer, S. M. et al, (1984), *Trans ASAE*, S.E., S.L.
20. Masjuki, H. et al, (1993), *Methyl ester of palm oil as an alternative diesel fuel. In Fuels for Automotive and Industrial Diesel Engines*, S.E., Institution of Mechanical Engineers, Londres, p. 129.
21. Peterson, C. et al, (1995), *Making and testing a biodiesel fuel made from ethanol and waste French fry oil*, S.E., Idaho Department of Water Resources Report.
22. Schumacher, L. et al, (1995), *The physical and chemical characterization of biodiesel low sulfur diesel fuel blends*, S.E., Reporte final a la NBB, Jefferson.
23. Graboski, M. S. et al, (1996), Soc. Automotive Eng. Technical Paper No. 961166.
24. [http://www.biodiesel.org/pdf\\_files/fuelfactsheets/BTU\\_Content\\_Final\\_Oct2005.pdf](http://www.biodiesel.org/pdf_files/fuelfactsheets/BTU_Content_Final_Oct2005.pdf), Contenido Energético, Inglés, 2005.
25. [http://www.biodiesel.org/pdf\\_files/fuelfactsheets/Cold%20Flow.PDF](http://www.biodiesel.org/pdf_files/fuelfactsheets/Cold%20Flow.PDF), Impacto a bajas temperaturas, Inglés, (s.f.).
26. <http://www.oilfox.com.ar/b16.htm>, Fluidez a bajas temperaturas, Español, (s.f.).
27. [http://www.biodiesel.org/pdf\\_files/fuelfactsheets/electrical\\_conductivity.pdf](http://www.biodiesel.org/pdf_files/fuelfactsheets/electrical_conductivity.pdf), Conductividad Eléctrica, Inglés, (s.f.).
28. <http://www.oilfox.com.ar/b15.htm>, Compatibilidad de materiales - oxidación, estabilidad térmica y estabilidad del Biodiesel en depósito, Español. (s.f.).
29. Van Gerpen, J. et al, (1997), Soc. Automotive Eng. Technical Paper No. 971685.
30. <http://www.biodiesel.org/resources/faqs/default.shtml>, Hechos, Inglés, (s.f.).
31. [http://www.biodiesel.org/resources/reportsdatabase/reports/gen/19971201\\_gen-022.pdf#search=%22Quantification%20and%20Improvement%20of%20the%20Long%20Term%20Storage%20Stability%20of%20Biodiesel%22](http://www.biodiesel.org/resources/reportsdatabase/reports/gen/19971201_gen-022.pdf#search=%22Quantification%20and%20Improvement%20of%20the%20Long%20Term%20Storage%20Stability%20of%20Biodiesel%22), Almacenamiento de Biodiesel a largo plazo, Inglés, 1997.
32. <http://www.oilfox.com.ar/b12.htm>, Impactos sobre el motor, Español, (s.f.).
33. [http://www.biodiesel.org/pdf\\_files/fuelfactsheets/Performance.PDF](http://www.biodiesel.org/pdf_files/fuelfactsheets/Performance.PDF); Desempeño del motor, Inglés, (s.f.).
34. EEUU, FEV Engine Technology, Inc., (1994), *Emissions and performance characteristics of the Navistar T444E DI engine fueled with blends of biodiesel and low sulfur diesel*, Fase 1, Reporte final a la NBB.
35. [http://www.biodiesel.org/pdf\\_files/fuelfactsheets/Lubricity.PDF](http://www.biodiesel.org/pdf_files/fuelfactsheets/Lubricity.PDF), Lubricidad de los biodiesel, Inglés, (s.f.).
36. [http://www.biodiesel.org/pdf\\_files/fuelfactsheets/Materials\\_Compatibility.pdf](http://www.biodiesel.org/pdf_files/fuelfactsheets/Materials_Compatibility.pdf), Compatibilidad de materiales, Inglés, (s.f.).
37. <http://www.oilfox.com.ar/b13.htm>, Durabilidad del motor con biodiesel, Español, (s.f.).



38. Manufacturers of Emission Control Association (2000), *Emission control retrofit of Diesel – fueled vehicles*, Washington DC.
39. [http://www.as-sl.com/pdf/en\\_que\\_consiste.pdf#search=%22En%20qu%C3%A9%20consiste%20el%20catalizador%22](http://www.as-sl.com/pdf/en_que_consiste.pdf#search=%22En%20qu%C3%A9%20consiste%20el%20catalizador%22), Principio de funcionamiento de los catalizadores, Español, (s.f.).
40. Canada, Ortech Corporation, (1995), *Operation of Cummins N14 diesel on biodiesel: Performance, emissions and durability*. Reporte final de la fase 1 para la NBB No. 95 EI I-B004524, Mississauga, Notario.
41. <http://www.env.go.jp/en/air/eq/exhaust-gas/01.pdf#search=%22FY2003%20Fact-Finding%20Survey%20concerning%22>, Emisiones de nuevos combustibles, Inglés, (s.f.).
42. Krahl, J. et al, (1996), Soc. Automotive Eng. Technical Paper No. 962096.
43. <http://www.epa.gov/otaq/models/analysis/biodsl/p02001.pdf>, A comprehensive analysis of biodiesel impacts on exhaust emissions, Inglés, Octubre 2002.
44. Diesel, R., (1912), *The Diesel Oil-Engine*, S.E., S.L., Engineering, pp.395–406.
45. Walton, J., (1938), *Gas & Oil Power*, S.E., S.L., p. 167.
46. Martinez de Vedia, R., (1944), *Diesel Power and Diesel Transportation*, S.E., S.L., p. 1298.
47. Huguenard, C. M., (1951), *Dual fuel diesel engines using cottonseed oil with variable injection timing*, M.S. thesis, S.E., S.L., Ohio State University.
48. Bruwer, J. J. et al, (1980), *Sunflower seed oil as an extender for diesel fuel in agricultural tractors*, S.E., Symposium of the South African Institute of Agricultural Engineers, p.11.
49. Bacon, D. M. et al, (1981), *The use of vegetable oils in straight and modified form as diesel engine fuels*, ed. R. Fazzolare and C. B. Smith, In *Beyond the Energy Crisis, Third International Conference on Energy Use Management*, Pergamon Press, New York, v. 3, p. 1525.
50. <http://www.oilfox.com.ar/b14.htm>, Funcionamiento del motor Diesel, Español, (s.f.).
51. M.P. Dorado et al, ( 2003 ), *Exhaust emissions from a Diesel engine fueled with transésterified waste olive oil*, Editorial Elsevier science, Departamento de Mecánica y Minería, Universidad de Jaén, p. 5, España.
52. Montagne, X. (1996), Soc. Automotive Eng. Technical Paper No. 962065.
53. [http://www.biodiesel-uruguay.com/noticias\\_de\\_biodiesel/biodiesel-en-el-mundo475.php](http://www.biodiesel-uruguay.com/noticias_de_biodiesel/biodiesel-en-el-mundo475.php), Biodiesel en Uruguay, Español, 2006.
54. <http://www.eco2site.com/informes/biodiesel-m.asp>, Biodiesel en el Mundo, Español, 2004.
55. [http://www.cleanairnet.org/infopool\\_es/1525/propertyvalue-19517.html](http://www.cleanairnet.org/infopool_es/1525/propertyvalue-19517.html), Biodiesel en Alemania, Español, 2007.

56. [http://www.fedepalma.org/biodiesel\\_marco\\_legal.htm](http://www.fedepalma.org/biodiesel_marco_legal.htm), Normas legales para combustibles alternativos en Colombia, Español, (2007).
57. <http://www.minas.unalmed.edu.co/facultad/escuelas/ingorganizacion/comunicaciones/pagina08.htm>, Biodiesel – Fuente de desarrollo para Colombia, Español, 2007.
58. <http://www.espectador.com/uruguayos/invierta/inv2003-12-18-2.htm>, Biodiesel en Uruguay, Español.
59. [http://www.adnmundo.com/contenidos/economia/indonesia\\_inversiones\\_130207\\_ec.html](http://www.adnmundo.com/contenidos/economia/indonesia_inversiones_130207_ec.html), Español.
60. <http://www.crisisenergetica.org/article.php?story=20060707221142535>, Biodiesel en malasia, Español, 2006.
61. D. Y. C Leung, Y. Luo y T. L. Chan, (2006), *Optimization of exhaust emissions of a Diesel engine fuelled with Biodiesel*, Centro de investigaciones para el control de la combustión y de la contaminación, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica de Hong Kong.
62. Norma ASTM D-86, Inglés, EEUU, 2004.
63. Norma ASTM D-92, Inglés, EEUU, 2004.
64. Norma ASTM D-97, Inglés, EEUU, 2004.
65. Norma ASTM D-240, Inglés, EEUU, 2004.
66. Norma ASTM D-287, Inglés, EEUU, 2004.
67. Norma ASTM D-445, Inglés, EEUU, 2004.
68. Norma ASTM D-446, Inglés, EEUU, 2004.
69. Norma ASTM D-975, Inglés, EEUU, 2004.
70. Norma ASTM D-976, Inglés, EEUU, 2004.
71. Norma ASTM D-2500, Inglés, EEUU, 2004.
72. Norma ASTM D-6751, Inglés, EEUU, 2003.
73. Norma INEN NTE INEN 2 207, Español, Ecuador, 2002.

# **ANEXOS**

## **ANEXO A**

### **DEFINICIONES**

**Aceleración libre:**

Es el aumento de revoluciones del motor de la fuente móvil, llevado rápidamente a máxima aceleración estable, sin carga y en neutro.

**Ácidos grasos:**

Son moléculas orgánicas formadas por una larga cadena de hidrocarburos de tipo lineal, y con un número par de átomos de carbono, donde el extremo de la molécula donde se encuentra el grupo carboxilo (-COOH) es el que se combina con uno de los grupos hidroxilos (-OH) de la glicerina para formar grasas. Las cadenas carbonadas de los ácidos que reaccionan con el glicerol, pueden ser saturadas o insaturadas. Si son saturadas, no hay ningún doble enlace carbono-carbono por lo que la cadena posee todos los átomos de hidrógeno que puede llegar a acomodar. Los ácidos grasos insaturados pueden ser monosaturados (un nivel de insaturación) o polisaturados (2 o 3 niveles de insaturación). <sup>(1)</sup>

**Aldehídos:**

Son compuestos orgánicos caracterizados por poseer el grupo funcional CHO. Se conoce que tienen propiedades mutagénicas y cancerígenas.

**Alquilo:**

Es un radical orgánico que resulta de eliminar un átomo de hidrógeno de un hidrocarburo alifático. <sup>(2)</sup>

**Aromáticos:**

Son una clase de hidrocarburos cíclicos, no saturados, que tienen una estabilidad superior a las estructuras de cadena abierta con igual número de enlaces múltiples. <sup>(1)</sup>

**Biodiesel:**

Es un combustible comprendido por ésteres monoalquílicos de cadena larga de ácido grasos derivados de aceites de vegetales o de grasas animales, designado como B-100. <sup>(3)</sup>

**B-x:**

Se refiere a las mezclas de biodiesel. Es decir, una mezcla con 20% de biodiesel y 80% de diesel 2 se la denomina B-20. El biodiesel puro es el B-100.

**Catalizador:**

Es una sustancia que es capaz de acelerar o retardar una reacción química sin que este sea alterado. Este proceso se llama catálisis. Por catalizador también nos referimos a todo el aparato utilizado para la catálisis de los gases de escape. Los catalizadores no alteran el balance energético final de la reacción química, sino que sólo permiten que se alcance el equilibrio con mayor o menor velocidad.

**Ciclo de Prueba:**

Según la NTE INEN 2 207:2002, es una secuencia de operaciones estándar a las que es sometido un vehículo automotor o motor, para determinar el nivel de emisiones que produce. Para motores Diesel se utilizan los ciclos ECE-15+EUDC, el ECE-49 y el FTP-75.

**Ciclo ECE-15 + EUDC:**

Según la NTE INEN 2 207:2002 es el ciclo de prueba dinámico establecido por la Unión Europea para los vehículos livianos y medianos de gasolina o diesel.

**Ciclo ECE-49:**

Según la NTE INEN 2 207:2002 es el ciclo de prueba estacionario dinámico establecido por la Unión Europea para los vehículos pesados de diesel.

**Ciclo FTP-75:**

Según la NTE INEN 2 207:2002 es el ciclo de prueba dinámico establecido por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA), para los vehículos livianos y medianos de gasolina o diesel.

**Ciclo transiente pesado:**

Según la NTE INEN 2 207:2002 es el ciclo de prueba de estado transitorio establecido por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA), para la medición de emisiones de motores diesel y gasolina utilizados en vehículos pesados.

**Cenizas Sulfatadas:**

Según la ASTM D 6751 – 03<sup>a</sup>, es una medida de la cantidad de residuos de sólidos abrasivos, jabones metálicos solubles y residuos de catalizadores, así

como cualquier compuesto formado por cenizas que puede contribuir a la existencia de depósitos en los inyectores y en el sistema de combustible.

**Contenido de Fósforo:**

Según la ASTM D 6751 – 03<sup>a</sup>, se debe controlar la cantidad de fósforo para evitar posibles daños a los convertidores catalíticos.

**Corrosión en el Cobre:**

Según la ASTM D 6751 – 03<sup>a</sup>, es una medida de las posibles dificultades a causa de la presencia de cobre, latón o bronce en los elementos del sistema de combustible.

**D-x:**

Se refiere al tipo de combustible diesel. D-1 es para el Diesel 1 o Kerosén y de D-2 para el diesel 2.

**Estabilidad Oxidativa:**

Es la resistencia a la oxidación que presenta una sustancia. Resulta de importancia para el almacenamiento del combustible.

