



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO AUTOMOTRIZ**

**TEMA: CARACTERIZACIÓN Y UTILIZACIÓN DEL ACEITE
OBTENIDO DE LAS SEMILLAS DE GIRASOL PARA
DETERMINAR LOS PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO
DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA CICLO DIESEL EN
PROPORCIONES DE 2%, 5%, 10%, 15%, 25% Y 50% CUANDO
SE LO UTILIZA COMO BIOCOMBUSTIBLE.**

AUTOR: JOEL RUPERTO ASAS CHICAIZA

DIRECTOR: ING. GERMÁN ERAZO

LATACUNGA

2017



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**CARACTERIZACIÓN Y UTILIZACIÓN DEL ACEITE OBTENIDO DE LAS SEMILLAS DE GIRASOL PARA DETERMINAR LOS PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA CICLO DIESEL EN PROPORCIONES DE 2%, 5%, 10%, 15%, 25% Y 50% CUANDO SE LO UTILIZA COMO BIOCOMBUSTIBLE.**”, realizado por el señor **JOEL RUPERTO ASAS CHICAIZA**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor **JOEL RUPERTO ASAS CHICAIZA** para que lo sustente públicamente.

Latacunga, Febrero 2017

Ing. Erazo Laverde Washington Germán.

DIRECTOR



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo **JOEL RUPERTO ASAS CHICAIZA** con cédula de identidad N° 172111032-6 declaro que este trabajo de titulación **“CARACTERIZACIÓN Y UTILIZACIÓN DEL ACEITE OBTENIDO DE LAS SEMILLAS DE GIRASOL PARA DETERMINAR LOS PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA CICLO DIESEL EN PROPORCIONES DE 2%, 5%, 10%, 15%, 25% Y 50% CUANDO SE LO UTILIZA COMO BIOCOMBUSTIBLE.”** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada

Latacunga, Febrero 2017

Joel Ruperto Asas Chicaiza
C.C.: 172111032-6



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

AUTORIZACIÓN

Yo, **JOEL RUPERTO ASAS CHICAIZA**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación **“CARACTERIZACIÓN Y UTILIZACIÓN DEL ACEITE OBTENIDO DE LAS SEMILLAS DE GIRASOL PARA DETERMINAR LOS PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA CICLO DIESEL EN PROPORCIONES DE 2%, 5%, 10%, 15%, 25% Y 50% CUANDO SE LO UTILIZA COMO BIOCOMBUSTIBLE.”** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Latacunga, Febrero 2017

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Joel Ruperto Asas Chicaiza', is positioned above a horizontal line.

Joel Ruperto Asas Chicaiza
C.C.: 172111032-6

DEDICATORIA

Dedico este trabajo en primer lugar a Dios que siempre guía mi camino, a mi padre Ruperto Asas quien al principio de este proceso estuvo presente apoyándome pero ahora no se encuentra junto a mí para disfrutar de esta victoria juntos como él lo quería.

A mi madre María Chicaiza quien a pesar de todos los inconvenientes que sucedieron en nuestras vidas estuvo presente con sus palabras de aliento y apoyo incondicional para poder lograr mi objetivo.

A mis hermanos Esther, Jaime y Estefanía quienes nunca me abandonaron ni negaron cualquier tipo de apoyo que necesitara dándome su tiempo y atención en todo momento y en todo lugar.

Joel Asas.

AGRADECIMIENTOS

Mi más grande agradecimiento es a Dios quien fue mi roca fuerte en los momentos más difíciles y a quien nunca le perdí la fe, gracias por darme la vida y colmarla de bendiciones incluso en momentos cuando todo parecía perdido.

A mi padre Ruperto Asas quien lamentablemente ya no se encuentra presente, mi madre María Chicaiza y mis hermanas y hermano que estuvieron en todas las etapas de este proyecto solidarizándose con mi objetivo.

Agradezco a mi director de este proyecto de investigación Ing. Germán Erazo y al laboratorista Ing. José Naranjo quienes estuvieron presentes ayudándome con sus amplios conocimientos teóricos y técnicos dando el tiempo necesario para poder aclarar cualquier duda el momento en que era necesario.

Joel Asas.

ÍNDICE DE CONTENIDO.

PORTADA.....	i
CERTIFICACIÓN.....	II
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	III
AUTORIZACIÓN	IV
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTOS	VI
ÍNDICE DE CONTENIDO.	VII
ÍNDICE DE TABLAS	XII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIV
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	XVIII
RESUMEN.....	XX
ABSTRACT	XXI

CAPÍTULO I

1. MARCO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.....	1
1.1 Antecedentes.	1
1.2 Planteamiento del problema.....	2
1.3 Descripción resumida del proyecto.	3
1.4 Justificación e importancia.	5
1.5 Objetivos.	5
1.5.1 Objetivo general.	5
1.5.2 Objetivos específicos	5
1.6 Metas.....	6
1.6.1 Hipótesis.....	7
1.7 Operacionalización de variables.....	7
1.7.1 Variable independiente.....	7
1.7.2 Variable dependiente.	7
1.8 Metodología de la investigación.	8
1.8.1 Método inductivo	8
1.8.2 Método deductivo	9
1.8.3 Método analítico	9
1.8.4 Método experimental.....	9

1.8.5	Método comparativo.....	9
1.8.6	Método de medición.....	10
1.8.7	Método de matematización.....