**Éster:**

Es un compuesto orgánico resultante de la sustitución de un átomo de hidrógeno de un ácido por un radical alcohol. El biodiesel es un éster formado a partir de la reacción entre ácidos grasos y un alcohol. <sup>(1)</sup>

**Gravedad Específica:**

Es el término utilizado para comparar la densidad de un líquido con relación a la densidad del agua, la cual es tomada como 1,0 a 60<sup>o</sup> Fahrenheit. <sup>(4)</sup>

**Hidrogenación:**

Es un proceso mediante el cual se adiciona hidrógeno a compuestos orgánicos no saturados. <sup>(1)</sup>

**Llama Difusa:**

Es una llama en la que el oxidante se combina con el combustible por difusión. Como resultado, la velocidad de la llama está limitada a la rata de difusión por

lo que, por lo general, la combustión produce una mayor cantidad de hollín que con una llama premezclada. <sup>(1)</sup>

#### **Material Particulado Total:**

Según la EPA, es la materia sólida o condensada que se puede recoger en un filtro apropiado, a una temperatura de 52 [°C] o menor. El PM es pequeño, aproximadamente de 2.5 micrones de diámetro. El material particulado incluye el hollín, hidrocarburos adsorbidos del combustible y del aceite de lubricación al igual que sulfatos, agua y materiales inorgánicos tales como los que se producen por la abrasión interna. Normalmente se la puede clasificar como la fracción orgánica soluble, la fracción volátil y carbón. El material particulado provoca irritación de ojos y del sistema respiratorio, asma, tumores bronquiales, interfieren en la fotosíntesis de las plantas, causan el ennegrecimiento de los edificios y bienes y potencian el efecto de otros contaminantes. <sup>(4, 5)</sup>

#### **NOx:**

Son emisiones reguladas y refieren al óxido nítrico (NO) y al dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) los cuales provocan irritación en los ojos nariz y bronquios y en grandes cantidades pueden causar edema y muerte. También afectan al crecimiento de las plantas y si se mezclan con agua pueden formar ácido nítrico y por lo tanto lluvia ácida. <sup>(5)</sup>

#### **Número Ácido:**

Para el biodiesel es un indicador de la cantidad de ácidos grasos libre. Este número puede ser alto debido a un proceso de manufactura defectuoso o también por degradación oxidativa. <sup>(3)</sup>

#### **Número de Cetano:**

Es una medida de la demora de la ignición de un combustible. Con números de cetano mayores, existe un menor intervalo de tiempo entre el momento que se produce la inyección y la ignición. Se desea que este tiempo sea el menor posible por lo que se prefieren números de cetano altos. <sup>(4)</sup>

#### **Número de Glicerina Libre:**

Es una medida de los residuos de glicerina en el combustible (ASTM D-6751).



**Número de Glicerina Total:**

Según la ASTM D-6751, es la suma de la glicerina libre y la porción de glicerina de cualquier grasa o aceite que no ha reaccionado o lo ha hecho parcialmente.

**Número de Goma:**

Es una medida de la formación de depósitos o de residuos. <sup>(4)</sup>

**Número de Yodo:**

Es una medida del grado de insaturación del combustible. <sup>(4)</sup>

**Opacidad:**

Según la NTE INEN 2 207:2002, es el grado de reducción de la intensidad de la luz visible que ocasiona una sustancia al pasar aquella a través de esta.

**Poder Calórico:**

Según la ASTM D 240, se llama poder calórico bruto a la cantidad de energía liberada cuando una unidad de masa de combustible es quemada en un volumen encerrado y los productos son gaseosos y agua condensada. Cuando el agua está en estado gaseoso, la energía liberada producto de la combustión se llama poder calórico neto.

**Polimerización:**

Es un proceso en el que se agrupan químicamente los monómeros (compuestos de bajo peso molecular) entre si, formando una macromolécula llamada polímero. <sup>(1)</sup>

**Proceso Adiabático:**

Es un proceso en el que no hay transferencia de calor entre diferentes sistemas termodinámicos, por lo que se asume que hay cero pérdidas.

**Prueba dinámica:**

Según la NTE INEN 2 207:2002 es la medición de emisiones que se realice con el vehículo o motor sobre un dinamómetro.

**Punto de Ebullición:**

Es la temperatura a la cual una sustancia empieza a cambiar de fase líquida a gaseosa.

**Punto de Fusión:**

Es la temperatura a la cual una sustancia empieza a cambiar de fase sólida a líquida

**Punto de Inflamación:**

Según la ASTM D-93, es la menor temperatura, corregida a una presión barométrica de una atmósfera, a la cual la muestra enciende al aplicarse una fuente de ignición bajo condiciones especificadas de prueba.

**Punto de Nebulización:**

Según la ASTM D-2500, es la temperatura a la cual la formación de cera es suficiente para empezar a tapar el filtro de combustible. Esta temperatura se la mide con la primera formación de cristales de cera a medida que el combustible es enfriado.

**Punto de Vertido:**

Según la ASTM D-97, es la temperatura a la que el combustible ya no puede ser bombeado.

**Residuos de Carbón:**

Según la ASTM D 6751-03<sup>a</sup>, es una medida de las tendencias del combustible a la deposición de carbón. Esta propiedad es considerada una aproximación pues no está directamente relacionada con los depósitos en el motor.

**SOx:**

Son emisiones reguladas y el principal es dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) el cual provoca irritación en los ojos, enfermedades ORL y respiratorias, corrosión en metales como el hierro y el zinc, y decoloración de las hojas de los vegetales. Adicionalmente, si se mezcla con el agua pueden formar ácido sulfúrico y por lo tanto lluvia ácida. <sup>(5)</sup>

**Temperatura de Destilación:**

La temperatura de destilación es aquella temperatura donde se logra separar un determinado compuesto de una mezcla mediante destilación. Para esto se aprovecha la existencia de componentes con distintos puntos de ebullición. <sup>(1)</sup>

**Tensión Superficial:**

Es la fuerza que produce efectos de tensión en la superficie de los líquidos causada por la cohesión intermolecular y por fuerzas de adhesión del líquido al sólido. <sup>(4)</sup>

**Transesterificación:**

Es un proceso químico en el cual se intercambia un grupo Alcoxi de un éster por otro alcohol. Estas reacciones son frecuentemente catalizadas mediante la adición de un ácido o una base. <sup>(1)</sup>

**Tx:**

Temperatura a la cual se obtiene el x% del volumen del destilado total. Por ejemplo en la T90 se obtiene el 90% de destilado.

**Viscosidad Cinemática:**

Según la ASTM D 445, es la resistencia de un fluido a fluir debido a la gravedad.

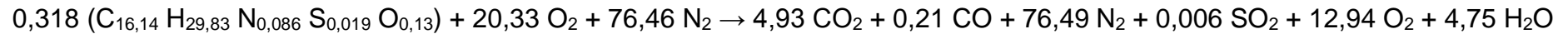
## **ANEXO B**

**ECUACIONES DE COMBUSTIÓN PARA EL DIESEL ECUATORIANO,  
COLOMBIANO Y SUS MEZCLAS**

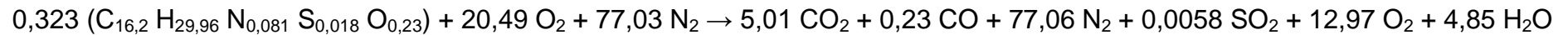
### Diesel Ecuatoriano



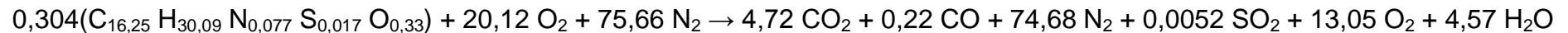
#### Mezcla al 5%



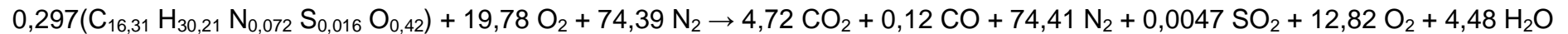
#### Mezcla al 10%



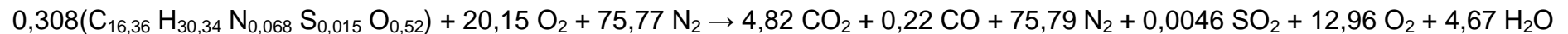
#### Mezcla al 15%



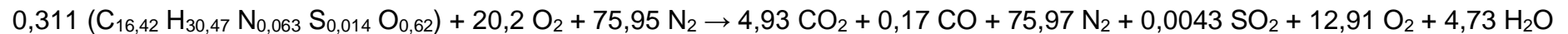
#### Mezcla al 20%



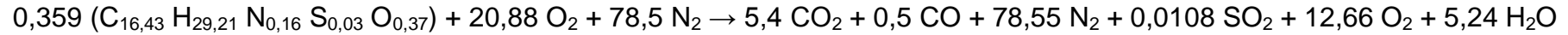
#### Mezcla al 25%



#### Mezcla al 30%



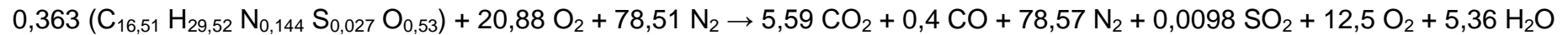
### Diesel Colombiano



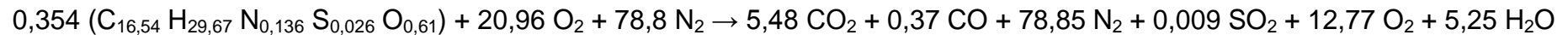
#### Mezcla al 5%



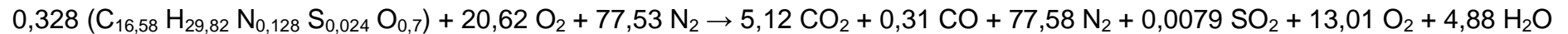
#### Mezcla al 10%



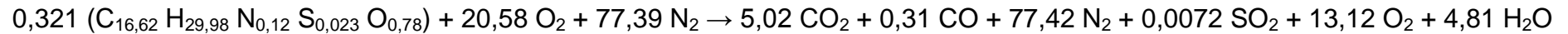
#### Mezcla al 15%



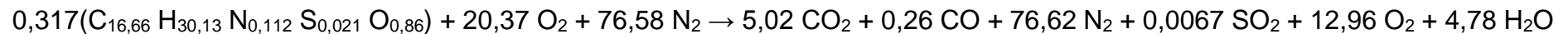
#### Mezcla al 20%



#### Mezcla al 25 %



#### Mezcla al 30 %



## ANEXO C

### HOJA DE DATOS TÉCNICOS DEL BANCO DE PRUEBAS PLINT TE-16 PERTENECIENTE AL LABORATORIO DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA DE LA CARRERA DE INGENIRÍA MECÁNICA LA ESPE

Equipo: Banco de pruebas con un motor de 30 [Hp]  
Serial No: TE - 16/5234  
Fecha de adquisición: 1980 – 06 – 13

#### MOTOR

Tipo: Petters PJ2W  
Motor No: 6606/PJ2WR  
Diámetro: 96,8 [mm]  
Carrera: 110 [mm]  
Cilindrada: 1620 [cm<sup>3</sup>]  
Relación de compresión: 17,5 : 1  
Velocidad máxima: 2100 [rpm]  
Diámetro del tubo de escape: 1,1 / 2" B.S.P  
Longitud del tubo de escape: 1 [m]  
Número de cilindros: 2

#### DINAMÓMETRO

Capacidad: 82 [A] @ 2000 [rpm] & 220 [V]  
Velocidad máxima: 3000 [rpm]  
Generador No: 57399/2  
Brazo de palanca (torque): 240 [mm]  
Altura del eje: 368 [mm]

#### SISTEMAS ADICIONALES

Refrigeración:

- Tanque de enfriamiento (radiador)
- Rotámetro (0 a 50 [L/min], ap.: 5 [L/min])
- Bomba de agua
- Termómetro de Hg (-10 a 90 [°C], ap.: 2 [°C])
- Termostato

Sistema de suministro de combustible:

- Tanque de almacenamiento
- Filtros de combustible
- Contenedor cilíndrico (200 [cm<sup>3</sup>])
- Bomba de inyección con 2 émbolos

Sistema de suministro de aire:

- Caja de aire (diám.= 610 x long.= 920 [mm])
- Placa orificio (diámetro = 39 [mm])
- Coeficiente de descarga = 0,6

#### INSTRUMENTOS ADICIONALES

Sensor de presión y de temperatura del aceite  
Tacómetro, cronómetro y contador de revoluciones  
Termómetro para los gases de escape (termocupla) (0 a 800 [°C], ap.: 20 [°C])  
Indicador de la caída de presión en la placa orificio.

## **ANEXO D**

**TABLAS DE DATOS DE LOS ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN  
REALIZADOS EN EL LABORATORIO DE PETRÓLEOS DE LA FACULTAD  
DE INGENIERÍA QUÍMICA DE LA UNIVERSIDAD CENTRAL**





**TABLA AD-1**  
**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS, FÍSICA Y MATEMÁTICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN**



**INFORME DE RESULTADOS**

Informe No: 07-03-01-P-15  
 Fecha: 2007-04-10

Atención: Sr. Oscar Yépez  
 Empresa: BELOWTHELINE TRE60  
 Dirección: Juan Gonzalez e Ignacio Santamaría  
 Tipo de ensayos: Físico Químicos  
 Tipo de muestra: COMBUSTIBLE  
 Identificación de la muestra: DIESEL-ECU-05-03-07  
 Descripción de la muestra: Envase plástico transparente.  
 Muestreado por: El Cliente  
 Fecha de ingreso de muestra: 06-03-2007  
 Código de la muestra: OE-07-03-01-P-15  
 Fecha de realización de ensayos: Del 7 de Marzo al 10 de Abril del 2007.

DETERMINACION	UNIDADES	NORMA	RESULTADO
Densidad API 60/60 °F	°API	ASTM D-287	36,3
Índice de cetano		ASTM D-976	51
Punto de inflamación	°C	ASTM D-93	59
Viscosidad cinemática a 100°F	cSt	ASTM D-445	2,89
Destilación ASTM			
PI			192
5			200
10			211
20			229
30			245
40			260
50	°C		276
60		PNE/DPEC/P/ASTMD86	287
70			307
80			324
90			346
95			361
PF			378
Volumen de destilado			98,8
Volumen de residuo	%V		0,8
Volumen de pérdida			0,4

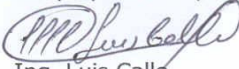
Nota: Incertidumbre de destilación ASTM

Unidad	°C													ml	
	Punto	PI	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	PF	Volumen destilado
± U (K=2)	6,7	5,0	4,0	4,5	4,2	5,3	5,5	5,4	4,9	5,3	6,0	7,0	7,3	0,69	0,81

Observaciones: Los datos de destilación están corregidos a presión atmosférica (760 mmHg).



ENSAYOS  
No OAE LE 2C 06-010

Revisado y Aprobado por  
  
 Ing. Luis Calle  
 RESPONSABLE TÉCNICO DEL DPEC



INFORMACIÓN: LOS RESULTADOS DE ESTE INFORME SE APLICAN SOLO A LAS MUESTRAS QUE EL CLIENTE A ENTREGADO AL DPEC.  
 ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS. SE PROHÍ LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE ESTE INFOFME SIN LA AUTORIZACIÓN ESCRITA DEL DPEC.

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gato Sobral Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 104 Fax: 2529676 E-mail: uiq.uc@andinanet.net  
 QUITO - ECUADOR

MC2201-P01-1

Hoja 1 de 1



**TABLA AD-1 CONTINUACIÓN**  
**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS, FÍSICA Y MATEMÁTICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN**




**INFORME DE RESULTADOS**

Informe No: 07-03-17-P-1  
 Fecha: 2007-04-16

Atención: Sr. Oscar Yépez  
 Empresa: BELOWTHELINE TRE60  
 Dirección: Juan Gonzalez e Ignacio Santamaría  
 Tipo de ensayos: Físico Químicos  
 Tipo de muestra: COMBUSTIBLE  
 Identificación de la muestra: DIESEL-ECU-05-03-07  
 Descripción de la muestra: Envase plástico transparente.  
 Muestreado por: El Cliente  
 Fecha de ingreso de muestra: 29-03-2007  
 Código de la muestra: OE-07-03-17-P-1  
 Fecha de realización de ensayos: Del 2 al 16 de Abril del 2007.

DETERMINACION	UNIDADES	NORMA	RESULTADO
Nitrógeno Total	%P	Método Interno	0,58
Azufre	%P	ASTM D-4294	0,2113
Poder Calórico Bruto*	Kcal/Kg	ASTM D-240	10427

Observaciones: \* Dato obtenido en la realización de la orden de trabajo N° OT-07-03-01-P, en la misma muestra.

Revisado y Aprobado por  
  
 Ing. Luis Calle  
 RESPONSABLE TÉCNICO DEL DPEC



INFORMACIÓN: LOS RESULTADOS DE ESTE INFORME SE APLICAN SOLO A LAS MUESTRAS QUE EL CLIENTE A ENTREGADO AL DPEC.  
 ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS. SE PROH  
 LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE ESTE INFOFME SIN LA AUTORIZACIÓN ESCRITA DEL DPEC.

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gato Sobral Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 104 Fax: 2529676 E-mail: uiq.uc@andinanet.n  
 QUITO - ECUADOR

MC2201-P01-1

Hoja 1 de

## TABLA AD-2



**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS, FÍSICA Y MATEMÁTICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
 DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



### INFORME DE RESULTADOS

Informe No: 07-03-01-P-1  
 Fecha: 2007-04-10

Atención: Sr. Oscar Yépez  
 Empresa: BELOWTHELINE TRE60  
 Dirección: Juan Gonzalez e Ignacio Santamaría  
 Tipo de ensayos: Físico Químicos  
 Tipo de muestra: COMBUSTIBLE  
 Identificación de la muestra: B5-ECU-05-03-07  
 Descripción de la muestra: Envase plástico transparente.  
 Muestreado por: El Cliente  
 Fecha de ingreso de muestra: 06-03-2007  
 Código de la muestra: OE-07-03-01-P-1  
 Fecha de realización de ensayos: Del 7 de Marzo al 10 de Abril del 2007.

DETERMINACION	UNIDADES	NORMA	RESULTADO	
Densidad API 60/60 °F	°API	ASTM D-287	35,8	
Índice de cetano		ASTM D-976	51	
Punto de inflamación	°C	ASTM D-93	61	
Viscosidad cinemática a 100°F	cSt	ASTM D-445	3,16	
Destilación ASTM				
PI			172	
5			196	
10			211	
20			230	
30			245	
40			262	
50	°C	PNE/DPEC/P/ASTMD86	277	
60			293	
70			309	
80			329	
90			354	
95			366	
PF			372	
Volumen de destilado				99,0
Volumen de residuo	%V			0,5
Volumen de pérdida				0,5

Nota: Incertidumbre de destilación ASTM

Unidad	°C												ml		
Punto	PI	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	PF	Volumen destilado	Volumen residuo
± U (K=2)	6,7	5,0	4,0	4,5	4,2	5,3	5,5	5,4	4,9	5,3	6,0	7,0	7,3	0,69	0,81

Observaciones: Los datos de destilación están corregidos a presión atmosférica (760 mmHg).



ENSAYOS  
No OAE LE 2C 06-010

Revisado y Aprobado por

*Luis Calle*

Ing. Luis Calle

RESPONSABLE TÉCNICO DEL DPEC



INFORMACIÓN: LOS RESULTADOS DE ESTE INFORME SE APLICAN SOLO A LAS MUESTRAS QUE EL CLIENTE A ENTREGADO AL DPEC.  
 ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS. SE PROHIBE LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE ESTE INFORME SIN LA AUTORIZACIÓN ESCRITA DEL DPEC.

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gato Sobral Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 104 Fax: 2529676 E-mail: uiq.uc@andinanet.net  
 QUITO - ECUADOR

MC2201-P01-1

Hoja 1 de 1



**TABLA AD-3**  
**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS, FÍSICA Y MATEMÁTICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN**



**INFORME DE RESULTADOS**

Informe No: 07-03-01-P-2  
 Fecha: 2007-04-10

Atención: Sr. Oscar Yépez  
 Empresa: BELOWTHELINE TRE60  
 Dirección: Juan Gonzalez e Ignacio Santamaría  
 Tipo de ensayos: Físico Químicos  
 Tipo de muestra: COMBUSTIBLE  
 Identificación de la muestra: B10-ECU-05-03-07  
 Descripción de la muestra: Envase plástico transparente.  
 Muestreado por: El Cliente  
 Fecha de ingreso de muestra: 06-03-2007  
 Código de la muestra: OE-07-03-01-P-2  
 Fecha de realización de ensayos: Del 7 de Marzo al 10 de Abril del 2007.

DETERMINACION	UNIDADES	NORMA	RESULTADO
Densidad API 60/60 °F	°API	ASTM D-287	35,9
Índice de cetano		ASTM D-976	53
Punto de inflamación	°C	ASTM D-93	59
Viscosidad cinemática a 100°F	cSt	ASTM D-445	3,46
Destilación ASTM			
PI			192
5			201
10			214
20			233
30			253
40			271
50	°C	PNE/DPEC/P/ASTMD86	288
60			303
70			323
80			344
90			359
95			368
PF			375
Volumen de destilado			98,8
Volumen de residuo	%V		0,6
Volumen de pérdida			0,6

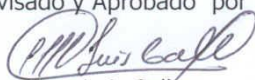
Nota: Incertidumbre de destilación ASTM

Unidad	°C													ml	
	Punto	PI	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	PF	Volumen destilado
± U (K=2)	6,7	5,0	4,0	4,5	4,2	5,3	5,5	5,4	4,9	5,3	6,0	7,0	7,3	0,69	0,81

Observaciones: Los datos de destilación están corregidos a presión atmosférica (760 mmHg).



ENSAYOS  
No OAE LE 2C 06-010

Revisado y Aprobado por  
  
 Ing. Luis Calle  
 RESPONSABLE TÉCNICO DEL DPEC



INFORMACIÓN: LOS RESULTADOS DE ESTE INFORME SE APLICAN SOLO A LAS MUESTRAS QUE EL CLIENTE A ENTREGADO AL DPEC.  
 ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS. SE PROHIE LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE ESTE INFOFME SIN LA AUTORIZACIÓN ESCRITA DEL DPEC.

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gato Sobral Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 104 Fax: 2529676 E-mail: uiq.uc@andinanet.net  
 QUITO - ECUADOR



**TABLA AD-4**  
**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS, FÍSICA Y MATEMÁTICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN**



**INFORME DE RESULTADOS**

Informe No: 07-03-01-P-3  
 Fecha: 2007-04-10

Atención: Sr. Oscar Yépez  
 Empresa: BELOWTHELINE TRE60  
 Dirección: Juan Gonzalez e Ignacio Santamaría  
 Tipo de ensayos: Físico Químicos  
 Tipo de muestra: COMBUSTIBLE  
 Identificación de la muestra: B15-ECU-05-03-07  
 Descripción de la muestra: Envase plástico transparente.  
 Muestreado por: El Cliente  
 Fecha de ingreso de muestra: 06-03-2007  
 Código de la muestra: OE-07-03-01-P-3  
 Fecha de realización de ensayos: Del 7 de Marzo al 10 de Abril del 2007.

DETERMINACION	UNIDADES	NORMA	RESULTADO	
Densidad API 60/60 °F	°API	ASTM D-287	34,3	
Indice de cetano		ASTM D-976	51	
Punto de inflamación	°C	ASTM D-93	59	
Viscosidad cinemática a 100°F	cSt	ASTM D-445	3,54	
Destilación ASTM				
PI			195	
5			206	
10			220	
20			235	
30			253	
40			273	
50	°C	PNE/DPEC/P/ASTMD86	292	
60			309	
70			330	
80			349	
90			363	
95			368	
PF			373	
Volumen de destilado				98,9
Volumen de residuo	%V			0,5
Volumen de pérdida				0,6

Nota: Incertidumbre de destilación ASTM

Unidad	°C													ml	
	Punto	PI	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	PF	Volumen destilado
± U (K=2)	6,7	5,0	4,0	4,5	4,2	5,3	5,5	5,4	4,9	5,3	6,0	7,0	7,3	0,69	0,81

Observaciones: Los datos de destilación están corregidos a presión atmosférica (760 mmHg).



ENSAYOS  
No OAE LE 2C 06-010

Revisado y Aprobado por

Ing. Luis Calle

RESPONSABLE TÉCNICO DEL DPEC



INFORMACIÓN: LOS RESULTADOS DE ESTE INFORME SE APLICAN SOLO A LAS MUESTRAS QUE EL CLIENTE A ENTREGADO AL DPEC.  
 ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS. SE PROHIBE LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE ESTE INFORME SIN LA AUTORIZACIÓN ESCRITA DEL DPEC.

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gato Sobral Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 104 Fax: 2529676 E-mail: uiq.uc@andinanet.net  
 QUITO - ECUADOR

MC2201-P01-1

Hoja 1 de 1



**TABLA AD-5**  
**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS, FÍSICA Y MATEMÁTICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN**



**INFORME DE RESULTADOS**

Informe No: 07-03-01-P-4  
 Fecha: 2007-04-10

Atención: Sr. Oscar Yépez  
 Empresa: BELOWTHELINE TRE60  
 Dirección: Juan Gonzalez e Ignacio Santamaría  
 Tipo de ensayos: Físico Químicos  
 Tipo de muestra: COMBUSTIBLE  
 Identificación de la muestra: B20-ECU-05-03-07  
 Descripción de la muestra: Envase plástico transparente.  
 Muestreado por: El Cliente  
 Fecha de ingreso de muestra: 06-03-2007  
 Código de la muestra: OE-07-03-01-P-4  
 Fecha de realización de ensayos: Del 7 de Marzo al 10 de Abril del 2007.

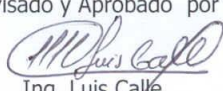
DETERMINACION	UNIDADES	NORMA	RESULTADO		
Densidad API 60/60 °F	°API	ASTM D-287	33,8		
Índice de cetano		ASTM D-976	51		
Punto de inflamación	°C	ASTM D-93	61		
Viscosidad cinemática a 100°F	cSt	ASTM D-445	3,83		
Destilación ASTM					
PI	°C	PNE/DPEC/P/ASTMD86	192		
5			205		
10			219		
20			235		
30			258		
40			278		
50			298		
60			318		
70			338		
80			349		
90			362		
95			370		
PF			374		
Volumen de destilado			%V		98,9
Volumen de residuo				0,5	
Volumen de pérdida	0,6				

Nota: Incertidumbre de destilación ASTM

Unidad	°C													ml	
	Punto	PI	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	PF	Volumen destilado
± U (K=2)	6,7	5,0	4,0	4,5	4,2	5,3	5,5	5,4	4,9	5,3	6,0	7,0	7,3	0,69	0,81

Observaciones: Los datos de destilación están corregidos a presión atmosférica (760 mmHg).



Revisado y Aprobado por  
  
 Ing. Luis Calle  
 RESPONSABLE TÉCNICO DEL DPEC



INFORMACIÓN: LOS RESULTADOS DE ESTE INFORME SE APLICAN SOLO A LAS MUESTRAS QUE EL CLIENTE A ENTREGADO AL DPEC.  
 ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS. SE PROHIBE LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE ESTE INFORME SIN LA AUTORIZACIÓN ESCRITA DEL DPEC.

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gato Sobral Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 104 Fax: 2529676 E-mail: uiq.uc@andinanet.net  
 QUITO - ECUADOR

MC2201-P01-1

Hoja 1 de 1



**TABLA AD-6**  
**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS, FÍSICA Y MATEMÁTICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN**



**INFORME DE RESULTADOS**

Informe No: 07-03-01-P-5  
 Fecha: 2007-04-10

Atención: Sr. Oscar Yépez  
 Empresa: BELOWTHELINE TRE60  
 Dirección: Juan Gonzalez e Ignacio Santamaría  
 Tipo de ensayos: Físico Químicos  
 Tipo de muestra: COMBUSTIBLE  
 Identificación de la muestra: B25-ECU-05-03-07  
 Descripción de la muestra: Envase plástico transparente.  
 Muestreado por: El Cliente  
 Fecha de ingreso de muestra: 06-03-2007  
 Código de la muestra: OE-07-03-01-P-5  
 Fecha de realización de ensayos: Del 7 de Marzo al 10 de Abril del 2007.

DETERMINACION	UNIDADES	NORMA	RESULTADO
Densidad API 60/60 °F	°API	ASTM D-287	32,8
Índice de cetano		ASTM D-976	50
Punto de inflamación	°C	ASTM D-93	59
Viscosidad cinemática a 100°F	cSt	ASTM D-445	4,12
Destilación ASTM			
PI			184
5			197
10			213
20			238
30			260
40			280
50	°C	PNE/DPEC/P/ASTMD86	302
60			324
70			339
80			345
90			353
PF			357
Volumen de destilado			96,2
Volumen de residuo	%V		3,0
Volumen de pérdida			0,8

Nota: Incertidumbre de destilación ASTM

Unidad	°C													ml	
Punto	PI	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	PF	Volumen destilado	Volumen residuo
± U (K=2)	6,7	5,0	4,0	4,5	4,2	5,3	5,5	5,4	4,9	5,3	6,0	7,0	7,3	0,69	0,81

Observaciones: Los datos de destilación están corregidos a presión atmosférica (760 mmHg). La muestra presenta punto de craqueo antes del 95 %V, sin embargo se recupera un 96,2 %V de destilado.



ENSAYOS  
No OAE LE 2C 06-010

Revisado y Aprobado por

*(Firma)*  
Ing. Luis Calle

RESPONSABLE TÉCNICO DEL DPEC



INFORMACIÓN: LOS RESULTADOS DE ESTE INFORME SE APLICAN SOLO A LAS MUESTRAS QUE EL CLIENTE A ENTREGADO AL DPEC.  
 ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS. SE PROHIB LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE ESTE INFORME SIN LA AUTORIZACIÓN ESCRITA DEL DPEC.

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gato Sobral Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 104 Fax: 2529676 E-mail: uiq.uc@andinanet.net  
 QUITO - ECUADOR

MC2201-P01-1

Hoja 1 de 1



**TABLA AD-7**  
**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS, FÍSICA Y MATEMÁTICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN**



**INFORME DE RESULTADOS**

Informe No: 07-03-01-P-6  
 Fecha: 2007-04-10

Atención: Sr. Oscar Yépez  
 Empresa: BELOWTHELINE TRE60  
 Dirección: Juan Gonzalez e Ignacio Santamaría  
 Tipo de ensayos: Físico Químicos  
 Tipo de muestra: COMBUSTIBLE  
 Identificación de la muestra: B30-ECU-05-03-07  
 Descripción de la muestra: Envase plástico transparente.  
 Muestreado por: El Cliente  
 Fecha de ingreso de muestra: 06-03-2007  
 Código de la muestra: OE-07-03-01-P-6  
 Fecha de realización de ensayos: Del 7 de Marzo al 10 de Abril del 2007.

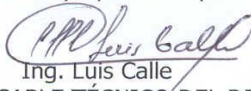
DETERMINACION	UNIDADES	NORMA	RESULTADO
Densidad API 60/60 °F	°API	ASTM D-287	32
Índice de cetano		ASTM D-976	50
Punto de inflamación	°C	ASTM D-93	59
Viscosidad cinemática a 100°F	cSt	ASTM D-445	4,71
Destilación ASTM			
PI			193
5			202
10			218
20			245
30			267
40			286
50			309
60			328
70			339
80			348
90			357
PF			361
Volumen de destilado			97,8
Volumen de residuo	%V		1,5
Volumen de pérdida			0,7

Nota: Incertidumbre de destilación ASTM

Unidad	°C													ml	
Punto	PI	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	PF	Volumen destilado	Volumen residuo
± U (K=2)	6,7	5,0	4,0	4,5	4,2	5,3	5,5	5,4	4,9	5,3	6,0	7,0	7,3	0,69	0,81

Observaciones: Los datos de destilación están corregidos a presión atmosférica (760 mmHg).



Revisado y Aprobado por  
  
 Ing. Luis Calle  
 RESPONSABLE TÉCNICO DEL DPEC



INFORMACIÓN: LOS RESULTADOS DE ESTE INFORME SE APLICAN SOLO A LAS MUESTRAS QUE EL CLIENTE A ENTREGADO AL DPEC.  
 ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS. SE PROHIBE LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE ESTE INFORME SIN LA AUTORIZACIÓN ESCRITA DEL DPEC.

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gato Sobral Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 104 Fax: 2529676 E-mail: uiq.uc@andinanet.net  
 QUITO - ECUADOR

MC2201-P01-1

Hoja 1 de 1



# TABLA AD-8



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR  
 FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS, FÍSICA Y MATEMÁTICA  
 ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
 DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



## INFORME DE RESULTADOS

Informe No: 07-03-01-P-13  
 Fecha: 2007-04-10

Atención: Sr. Oscar Yépez  
 Empresa: BELOWTHELINE TRE60  
 Dirección: Juan Gonzalez e Ignacio Santamaría  
 Tipo de ensayos: Físico Químicos  
 Tipo de muestra: COMBUSTIBLE  
 Identificación de la muestra: DIESEL-COL-05-03-07  
 Descripción de la muestra: Envase plástico transparente.  
 Muestreado por: El Cliente  
 Fecha de ingreso de muestra: 06-03-2007  
 Código de la muestra: OE-07-03-01-P-13  
 Fecha de realización de ensayos: Del 7 de Marzo al 10 de Abril del 2007.

DETERMINACION	UNIDADES	NORMA	RESULTADO
Densidad API 60/60 °F	°API	ASTM D-287	32,8
Índice de cetano		ASTM D-976	48
Punto de inflamación	°C	ASTM D-93	59
Viscosidad cinemática a 100°F	cSt	ASTM D-445	3,29
Destilación ASTM			
PI	°C	PNE/DPEC/P/ASTMD86	191
5			198
10			220
20			241
30			261
40			275
50			288
60			302
70			317
80			333
90			355
95			371
PF			387
Volumen de destilado			%V
Volumen de residuo	1,0		
Volumen de pérdida	0,6		

Nota: Incertidumbre de destilación ASTM

Unidad	°C													ml	
Punto	PI	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	PF	Volumen destilado	Volumen residuo
± U (K=2)	6,7	5,0	4,0	4,5	4,2	5,3	5,5	5,4	4,9	5,3	6,0	7,0	7,3	0,69	0,81

Observaciones: Los datos de destilación están corregidos a presión atmosférica (760 mmHg).



ENSAYOS  
 No OAE LE 2C 06-010

Revisado y Aprobado por  
  
 Ing. Luis Calle  
 RESPONSABLE TÉCNICO DEL DPEC



INFORMACIÓN: LOS RESULTADOS DE ESTE INFORME SE APLICAN SOLO A LAS MUESTRAS QUE EL CLIENTE A ENTREGADO AL DPEC.  
 ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS. SE PROHIBE LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE ESTE INFOFME SIN LA AUTORIZACIÓN ESCRITA DEL DPEC.

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gato Sobral Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 104 Fax: 2529676 E-mail: uiq.uc@andinanet.net  
 QUITO - ECUADOR

MC2201-P01-1

Hoja 1 de 1

# TABLA AD-8 CONTINUACIÓN



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS, FÍSICA Y MATEMÁTICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



## INFORME DE RESULTADOS

Informe No:	07-03-17-P-2
Fecha:	2007-04-16
Atención:	Sr. Oscar Yépez
Empresa:	BELOWTHELINE TRE60
Dirección:	Juan Gonzalez e Ignacio Santamaría
Tipo de ensayos:	Físico Químicos
Tipo de muestra:	COMBUSTIBLE
Identificación de la muestra:	DIESEL-COL-05-03-07
Descripción de la muestra:	Envase plástico transparente.
Muestreado por:	El Cliente
Fecha de ingreso de muestra:	29-03-2007
Código de la muestra:	OE-07-03-17-P-2
Fecha de realización de ensayos:	Del 2 al 16 de Abril del 2007.

DETERMINACION	UNIDADES	NORMA	RESULTADO
Nitrógeno Total	%P	Método Interno	0,951
Azufre	%P	ASTM D-4294	0,3673

Observaciones: ninguna.

Revisado y Aprobado por

X *Cesar A. Alvarado C.*  
Ing. Luis Calle

RESPONSABLE TÉCNICO DEL DPEC



INFORMACIÓN: LOS RESULTADOS DE ESTE INFORME SE APLICAN SOLO A LAS MUESTRAS QUE EL CLIENTE A ENTREGADO AL DPEC.  
ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS. SE PROHIBE LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE ESTE INFOFME SIN LA AUTORIZACIÓN ESCRITA DEL DPEC.

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gato Sobral Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 104 Fax: 2529676 E-mail: uiq.uc@andinanet.net  
QUITO - ECUADOR

MC2201-P01-1

Hoja 1 de 1

## TABLA AD-9



**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS, FÍSICA Y MATEMÁTICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
 DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



### INFORME DE RESULTADOS

Informe No: 07-03-01-P-7  
 Fecha: 2007-04-10

Atención: Sr. Oscar Yépez  
 Empresa: BELOWTHELINE TRE60  
 Dirección: Juan Gonzalez e Ignacio Santamaría  
 Tipo de ensayos: Físico Químicos  
 Tipo de muestra: COMBUSTIBLE  
 Identificación de la muestra: B5-COL-05-03-07  
 Descripción de la muestra: Envase plástico transparente.  
 Muestreado por: El Cliente  
 Fecha de ingreso de muestra: 06-03-2007  
 Código de la muestra: OE-07-03-01-P-7  
 Fecha de realización de ensayos: Del 7 de Marzo al 10 de Abril del 2007.

DETERMINACION	UNIDADES	NORMA	RESULTADO
Densidad API 60/60 °F	°API	ASTM D-287	32,4
Indice de cetano		ASTM D-976	48
Punto de inflamación	°C	ASTM D-93	61
Viscosidad cinemática a 100°F	cSt	ASTM D-445	3,12
Destilación ASTM			
PI			187
5			205
10			220
20			242
30			262
40			279
50			292
60			304
70			321
80			339
90			361
95			371
PF			374
Volumen de destilado			98,8
Volumen de residuo			0,7
Volumen de pérdida			0,5

Nota: Incertidumbre de destilación ASTM

Unidad	°C													ml	
	Punto	PI	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	PF	Volumen destilado
± U (K=2)	6,7	5,0	4,0	4,5	4,2	5,3	5,5	5,4	4,9	5,3	6,0	7,0	7,3	0,69	0,81

Observaciones: Los datos de destilación están corregidos a presión atmosférica (760 mmHg).



ENSAYOS  
No OAE LE 2C 06-010

Revisado y Aprobado por

*(Firma)*  
Ing. Luis Calle

RESPONSABLE TÉCNICO DEL DPEC



INFORMACIÓN: LOS RESULTADOS DE ESTE INFORME SE APLICAN SOLO A LAS MUESTRAS QUE EL CLIENTE A ENTREGADO AL DPEC.  
 ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS. SE PROHIBE LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE ESTE INFOFME SIN LA AUTORIZACIÓN ESCRITA DEL DPEC.

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gato Sobral Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 104 Fax: 2529676 E-mail: uiq.uc@andinanet.net  
 QUITO - ECUADOR

MC2201-P01-1

Hoja 1 de 1



**TABLA AD-10**  
**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS, FÍSICA Y MATEMÁTICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN**



**INFORME DE RESULTADOS**

Suplemento de Informe No: 07-03-01-P-8  
 Fecha: 2007-04-10

Atención: Sr. Oscar Yépez  
 Empresa: BELOWTHELINE TRE60  
 Dirección: Juan Gonzalez e Ignacio Santamaría  
 Tipo de ensayos: Físico Químicos  
 Tipo de muestra: COMBUSTIBLE  
 Identificación de la muestra: B10-COL-05-03-07  
 Descripción de la muestra: Envase plástico transparente.  
 Muestreado por: El Cliente  
 Fecha de ingreso de muestra: 06-03-2007  
 Código de la muestra: OE-07-03-01-P-8  
 Fecha de realización de ensayos: Del 7 de Marzo al 10 de Abril del 2007.

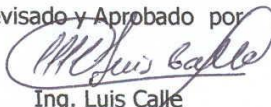
DETERMINACION	UNIDADES	NORMA	RESULTADO		
Densidad API 60/60 °F	°API	ASTM D-287	31,7		
Índice de cetano		ASTM D-976	48		
Punto de inflamación	°C	ASTM D-93	61		
Viscosidad cinemática a 100°F	cSt	ASTM D-445	3,55		
Destilación ASTM					
PI	°C	PNE/DPEC/P/ASTMD86	199		
5			207		
10			222		
20			246		
30			266		
40			283		
50			298		
60			314		
70			332		
80			350		
90			362		
PF			366		
Volumen de destilado			%V		98,6
Volumen de residuo				0,6	
Volumen de pérdida	0,8				

Nota: Incertidumbre de destilación ASTM

Unidad	°C													ml	
Punto	PI	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	PF	Volumen destilado	Volumen residuo
± U (K=2)	6,7	5,0	4,0	4,5	4,2	5,3	5,5	5,4	4,9	5,3	6,0	7,0	7,3	0,69	0,81

Observaciones: Los datos de destilación están corregidos a presión atmosférica (760 mmHg). La muestra presenta punto de craqueo antes del 95 %V, sin embargo se recupera un 98,6 %V de destilado.



Revisado y Aprobado por  
  
 Ing. Luis Calle  
 RESPONSABLE TÉCNICO DEL DPEC



INFORMACIÓN: LOS RESULTADOS DE ESTE INFORME SE APLICAN SOLO A LAS MUESTRAS QUE EL CLIENTE A ENTREGADO AL DPEC.  
 ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS. SE PROHIBE LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE ESTE INFOFME SIN LA AUTORIZACIÓN ESCRITA DEL DPEC.

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gato Sobral Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 104 Fax: 2529676 E-mail: uiq.uc@andinanet.net  
 QUITO - ECUADOR

MC2201-P01-1

Hoja 1 de 1



**TABLA AD-11**  
**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS, FÍSICA Y MATEMÁTICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN**



**INFORME DE RESULTADOS**

Informe No: 07-03-01-P-9  
 Fecha: 2007-04-10

Atención:	Sr. Oscar Yépez
Empresa:	BELOWTHELINE TRE60
Dirección:	Juan Gonzalez e Ignacio Santamaría
Tipo de ensayos:	Físico Químicos
Tipo de muestra:	COMBUSTIBLE
Identificación de la muestra:	B15-COL-05-03-07
Descripción de la muestra:	Envase plástico transparente.
Muestreado por:	El Cliente
Fecha de ingreso de muestra:	06-03-2007
Código de la muestra:	OE-07-03-01-P-9
Fecha de realización de ensayos:	Del 7 de Marzo al 10 de Abril del 2007.

DETERMINACION	UNIDADES	NORMA	RESULTADO	
Densidad API 60/60 °F	°API	ASTM D-287	31,2	
Índice de cetano		ASTM D-976	47	
Punto de inflamación	°C	ASTM D-93	61	
Viscosidad cinemática a 100°F	cSt	ASTM D-445	3,96	
Destilación ASTM				
PI			195	
5			207	
10			223	
20			245	
30			266	
40			285	
50	°C	PNE/DPEC/P/ASTMD86	301	
60			316	
70			335	
80			352	
90			361	
95			371	
PF			376	
Volumen de destilado				98,6
Volumen de residuo	%V			0,7
Volumen de pérdida				0,7

Nota: Incertidumbre de destilación ASTM

Unidad	°C													ml		
	Punto	PI	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	PF	Volumen destilado	Volumen residuo
± U (K=2)		6,7	5,0	4,0	4,5	4,2	5,3	5,5	5,4	4,9	5,3	6,0	7,0	7,3	0,69	0,81

Observaciones: Los datos de destilación están corregidos a presión atmosférica (760 mmHg).



ENSAYOS  
No OAE LE 2C 06-010

Revisado y Aprobado por

*Luis Calle*

Ing. Luis Calle

RESPONSABLE TÉCNICO DEL DPEC



INFORMACIÓN: LOS RESULTADOS DE ESTE INFORME SE APLICAN SOLO A LAS MUESTRAS QUE EL CLIENTE A ENTREGADO AL DPEC.  
 ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS. SE PROHIE LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE ESTE INFOFME SIN LA AUTORIZACIÓN ESCRITA DEL DPEC.

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gato Sobral Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 104 Fax: 2529676 E-mail: uiq.uc@andinanet.net  
 QUITO - ECUADOR

MC2201-P01-1

Hoja 1 de 1



**TABLA AD-12**  
**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS, FÍSICA Y MATEMÁTICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN**



**INFORME DE RESULTADOS**

Informe No: 07-03-01-P-10  
 Fecha: 2007-04-10

Atención: Sr. Oscar Yépez  
 Empresa: BELOWTHELINE TRE60  
 Dirección: Juan Gonzalez e Ignacio Santamaría  
 Tipo de ensayos: Físico Químicos  
 Tipo de muestra: COMBUSTIBLE  
 Identificación de la muestra: B20-COL-05-03-07  
 Descripción de la muestra: Envase plástico transparente.  
 Muestreado por: El Cliente  
 Fecha de ingreso de muestra: 06-03-2007  
 Código de la muestra: OE-07-03-01-P-10  
 Fecha de realización de ensayos: Del 7 de Marzo al 10 de Abril del 2007.

DETERMINACION	UNIDADES	NORMA	RESULTADO
Densidad API 60/60 °F	°API	ASTM D-287	31,3
Índice de cetano		ASTM D-976	48
Punto de inflamación	°C	ASTM D-93	61
Viscosidad cinemática a 100°F	cSt	ASTM D-445	4,21
Destilación ASTM			
PI			191
5			205
10			223
20			248
30			268
40			287
50	°C	PNE/DPEC/P/ASTMD86	302
60			320
70			337
80			347
90			355
95			359
PF			366
Volumen de destilado			98,8
Volumen de residuo	%V		0,5
Volumen de pérdida			0,7

Nota: Incertidumbre de destilación ASTM

Unidad	°C													ml	
	Punto	PI	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	PF	Volumen destilado
± U (K=2)	6,7	5,0	4,0	4,5	4,2	5,3	5,5	5,4	4,9	5,3	6,0	7,0	7,3	0,69	0,81

Observaciones: Los datos de destilación están corregidos a presión atmosférica (760 mmHg).



Revisado y Aprobado por  
  
 Ing. Luis Calle  
 RESPONSABLE TÉCNICO DEL DPEC



INFORMACIÓN: LOS RESULTADOS DE ESTE INFORME SE APLICAN SOLO A LAS MUESTRAS QUE EL CLIENTE A ENTREGADO AL DPEC.  
 ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS. SE PROHIBE LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE ESTE INFORME SIN LA AUTORIZACIÓN ESCRITA DEL DPEC.

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gato Sobral Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 104 Fax: 2529676 E-mail: uiq.uc@andinanet.net  
 QUITO - ECUADOR

MC2201-P01-1

Hoja 1 de 1

## TABLA AD-13



**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS, FÍSICA Y MATEMÁTICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
 DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



### INFORME DE RESULTADOS

Informe No: 07-03-01-P-11  
 Fecha: 2007-04-10

Atención:	Sr. Oscar Yépez
Empresa:	BELOWTHELINE TRE60
Dirección:	Juan Gonzalez e Ignacio Santamaría
Tipo de ensayos:	Físico Químicos
Tipo de muestra:	COMBUSTIBLE
Identificación de la muestra:	B25-COL-05-03-07
Descripción de la muestra:	Envase plástico transparente.
Muestreado por:	El Cliente
Fecha de ingreso de muestra:	06-03-2007
Código de la muestra:	OE-07-03-01-P-11
Fecha de realización de ensayos:	Del 7 de Marzo al 10 de Abril del 2007.

DETERMINACION	UNIDADES	NORMA	RESULTADO	
Densidad API 60/60 °F	°API	ASTM D-287	30,7	
Índice de cetano		ASTM D-976	48	
Punto de inflamación	°C	ASTM D-93	63	
Viscosidad cinemática a 100°F	cSt	ASTM D-445	4,68	
Destilación ASTM				
PI			197	
5			211	
10			232	
20			258	
30			279	
40			295	
50	°C	PNE/DPEC/P/ASTMD86	312	
60			330	
70			342	
80			352	
90			360	
95			364	
PF			369	
Volumen de destilado				98,3
Volumen de residuo	%V			1,3
Volumen de pérdida				0,4

Nota: Incertidumbre de destilación ASTM

Unidad	°C													ml	
	Punto	PI	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	PF	Volumen destilado
± U (K=2)	6,7	5,0	4,0	4,5	4,2	5,3	5,5	5,4	4,9	5,3	6,0	7,0	7,3	0,69	0,81

Observaciones: Los datos de destilación están corregidos a presión atmosférica (760 mmHg).



Revisado y Aprobado por  
  
 Ing. Luis Calle  
 RESPONSABLE TÉCNICO DEL DPEC



**INFORMACIÓN:** LOS RESULTADOS DE ESTE INFORME SE APLICAN SOLO A LAS MUESTRAS QUE EL CLIENTE A ENTREGADO AL DPEC.  
**ADVERTENCIA:** EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS. SE PROHIBE LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE ESTE INFORME SIN LA AUTORIZACIÓN ESCRITA DEL DPEC.

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gato Sobral Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 104 Fax: 2529676 E-mail: uiq.uc@andinanet.net  
 QUITO - ECUADOR

MC2201-P01-1

Hoja 1 de 1



**TABLA AD-14**  
**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS, FÍSICA Y MATEMÁTICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN**



**INFORME DE RESULTADOS**

Informe No: 07-03-01-P-12  
 Fecha: 2007-04-10

Atención: Sr. Oscar Yépez  
 Empresa: BELOWTHELINE TRE60  
 Dirección: Juan Gonzalez e Ignacio Santamaría  
 Tipo de ensayos: Físico Químicos  
 Tipo de muestra: COMBUSTIBLE  
 Identificación de la muestra: B30-COL-05-03-07  
 Descripción de la muestra: Envase plástico transparente.  
 Muestreado por: El Cliente  
 Fecha de ingreso de muestra: 06-03-2007  
 Código de la muestra: OE-07-03-01-P-12  
 Fecha de realización de ensayos: Del 7 de Marzo al 10 de Abril del 2007.

DETERMINACION	UNIDADES	NORMA	RESULTADO	
Densidad API 60/60 °F	°API	ASTM D-287	30,2	
Índice de cetano		ASTM D-976	48	
Punto de inflamación	°C	ASTM D-93	63	
Viscosidad cinemática a 100°F	cSt	ASTM D-445	5,32	
Destilación ASTM				
PI			197	
5			213	
10			233	
20			261	
30			281	
40	°C	PNE/DPEC/P/ASTMD86	300	
50			320	
60			334	
70			341	
80			348	
90			358	
PF			361	
Volumen de destilado				97,6
Volumen de residuo	%V			1,6
Volumen de pérdida				0,8

Nota: Incertidumbre de destilación ASTM

Unidad	°C													ml	
Punto	PI	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	PF	Volumen destilado	Volumen residuo
± U (K=2)	6,7	5,0	4,0	4,5	4,2	5,3	5,5	5,4	4,9	5,3	6,0	7,0	7,3	0,69	0,81

Observaciones: Los datos de destilación están corregidos a presión atmosférica (760 mmHg). La muestra presenta punto de craqueo antes del 95 %V, sin embargo se recupera un 97,6 %V de destilado.



ENSAYOS  
No OAE LE 2C 06-010

Revisado y Aprobado por

*Luis Calle*  
Ing. Luis Calle

RESPONSABLE TÉCNICO DEL DPEC



INFORMACIÓN: LOS RESULTADOS DE ESTE INFORME SE APLICAN SOLO A LAS MUESTRAS QUE EL CLIENTE A ENTREGADO AL DPEC.  
 ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS. SE PROHIBE LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE ESTE INFORME SIN LA AUTORIZACIÓN ESCRITA DEL DPEC.

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gato Sobral Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 104 Fax: 2529676 E-mail: uiq.uc@andinanet.net  
 QUITO - ECUADOR

MC2201-P01-1

Hoja 1 de 1

XXX





**TABLA AD-15**  
**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS, FÍSICA Y MATEMÁTICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN**



**INFORME DE RESULTADOS**

Informe No: 07-03-01-P-14  
 Fecha: 2007-04-10

Atención: Sr. Oscar Yépez  
 Empresa: BELOWTHELINE TRE60  
 Dirección: Juan Gonzalez e Ignacio Santamaría  
 Tipo de ensayos: Físico Químicos  
 Tipo de muestra: COMBUSTIBLE  
 Identificación de la muestra: PALMA-05-03-07  
 Descripción de la muestra: Envase plástico transparente.  
 Muestreado por: El Cliente  
 Fecha de ingreso de muestra: 06-03-2007  
 Código de la muestra: OE-07-03-01-P-14  
 Fecha de realización de ensayos: Del 7 de Marzo al 10 de Abril del 2007.

DETERMINACION	UNIDADES	NORMA	RESULTADO
Densidad API 60/60 °F	°API	ASTM D-287	23,6
Indice de cetano		ASTM D-976	40
Punto de inflamación	°C	ASTM D-93	--
Viscosidad cinemática a 100°F	cSt	ASTM D-445	30,19
Destilación ASTM			
PI	°C	PNE/DPEC/P/ASTMD86	310
5			316
10			323
20			329
30			332
40			335
50			338
60			344
PF			349
Volumen de destilado			%V
Volumen de residuo	3,2		
Volumen de pérdida	0,8		

Nota: Incertidumbre de destilación ASTM

Unidad	°C													ml	
	Punto	PI	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	PF	Volumen destilado
± U (K=2)	6,7	5,0	4,0	4,5	4,2	5,3	5,5	5,4	4,9	5,3	6,0	7,0	7,3	0,69	0,81

Observaciones: Los datos de destilación están corregidos a presión atmosférica (760 mmHg). La muestra presenta punto de craqueo antes del 80 %V, sin embargo se recupera un 96,0 %V de destilado.



ENSAYOS  
No OAE LE 2C 06-010

Revisado y Aprobado por

*Luis Calle*  
Ing. Luis Calle

RESPONSABLE TÉCNICO DEL DPEC

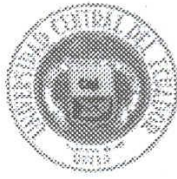


INFORMACIÓN: LOS RESULTADOS DE ESTE INFORME SE APLICAN SOLO A LAS MUESTRAS QUE EL CLIENTE A ENTREGADO AL DPEC.  
 ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS. SE PROHIBE LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE ESTE INFOFME SIN LA AUTORIZACIÓN ESCRITA DEL DPEC.

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gato Sobral Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 104 Fax: 2529676 E-mail: uiq.uc@andinanet.net  
 QUITO - ECUADOR

MC2201-P01-1

Hoja 1 de 1



**TABLA AD-16**  
**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS, FÍSICA Y MATEMÁTICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN**



**INFORME DE RESULTADOS**

Informe No: 07-03-01-P  
 Fecha: 2007-05-14

Atención: Sr. Oscar Yépez  
 Empresa: BELOWTHELINE TRE60  
 Dirección: Juan Gonzalez e Ignacio Santamaría  
 Tipo de ensayos: Físico Químicos  
 Tipo de la muestra: Muestras de Diesel y Aceite de palma  
 Descripción de la muestra: Contenidas en envases plasticos cerrados y membretados,  
 Fecha de ingreso de muestra: 06-03-2007  
 Fecha de realización de ensayos: Del 7 al 11 de Mayo del 2007

Código de ingreso	Tipo de muestra	MUESTRA	PUNTO DE NUBE	PUNTO DE VERTIDO
		UNIDAD	°C	°C
		NORMA	ASTM D-2500	ASTM D-97
OE-07-03-01-P-1	Diesel	B5-ECU (05-03-2007)	8	< -15
OE-07-03-01-P-2	Diesel	B10-ECU (05-03-2007)	8	< -15
OE-07-03-01-P-3	Diesel	B15-ECU (05-03-2007)	8	< -15
OE-07-03-01-P-4	Diesel	B20-ECU (05-03-2007)	8	< -15
OE-07-03-01-P-5	Diesel	B25-ECU (05-03-2007)	9	- 12
OE-07-03-01-P-6	Diesel	B30-ECU (05-03-2007)	9	- 11
OE-07-03-01-P-7	Diesel	B5-COL (05-03-2007)	8	-13
OE-07-03-01-P-8	Diesel	B10-COL (05-03-2007)	8	- 9
OE-07-03-01-P-9	Diesel	B15-COL (05-03-2007)	8	- 9
OE-07-03-01-P-10	Diesel	B20-COL (05-03-2007)	9	- 9
OE-07-03-01-P-11	Diesel	B25-COL (05-03-2007)	9	- 6
OE-07-03-01-P-12	Diesel	B30-COL (05-03-2007)	9	- 4
OE-07-03-01-P-13	Diesel	DIESEL COL (05-03-07)	4	- 15
OE-07-03-01-P-14	Diesel	PALMA (05-03-2007)	27	23
OE-07-03-01-P-15	Diesel	DIESEL ECU (05-02-07)	-5	< -15

Observaciones: Los resultados se encuentran corregidos a 60°F

Revisado y Aprobado por

Ing. Luis Calle  
 RESPONSABLE TÉCNICO DEL DPEC



INFORMACIÓN: LOS RESULTADOS DE ESTE INFORME SE APLICAN SOLO A LAS MUESTRAS QUE EL CLIENTE A ENTREGADO AL DPEC.  
 ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS.

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gato Sobral Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 104 Fax: 2529676 E-mail: uiq.uc@andinanet.net  
 QUITO - ECUADOR

MC2201-P01-1

Hoja 1 de 1

## **ANEXO E**

**TABLAS DE DATOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS DE RENDIMIENTO**

**Tabla AE-1** Datos de rendimiento para el diesel ecuatoriano

<b>N</b> <b>[rpm]</b>	<b>NT</b> <b>[rpm]</b>	<b>F</b> <b>[N]</b>	<b>Hg</b> <b>[mmH<sub>2</sub>O]</b>	<b>t</b> <b>[s]</b>	<b>Te</b> <b>[°C]</b>
1620	938	286	25,5	34,7	480
1660	950	287	27,0	34,3	490
1700	962	287	28,5	34,0	500
1740	985	288	30,0	33,9	510
1780	1074	281	31,5	36,3	510
1820	1491	229	34,0	49,2	450
1860	2492	119	38,0	80,4	320
1900	3469	57	41,0	109,7	240
1940	3973	28	43,0	122,8	200
1980	4326	7	44,5	131,1	190
2010	-	0	-	-	-

**Tabla AE-2** Datos de rendimiento para la mezcla al 5% de palma con diesel ecuatoriano

<b>N</b> <b>[rpm]</b>	<b>NT</b> <b>[rpm]</b>	<b>F</b> <b>[N]</b>	<b>Hg</b> <b>[mmH<sub>2</sub>O]</b>	<b>t</b> <b>[s]</b>	<b>Te</b> <b>[°C]</b>
1610	926	282	25,5	34,6	500
1650	943	283	27,0	34,3	500
1690	957	284	28,5	33,9	510
1730	969	284	29,5	33,7	510
1770	1028	281	31,0	34,8	520
1810	1341	250	33,0	44,5	470
1850	2193	141	36,5	71,1	360
1890	2992	70	39,5	95,1	250
1930	3548	35	42,5	110,2	200
1970	4051	9	44,0	123,4	180
2010	-	0	-	-	-

**Tabla AE-3** Datos de rendimiento para la mezcla al 10% de palma con diesel ecuatoriano

<b>N</b> <b>[rpm]</b>	<b>NT</b> <b>[rpm]</b>	<b>F</b> <b>[N]</b>	<b>Hg</b> <b>[mmH<sub>2</sub>O]</b>	<b>t</b> <b>[s]</b>	<b>Te</b> <b>[°C]</b>
1570	919	282	25,0	35,1	490
1610	931	281	26,0	34,7	500
1650	941	282	27,0	34,2	500
1690	951	283	28,5	33,8	500
1730	959	282	30,0	33,6	510
1770	1025	277	31,0	34,8	510
1810	1318	251	33,5	43,7	480
1850	2232	136	36,5	72,3	360
1890	2989	70	40,0	94,9	260
1930	3847	22	42,0	119,3	200
1970	4454	8	44,0	135,4	190
2010	-	0	-	-	-

**Tabla AE-4** Datos de rendimiento para la mezcla al 15% de palma con diesel ecuatoriano

<b>N [rpm]</b>	<b>NT [rpm]</b>	<b>F [N]</b>	<b>Hg [mmH<sub>2</sub>O]</b>	<b>t [s]</b>	<b>Te [°C]</b>
1600	930	278	26,0	34,8	500
1640	937	279	27,0	34,3	490
1680	945	279	28,5	33,8	500
1720	959	280	29,5	33,5	510
1760	994	279	31,0	33,8	520
1800	1221	258	32,5	40,8	490
1840	1893	169	36,0	61,8	400
1880	2632	90	40,0	84,0	270
1920	3749	30	42,0	117,3	200
1960	4417	6	43,5	135,0	180
1980	-	0	-	-	-

**Tabla AE-5** Datos de rendimiento para la mezcla al 20% de palma con diesel ecuatoriano

<b>N [rpm]</b>	<b>NT [rpm]</b>	<b>F [N]</b>	<b>Hg [mmH<sub>2</sub>O]</b>	<b>t [s]</b>	<b>Te [°C]</b>
1570	911	276	25,5	34,8	490
1610	924	276	26,5	34,5	500
1650	943	277	27,5	34,2	500
1690	953	277	28,5	33,8	510
1730	964	277	29,5	33,5	510
1770	989	273	31,5	33,6	520
1810	1247	254	33,5	41,4	490
1850	2063	150	37,0	66,9	380
1890	2908	73	40,5	92,3	260
1930	3776	24	43,0	117,5	200
1970	4227	5	44,5	128,7	180
1980	-	0	-	-	-

**Tabla AE-6** Datos de rendimiento para la mezcla al 25% de palma con diesel ecuatoriano

<b>N [rpm]</b>	<b>NT [rpm]</b>	<b>F [N]</b>	<b>Hg [mmH<sub>2</sub>O]</b>	<b>t [s]</b>	<b>Te [°C]</b>
1580	915	275	25,5	34,7	490
1620	929	276	26,5	34,4	500
1660	941	276	27,5	34,0	500
1700	954	276	28,5	33,7	510
1740	968	274	29,5	33,4	520
1780	1008	270	31,5	34,0	520
1820	1339	241	33,5	44,2	490
1860	2115	139	37,0	68,3	360
1900	2981	64	40,5	93,9	250
1940	3717	25	43,0	114,8	200
1980	4278	6	44,5	129,4	180
2020	-	0	-	-	-

**Tabla AE-7** Datos de rendimiento para la mezcla al 30% de palma con diesel ecuatoriano

<b>N</b> <b>[rpm]</b>	<b>NT</b> <b>[rpm]</b>	<b>F</b> <b>[N]</b>	<b>Hg</b> <b>[mmH<sub>2</sub>O]</b>	<b>t</b> <b>[s]</b>	<b>Te</b> <b>[°C]</b>
1580	910	273	25,5	34,5	500
1620	927	273	26,5	34,3	500
1660	939	274	27,5	33,9	510
1700	951	274	29,0	33,6	510
1740	967	273	30,5	33,3	520
1780	1028	266	32,0	34,6	520
1820	1346	235	34,0	44,4	480
1860	2242	131	37,5	72,5	370
1900	3093	57	40,5	97,7	240
1940	3677	25	43,0	113,8	200
1980	3961	6	44,5	119,8	190
2000	-	0	-	-	-

**Tabla AE-8** Datos de rendimiento para el diesel colombiano

<b>N</b> <b>[rpm]</b>	<b>NT</b> <b>[rpm]</b>	<b>F</b> <b>[N]</b>	<b>Hg</b> <b>[mmH<sub>2</sub>O]</b>	<b>t</b> <b>[s]</b>	<b>Te</b> <b>[°C]</b>
1620	926	287	26,5	34,3	490
1660	940	287	27,5	34,0	490
1700	953	288	28,5	33,6	500
1740	964	289	29,5	33,3	510
1780	1042	284	31,0	35,2	510
1820	1393	240	33,0	45,8	450
1860	2269	130	36,5	73,3	340
1900	3174	59	39,5	107,2	260
1940	3755	31	42,0	116,1	210
1980	4026	10	44,0	121,9	190
2010	-	0	-	-	-

**Tabla AE-9** Datos de rendimiento para la mezcla al 5% de palma con diesel colombiano

<b>N</b> <b>[rpm]</b>	<b>NT</b> <b>[rpm]</b>	<b>F</b> <b>[N]</b>	<b>Hg</b> <b>[mmH<sub>2</sub>O]</b>	<b>t</b> <b>[s]</b>	<b>Te</b> <b>[°C]</b>
1590	916	283	25,0	34,6	490
1630	931	283	26,0	34,3	490
1670	945	284	27,5	34,0	500
1710	958	285	29,0	33,7	500
1750	970	285	30,0	33,3	510
1790	1050	279	31,5	35,2	510
1830	1452	223	33,5	47,7	460
1870	2451	106	37,0	78,5	340
1910	3152	54	40,5	99,1	240
1950	3610	28	43,0	111,3	200
1990	4029	6	44,0	121,2	190
2020	-	0	-	-	-

**Tabla AE-10** Datos de rendimiento para la mezcla al 10% de palma con diesel colombiano

<b>N [rpm]</b>	<b>NT [rpm]</b>	<b>F [N]</b>	<b>Hg [mmH<sub>2</sub>O]</b>	<b>t [s]</b>	<b>Te [°C]</b>
1650	939	281	27,0	34,1	490
1690	951	282	28,5	33,8	500
1730	965	283	29,5	33,4	510
1770	983	282	30,5	33,4	510
1810	1244	252	32,0	41,2	490
1850	1886	164	35,0	61,2	400
1890	2751	81	38,5	87,4	290
1930	3382	36	41,0	105,2	210
1970	3879	16	43,0	118,2	190
2010	4126	5	45,0	123,1	180
2030	-	0	-	-	-

**Tabla AE-11** Datos de rendimiento para la mezcla al 15% de palma con diesel colombiano

<b>N [rpm]</b>	<b>NT [rpm]</b>	<b>F [N]</b>	<b>Hg [mmH<sub>2</sub>O]</b>	<b>t [s]</b>	<b>Te [°C]</b>
1610	906	281	26,0	33,7	490
1650	917	281	27,0	33,4	500
1690	937	282	28,5	33,2	500
1730	951	282	29,5	33,0	510
1770	1005	280	31,0	34,1	520
1810	1246	251	33,0	41,2	470
1850	1851	166	35,5	60,1	390
1890	2841	86	39,0	90,3	270
1930	3677	35	42,0	114,4	210
1970	3912	20	43,5	119,0	190
2010	4089	7	45,0	122,0	180
2040	-	0	-	-	-

**Tabla AE-12** Datos de rendimiento para la mezcla al 20% de palma con diesel colombiano

<b>N [rpm]</b>	<b>NT [rpm]</b>	<b>F [N]</b>	<b>Hg [mmH<sub>2</sub>O]</b>	<b>t [s]</b>	<b>Te [°C]</b>
1580	921	276	24,5	34,9	490
1620	928	276	25,5	34,4	490
1660	936	277	27,0	33,8	500
1700	945	277	28,0	33,3	500
1740	956	278	29,5	32,9	520
1780	1019	277	31,0	34,3	520
1820	1269	248	32,5	41,8	490
1860	2140	140	36,0	69,1	370
1900	2984	72	39,5	94,2	270
1940	3466	36	42,0	107,3	210
1980	4008	11	44,0	121,7	190
2040	-	0	-	-	-

**Tabla AE-13** Datos de rendimiento para la mezcla al 25% de palma con diesel colombiano

<b>N</b> <b>[rpm]</b>	<b>NT</b> <b>[rpm]</b>	<b>F</b> <b>[N]</b>	<b>Hg</b> <b>[mmH<sub>2</sub>O]</b>	<b>t</b> <b>[s]</b>	<b>Te</b> <b>[°C]</b>
1580	913	275	25,0	34,6	490
1620	919	275	26,0	34,0	500
1660	929	276	27,5	33,5	500
1700	938	276	28,5	33,1	510
1740	946	276	29,5	32,6	520
1780	1010	272	31,0	34,1	510
1820	1292	241	33,0	42,5	470
1860	2286	127	36,5	73,7	370
1900	3042	65	40,0	96,3	260
1940	3458	35	42,5	106,7	210
1980	3807	13	43,5	115,1	190
2020	-	0	-	-	-

**Tabla AE-14** Datos de rendimiento para la mezcla al 30% de palma con diesel colombiano

<b>N</b> <b>[rpm]</b>	<b>NT</b> <b>[rpm]</b>	<b>F</b> <b>[N]</b>	<b>Hg</b> <b>[mmH<sub>2</sub>O]</b>	<b>t</b> <b>[s]</b>	<b>Te</b> <b>[°C]</b>
1600	931	271	25,5	35,0	490
1640	937	271	26,5	34,3	500
1680	939	272	28,0	33,5	510
1720	944	272	29,5	32,9	510
1760	961	273	30,5	32,8	520
1800	1137	257	32,0	37,8	490
1840	1689	178	35,0	55,0	400
1880	2957	78	38,0	94,3	320
1920	3697	34	40,5	115,4	220
1960	4200	11	42,5	128,3	200
1990	-	0	-	-	-



## **ANEXO F**

### **TABLAS DE CÁLCULOS DE LOS PARÁMETROS DE DESEMPEÑO**

**Tabla AF-1** Parámetros de rendimiento para el diesel ecuatoriano

<b>N</b> <b>[rpm]</b>	<b>Tq</b> <b>[N-m]</b>	<b>Pf</b> <b>[Hp]</b>	<b>mc</b> <b>[Kg/h]</b>	<b>CEC</b> <b>[Kg/Kw-h]</b>	<b>ma</b> <b>[Kg/h]</b>	<b>A/C</b>	<b>ηt</b> <b>[%]</b>	<b>ηv</b> <b>[%]</b>
1620	90,95	20,68	4,37	0,284	55,69	12,73	27,18	76,89
1660	91,27	21,27	4,43	0,279	57,31	12,95	27,63	77,21
1700	91,27	21,78	4,46	0,275	58,88	13,19	28,05	77,46
1740	91,58	22,37	4,48	0,268	60,41	13,49	28,72	77,64
1780	89,36	22,33	4,18	0,251	61,90	14,80	30,70	77,77
1820	72,82	18,60	3,09	0,222	64,31	20,84	34,67	79,02
1860	37,84	9,88	1,89	0,256	67,98	36,01	30,09	81,75
1900	18,13	4,83	1,38	0,384	70,62	51,04	20,09	83,13
1940	8,90	2,42	1,24	0,683	72,32	58,51	11,28	83,37
1980	2,23	0,62	1,16	2,509	73,57	63,54	3,07	83,10
2010	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-

**Tabla AF-2** Parámetros de rendimiento para la mezcla al 5% con diesel ecuatoriano

<b>N</b> <b>[rpm]</b>	<b>Tq</b> <b>[N-m]</b>	<b>Pf</b> <b>[Hp]</b>	<b>mc</b> <b>[Kg/h]</b>	<b>CEC</b> <b>[Kg/Kw-h]</b>	<b>ma</b> <b>[Kg/h]</b>	<b>A/C</b>	<b>ηt</b> <b>[%]</b>	<b>ηv</b> <b>[%]</b>
1610	89,68	20,27	4,40	0,291	55,69	12,66	26,57	77,36
1650	89,99	20,84	4,44	0,285	57,31	12,91	27,09	77,68
1690	90,31	21,43	4,49	0,281	58,88	13,11	27,52	77,92
1730	90,31	21,93	4,52	0,276	59,90	13,26	28,00	77,44
1770	89,36	22,20	4,37	0,264	61,40	14,04	29,27	77,59
1810	79,50	20,20	3,42	0,227	63,35	18,52	34,06	78,28
1850	44,84	11,64	2,14	0,246	66,63	31,12	31,37	80,55
1890	22,26	5,91	1,60	0,363	69,31	43,30	21,28	82,02
1930	11,13	3,02	1,38	0,614	71,90	52,04	12,59	83,32
1970	2,86	0,79	1,23	2,090	73,16	59,30	3,70	83,05
2010	0	0	-	-	-	-	-	-

**Tabla AF-3** Parámetros de rendimiento para la mezcla al 10% con diesel ecuatoriano

<b>N</b> <b>[rpm]</b>	<b>Tq</b> <b>[N-m]</b>	<b>Pf</b> <b>[Hp]</b>	<b>mc</b> <b>[Kg/h]</b>	<b>CEC</b> <b>[Kg/Kw-h]</b>	<b>ma</b> <b>[Kg/h]</b>	<b>A/C</b>	<b>ηt</b> <b>[%]</b>	<b>ηv</b> <b>[%]</b>
1570	89,68	19,76	4,33	0,294	55,14	12,72	26,72	78,55
1610	89,36	20,20	4,38	0,291	56,23	12,83	27,00	78,12
1650	89,68	20,77	4,45	0,287	57,31	12,88	27,36	77,68
1690	89,99	21,35	4,50	0,283	58,88	13,08	27,80	77,92
1730	89,68	21,78	4,53	0,279	60,41	13,34	28,19	78,09
1770	88,09	21,89	4,37	0,268	61,40	14,04	29,34	77,59
1810	79,82	20,28	3,48	0,230	63,83	18,33	34,14	78,88
1850	43,25	11,23	2,10	0,251	66,63	31,66	31,28	80,55
1890	22,26	5,91	1,60	0,364	69,75	43,51	21,59	82,54
1930	7,00	1,90	1,28	0,902	71,47	56,04	8,71	82,83
1970	2,54	0,70	1,12	2,141	73,16	65,10	3,67	83,05
2010	0	0	-	-	-	-	-	-

**Tabla AF-4** Parámetros de rendimiento para la mezcla al 15% con diesel ecuatoriano

<b>N</b> <b>[rpm]</b>	<b>Tq</b> <b>[N-m]</b>	<b>Pf</b> <b>[Hp]</b>	<b>mc</b> <b>[Kg/h]</b>	<b>CEC</b> <b>[Kg/Kw-h]</b>	<b>ma</b> <b>[Kg/h]</b>	<b>A/C</b>	<b>ηt</b> <b>[%]</b>	<b>ηv</b> <b>[%]</b>
1600	88,40	19,86	4,41	0,298	56,23	12,74	26,62	78,61
1640	88,72	20,43	4,48	0,294	57,31	12,80	26,99	78,15
1680	88,72	20,92	4,54	0,291	58,88	12,95	27,25	78,38
1720	89,04	21,50	4,59	0,286	59,90	13,06	27,75	77,89
1760	88,72	21,92	4,54	0,278	61,40	13,51	28,55	78,03
1800	82,04	20,73	3,77	0,243	62,87	16,70	32,59	78,12
1840	53,74	13,88	2,49	0,240	66,17	26,62	33,05	80,43
1880	28,62	7,55	1,83	0,325	69,75	38,14	24,44	82,98
1920	9,54	2,57	1,31	0,683	71,47	54,58	11,62	83,26
1960	1,91	0,52	1,14	2,906	72,74	63,92	2,73	83,00
1980	0	0	-	-	-	-	-	-

**Tabla AF-5** Parámetros de rendimiento para la mezcla al 20% con diesel ecuatoriano

<b>N</b> <b>[rpm]</b>	<b>Tq</b> <b>[N-m]</b>	<b>Pf</b> <b>[Hp]</b>	<b>mc</b> <b>[Kg/h]</b>	<b>CEC</b> <b>[Kg/Kw-h]</b>	<b>ma</b> <b>[Kg/h]</b>	<b>A/C</b>	<b>ηt</b> <b>[%]</b>	<b>ηv</b> <b>[%]</b>
1570	87,77	19,34	4,43	0,307	55,69	12,58	25,69	79,34
1610	87,77	19,84	4,47	0,302	56,77	12,71	26,12	78,87
1650	88,09	20,40	4,51	0,296	57,83	12,84	26,63	78,39
1690	88,09	20,90	4,56	0,292	58,88	12,92	26,95	77,92
1730	88,09	21,39	4,60	0,288	60,41	13,13	27,35	78,09
1770	86,81	21,57	4,59	0,285	61,90	13,50	27,66	78,21
1810	80,77	20,52	3,72	0,243	63,83	17,15	32,42	78,88
1850	47,70	12,39	2,30	0,249	67,08	29,13	31,63	81,10
1890	23,21	6,16	1,67	0,363	70,19	42,04	21,69	83,05
1930	7,63	2,07	1,31	0,850	72,32	55,15	9,27	83,81
1970	1,59	0,44	1,20	3,650	73,57	61,45	2,16	83,52
1980	0	0	-	-	-	-	-	-

**Tabla AF-6** Parámetros de rendimiento para la mezcla al 25% con diesel ecuatoriano

<b>N</b> <b>[rpm]</b>	<b>Tq</b> <b>[N-m]</b>	<b>Pf</b> <b>[Hp]</b>	<b>mc</b> <b>[Kg/h]</b>	<b>CEC</b> <b>[Kg/Kw-h]</b>	<b>ma</b> <b>[Kg/h]</b>	<b>A/C</b>	<b>ηt</b> <b>[%]</b>	<b>ηv</b> <b>[%]</b>
1580	87,45	19,40	4,47	0,309	55,69	12,47	26,04	78,83
1620	87,77	19,96	4,51	0,303	56,77	12,60	26,56	78,38
1660	87,77	20,45	4,56	0,299	57,83	12,68	26,90	77,92
1700	87,77	20,94	4,60	0,294	58,88	12,80	27,31	77,46
1740	87,13	21,28	4,64	0,292	59,90	12,91	27,50	76,99
1780	85,86	21,45	4,56	0,285	61,90	13,58	28,22	77,77
1820	76,64	19,58	3,51	0,240	63,83	18,20	33,48	78,44
1860	44,20	11,54	2,27	0,264	67,08	29,56	30,49	80,66
1900	20,35	5,43	1,65	0,408	70,19	42,51	19,72	82,62
1940	7,95	2,17	1,35	0,836	72,32	53,56	9,61	83,37
1980	1,91	0,53	1,20	3,028	73,57	61,41	2,65	83,10
2020	0	0	-	-	-	-	-	-

**Tabla AF-7** Parámetros de rendimiento para la mezcla al 30% con diesel ecuatoriano

N [rpm]	Tq [N-m]	Pf [Hp]	mc [Kg/h]	CEC [Kg/Kw-h]	ma [Kg/h]	A/C	$\eta_t$ [%]	$\eta_v$ [%]
1580	86,81	19,25	4,52	0,314	55,69	12,33	26,09	78,83
1620	86,81	19,74	4,54	0,308	56,77	12,50	26,60	78,38
1660	87,13	20,30	4,60	0,303	57,83	12,59	27,03	77,92
1700	87,13	20,79	4,64	0,299	59,39	12,81	27,44	78,14
1740	86,81	21,20	4,68	0,296	60,91	13,02	27,73	78,29
1780	84,59	21,14	4,50	0,286	62,39	13,86	28,72	78,39
1820	74,73	19,09	3,51	0,246	64,31	18,33	33,30	79,02
1860	41,66	10,88	2,15	0,265	67,54	31,43	30,97	81,21
1900	18,13	4,83	1,59	0,442	70,19	44,02	18,55	82,62
1940	7,95	2,17	1,37	0,848	72,32	52,83	9,68	83,37
1980	1,91	0,53	1,30	3,287	73,57	56,58	2,50	83,10
2000	0	0	-	-	-	-	-	-

**Tabla AF-8** Parámetros de rendimiento para el diesel colombiano

N [rpm]	Tq [N-m]	Pf [Hp]	mc [Kg/h]	CEC [Kg/Kw-h]	ma [Kg/h]	A/C	$\eta_t$ [%]	$\eta_v$ [%]
1620	91,27	20,75	4,52	0,292	56,77	12,56	26,14	77,57
1660	91,27	21,27	4,56	0,287	57,83	12,68	26,55	77,16
1700	91,58	21,86	4,61	0,283	58,88	12,76	26,97	77,45
1740	91,90	22,45	4,66	0,278	59,90	12,87	27,45	77,68
1780	90,31	22,57	4,40	0,262	61,40	13,94	29,17	77,20
1820	76,32	19,50	3,38	0,233	63,35	18,72	32,79	77,34
1860	41,34	10,79	2,11	0,263	66,63	31,50	29,05	78,01
1900	18,76	5,00	1,45	0,387	69,31	47,93	19,70	80,23
1940	9,86	2,68	1,34	0,667	71,47	53,53	11,45	82,18
1980	3,18	0,88	1,27	1,929	73,16	57,53	3,96	82,95
2010	0	0	-	-	-	-	-	-

**Tabla AF-9** Parámetros de rendimiento para la mezcla al 5% con diesel colombiano

N [rpm]	Tq [N-m]	Pf [Hp]	mc [Kg/h]	CEC [Kg/Kw-h]	ma [Kg/h]	A/C	$\eta_t$ [%]	$\eta_v$ [%]
1590	89,99	20,09	4,46	0,298	55,14	12,35	25,86	77,57
1630	89,99	20,59	4,50	0,293	56,23	12,49	26,28	77,16
1670	90,31	21,17	4,54	0,288	57,83	12,73	26,78	77,45
1710	90,63	21,75	4,58	0,282	59,39	12,96	27,28	77,68
1750	90,63	22,26	4,64	0,279	60,41	13,02	27,58	77,20
1790	88,72	22,29	4,39	0,264	61,90	14,11	29,19	77,34
1830	70,91	18,22	3,24	0,238	63,83	19,71	32,33	78,01
1870	33,71	8,85	1,97	0,298	67,08	34,09	25,84	80,23
1910	17,17	4,60	1,56	0,454	70,19	45,03	16,97	82,18
1950	8,90	2,44	1,39	0,763	72,32	52,11	10,09	82,95
1990	1,91	0,53	1,27	3,205	73,16	57,40	2,40	82,22
2020	0	0	-	-	-	-	-	-

**Tabla AF-10** Parámetros de rendimiento para la mezcla al 10% con diesel colombiano

N [rpm]	Tq [N-m]	Pf [Hp]	mc [Kg/h]	CEC [Kg/Kw-h]	ma [Kg/h]	A/C	$\eta_t$ [%]	$\eta_v$ [%]
1650	89,36	20,70	4,58	0,296	57,31	12,52	26,15	77,68
1690	89,68	21,27	4,62	0,291	58,88	12,75	26,64	77,92
1730	89,99	21,85	4,67	0,287	59,90	12,82	27,05	77,44
1770	89,68	22,28	4,67	0,281	60,91	13,03	27,58	76,96
1810	80,14	20,36	3,79	0,249	62,39	16,47	31,08	77,09
1850	52,15	13,54	2,55	0,252	65,25	25,59	30,71	78,88
1890	25,76	6,83	1,79	0,350	68,43	38,32	22,13	80,98
1930	11,45	3,10	1,48	0,641	70,62	47,60	12,09	81,83
1970	5,09	1,41	1,32	1,258	72,32	54,77	6,16	82,10
2010	1,59	0,45	1,27	3,788	73,98	58,35	2,05	82,32
2030	0	0	-	-	-	-	-	-

**Tabla AF-11** Parámetros de rendimiento para la mezcla al 15% con diesel colombiano

N [rpm]	Tq [N-m]	Pf [Hp]	mc [Kg/h]	CEC [Kg/Kw-h]	ma [Kg/h]	A/C	$\eta_t$ [%]	$\eta_v$ [%]
1610	89,36	20,20	4,65	0,308	56,23	12,11	25,54	78,12
1650	89,36	20,70	4,69	0,304	57,31	12,23	25,95	77,68
1690	89,68	21,27	4,72	0,297	58,88	12,49	26,51	77,92
1730	89,68	21,78	4,74	0,292	59,90	12,63	26,97	77,44
1770	89,04	22,12	4,59	0,278	61,40	13,38	28,32	77,59
1810	79,82	20,28	3,80	0,251	63,35	16,67	31,36	78,28
1850	52,79	13,71	2,60	0,255	65,71	25,23	30,92	79,44
1890	27,35	7,26	1,73	0,320	68,87	39,73	24,59	81,50
1930	11,13	3,02	1,37	0,608	71,47	52,23	12,95	82,83
1970	6,36	1,76	1,32	1,003	72,74	55,29	7,86	82,58
2010	2,23	0,63	1,28	2,739	73,98	57,66	2,88	82,32
2040	0	0	-	-	-	-	-	-

**Tabla AF-12** Parámetros de rendimiento para la mezcla al 20% con diesel colombiano

N [rpm]	Tq [N-m]	Pf [Hp]	mc [Kg/h]	CEC [Kg/Kw-h]	ma [Kg/h]	A/C	$\eta_t$ [%]	$\eta_v$ [%]
1580	87,77	19,47	4,48	0,309	54,59	12,18	25,51	77,27
1620	87,77	19,96	4,55	0,305	55,69	12,25	25,79	76,89
1660	88,09	20,53	4,63	0,302	57,31	12,38	26,06	77,21
1700	88,09	21,02	4,70	0,300	58,36	12,42	26,29	76,78
1740	88,40	21,59	4,76	0,295	59,90	12,60	26,68	76,99
1780	88,09	22,01	4,56	0,278	61,40	13,46	28,35	77,15
1820	78,86	20,15	3,74	0,249	62,87	16,80	31,63	77,26
1860	44,52	11,62	2,26	0,261	66,17	29,23	30,17	79,57
1900	22,90	6,11	1,66	0,365	69,31	41,73	21,60	81,59
1940	11,45	3,12	1,46	0,627	71,47	49,02	12,56	82,40
1980	3,50	0,97	1,29	1,772	73,16	56,91	4,44	82,63
2040	0	0	-	-	-	-	-	-

**Tabla AF-13** Parámetros de rendimiento para la mezcla al 25% con diesel colombiano

N [rpm]	Tq [N-m]	Pf [Hp]	mc [Kg/h]	CEC [Kg/Kw-h]	ma [Kg/h]	A/C	$\eta_t$ [%]	$\eta_v$ [%]
1580	87,45	19,40	4,54	0,314	55,14	12,15	25,52	78,06
1620	87,45	19,89	4,62	0,311	56,23	12,18	25,71	77,64
1660	87,77	20,45	4,69	0,307	57,83	12,34	26,06	77,92
1700	87,77	20,94	4,74	0,304	58,88	12,41	26,36	77,46
1740	87,77	21,44	4,82	0,301	59,90	12,44	26,58	76,99
1780	86,50	21,61	4,60	0,286	61,40	13,33	28,03	77,15
1820	76,64	19,58	3,69	0,253	63,35	17,15	31,65	77,85
1860	40,39	10,54	2,13	0,271	66,63	31,27	29,55	80,12
1900	20,67	5,51	1,63	0,396	69,75	42,78	20,19	82,11
1940	11,13	3,03	1,47	0,651	71,90	48,85	12,30	82,89
1980	4,13	1,15	1,36	1,592	72,74	53,32	5,03	82,16
2020	0	0	-	-	-	-	-	-

**Tabla AF-14** Parámetros de rendimiento para la mezcla al 30% con diesel colombiano

N [rpm]	Tq [N-m]	Pf [Hp]	mc [Kg/h]	CEC [Kg/Kw-h]	ma [Kg/h]	A/C	$\eta_t$ [%]	$\eta_v$ [%]
1600	86,18	19,36	4,50	0,312	55,69	12,37	25,68	77,85
1640	86,18	19,84	4,59	0,310	56,77	12,36	25,80	77,42
1680	86,50	20,40	4,70	0,309	58,36	12,41	25,91	77,69
1720	86,50	20,88	4,79	0,307	59,90	12,51	26,05	77,89
1760	86,81	21,45	4,80	0,300	60,91	12,68	26,67	77,40
1800	81,73	20,65	4,17	0,270	62,39	14,97	29,59	77,52
1840	56,60	14,62	2,86	0,263	65,25	22,78	30,49	79,31
1880	24,80	6,55	1,67	0,342	67,98	40,70	23,40	80,88
1920	10,81	2,91	1,36	0,628	70,19	51,42	12,75	81,76
1960	3,50	0,96	1,23	1,710	71,90	58,56	4,68	82,04
1990	0	0	-	-	-	-	-	-

## **ANEXO G**

**TABLAS DE DATOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS DE EMISIONES**

**Tabla AG-1** Datos de emisiones para el diesel ecuatoriano

<b>N [rpm]</b>	<b>CO [%]</b>	<b>CO<sub>2</sub> [%]</b>	<b>O<sub>2</sub> [%]</b>	<b>THC [ppm]</b>	<b>NO<sub>x</sub> [ppm]</b>	<b>PM [mg/m<sup>3</sup>]</b>
1740	1,068	6,32	11,1	103	733	53,7
1780	0,586	6,66	10,2	181	1051	45,3
1840	0,001	5,94	11,3	156	1290	12,8
1900	0,012	3,78	14,9	160	616	8,7
1960	0,078	2,75	16,3	129	247	8,3

**Tabla AG-2** Datos de emisiones para la mezcla al 5% de palma con diesel ecuatoriano

<b>N [rpm]</b>	<b>CO [%]</b>	<b>CO<sub>2</sub> [%]</b>	<b>O<sub>2</sub> [%]</b>	<b>THC [ppm]</b>	<b>NO<sub>x</sub> [ppm]</b>	<b>PM [mg/m<sup>3</sup>]</b>
1745	0,842	5,82	10,9	263	690	53,3
1780	0,605	6,32	10,1	273	1043	44,5
1840	0,020	6,15	11,4	150	1378	13,5
1900	0,007	3,78	15,0	196	650	8,2
1960	0,047	2,43	17,0	170	295	6,5

**Tabla AG-3** Datos de emisiones para la mezcla al 10% de palma con diesel ecuatoriano

<b>N [rpm]</b>	<b>CO [%]</b>	<b>CO<sub>2</sub> [%]</b>	<b>O<sub>2</sub> [%]</b>	<b>THC [ppm]</b>	<b>NO<sub>x</sub> [ppm]</b>	<b>PM [mg/m<sup>3</sup>]</b>
1745	0,970	6,37	10,7	105	765	48,0
1780	0,655	6,73	10,1	194	1059	42,5
1840	0,001	5,89	11,9	222	1399	14,5
1900	0,005	3,74	14,9	226	699	8,4
1960	0,048	2,63	16,6	209	323	8,2

**Tabla AG-4** Datos de emisiones para la mezcla al 15% de palma con diesel ecuatoriano

<b>N [rpm]</b>	<b>CO [%]</b>	<b>CO<sub>2</sub> [%]</b>	<b>O<sub>2</sub> [%]</b>	<b>THC [ppm]</b>	<b>NO<sub>x</sub> [ppm]</b>	<b>PM [mg/m<sup>3</sup>]</b>
1750	0,855	5,73	10,6	291	738	50,5
1780	0,601	6,35	10,1	296	1029	42,8
1840	0,000	5,67	11,9	220	1294	11,8
1900	0,000	3,40	15,0	236	658	9,1
1960	0,097	2,60	17,0	133	263	9,0

**Tabla AG-5** Datos de emisiones para la mezcla al 20% de palma con diesel ecuatoriano

<b>N [rpm]</b>	<b>CO [%]</b>	<b>CO<sub>2</sub> [%]</b>	<b>O<sub>2</sub> [%]</b>	<b>THC [ppm]</b>	<b>NO<sub>x</sub> [ppm]</b>	<b>PM [mg/m<sup>3</sup>]</b>
1750	0,692	6,00	10,6	272	840	48,1
1780	0,288	5,76	10,2	372	1006	38,9
1840	0,000	5,91	11,5	205	1496	13,5
1900	0,000	3,60	14,8	218	722	8,1
1960	0,040	2,53	16,4	230	345	8,0



**Tabla AG-6** Datos de emisiones para la mezcla al 25% de palma con diesel ecuatoriano

<b>N</b> <b>[rpm]</b>	<b>CO</b> <b>[%]</b>	<b>CO<sub>2</sub></b> <b>[%]</b>	<b>O<sub>2</sub></b> <b>[%]</b>	<b>THC</b> <b>[ppm]</b>	<b>NO<sub>x</sub></b> <b>[ppm]</b>	<b>PM</b> <b>[mg/m<sup>3</sup>]</b>
1750	0,950	6,30	10,6	170	795	46,5
1780	0,665	6,22	10,4	258	974	40,8
1840	0,000	5,86	11,7	242	1439	13,9
1900	0,000	3,53	15,0	240	737	9,1
1960	0,023	2,60	16,3	194	378	9,3

**Tabla AG-7** Datos de emisiones para la mezcla al 30% de palma con diesel ecuatoriano

<b>N</b> <b>[rpm]</b>	<b>CO</b> <b>[%]</b>	<b>CO<sub>2</sub></b> <b>[%]</b>	<b>O<sub>2</sub></b> <b>[%]</b>	<b>THC</b> <b>[ppm]</b>	<b>NO<sub>x</sub></b> <b>[ppm]</b>	<b>PM</b> <b>[mg/m<sup>3</sup>]</b>
1750	0,648	5,69	10,7	255	801	47,4
1780	0,524	6,72	10,2	150	1095	40,9
1840	0,000	5,92	11,7	209	1410	11,9
1900	0,000	3,64	14,9	220	710	8,2
1960	0,014	2,55	16,2	159	385	8,7

**Tabla AG-8** Datos de emisiones para el diesel colombiano

<b>N</b> <b>[rpm]</b>	<b>CO</b> <b>[%]</b>	<b>CO<sub>2</sub></b> <b>[%]</b>	<b>O<sub>2</sub></b> <b>[%]</b>	<b>THC</b> <b>[ppm]</b>	<b>NO<sub>x</sub></b> <b>[ppm]</b>	<b>PM</b> <b>[mg/m<sup>3</sup>]</b>
1675	2,173	5,38	11,3	89	403	90,9
1780	1,477	5,92	11,0	93	580	71,8
1840	0,073	7,20	10,6	88	1588	25,3
1900	0,025	4,39	14,5	73	760	8,7
1960	0,060	3,18	16,1	92	399	8,2

**Tabla AG-9** Datos de emisiones para la mezcla al 5% de palma con diesel colombiano

<b>N</b> <b>[rpm]</b>	<b>CO</b> <b>[%]</b>	<b>CO<sub>2</sub></b> <b>[%]</b>	<b>O<sub>2</sub></b> <b>[%]</b>	<b>THC</b> <b>[ppm]</b>	<b>NO<sub>x</sub></b> <b>[ppm]</b>	<b>PM</b> <b>[mg/m<sup>3</sup>]</b>
1710	1,981	5,59	10,9	86	449	81,9
1780	1,319	6,16	10,8	80	682	67,3
1840	0,057	6,95	10,9	41	1605	22,0
1900	0,048	4,44	14,6	48	831	9,5
1960	0,064	3,45	16,0	35	462	8,5

**Tabla AG-10** Datos de emisiones para la mezcla al 10% de palma con diesel colombiano

<b>N</b> <b>[rpm]</b>	<b>CO</b> <b>[%]</b>	<b>CO<sub>2</sub></b> <b>[%]</b>	<b>O<sub>2</sub></b> <b>[%]</b>	<b>THC</b> <b>[ppm]</b>	<b>NO<sub>x</sub></b> <b>[ppm]</b>	<b>PM</b> <b>[mg/m<sup>3</sup>]</b>
1710	1,820	5,62	10,8	117	493	80,0
1780	1,110	6,17	10,9	101	730	61,8
1840	0,085	7,46	10,1	83	1690	26,3
1900	0,031	4,39	14,5	82	799	9,1
1960	0,097	3,42	16,2	28	415	9,2

**Tabla AG-11** Datos de emisiones para la mezcla al 15% de palma con diesel colombiano

<b>N</b> <b>[rpm]</b>	<b>CO</b> <b>[%]</b>	<b>CO<sub>2</sub></b> <b>[%]</b>	<b>O<sub>2</sub></b> <b>[%]</b>	<b>THC</b> <b>[ppm]</b>	<b>NO<sub>x</sub></b> <b>[ppm]</b>	<b>PM</b> <b>[mg/m<sup>3</sup>]</b>
1728	1,714	5,46	11,0	135	488	77,1
1780	0,990	6,49	10,9	81	784	58,0
1840	0,058	7,20	10,5	82	1698	22,1
1900	0,037	4,10	14,9	95	718	9,5
1960	0,124	3,18	16,5	74	351	9,6

**Tabla AG-12** Datos de emisiones para la mezcla al 20% de palma con diesel colombiano

<b>N</b> <b>[rpm]</b>	<b>CO</b> <b>[%]</b>	<b>CO<sub>2</sub></b> <b>[%]</b>	<b>O<sub>2</sub></b> <b>[%]</b>	<b>THC</b> <b>[ppm]</b>	<b>NO<sub>x</sub></b> <b>[ppm]</b>	<b>PM</b> <b>[mg/m<sup>3</sup>]</b>
1745	1,201	5,72	10,9	154	594	66,3
1780	0,860	6,12	10,7	120	837	54,3
1840	0,011	6,65	11,1	104	1595	20,5
1900	0,021	3,71	15,3	110	632	9,3
1960	0,102	3,19	16,6	43	354	9,8

**Tabla AG-13** Datos de emisiones para la mezcla al 25% de palma con diesel colombiano

<b>N</b> <b>[rpm]</b>	<b>CO</b> <b>[%]</b>	<b>CO<sub>2</sub></b> <b>[%]</b>	<b>O<sub>2</sub></b> <b>[%]</b>	<b>THC</b> <b>[ppm]</b>	<b>NO<sub>x</sub></b> <b>[ppm]</b>	<b>PM</b> <b>[mg/m<sup>3</sup>]</b>
1735	1,562	5,62	10,9	162	524	72,1
1780	0,922	6,10	10,8	160	811	55,9
1840	0,006	6,74	11,1	102	1623	18,6
1900	0,013	3,57	15,4	112	635	8,5
1960	0,094	2,68	17,0	79	269	11,4

**Tabla AG-14** Datos de emisiones para la mezcla al 30% de palma con diesel colombiano

<b>N</b> <b>[rpm]</b>	<b>CO</b> <b>[%]</b>	<b>CO<sub>2</sub></b> <b>[%]</b>	<b>O<sub>2</sub></b> <b>[%]</b>	<b>THC</b> <b>[ppm]</b>	<b>NO<sub>x</sub></b> <b>[ppm]</b>	<b>PM</b> <b>[mg/m<sup>3</sup>]</b>
1740	1,257	5,65	10,8	196	553	67,1
1780	0,733	6,22	10,7	108	881	48,5
1840	0,014	6,58	11,1	138	1558	15,4
1900	0,019	3,60	15,2	114	594	11,5
1960	0,062	2,73	16,5	148	338	10,5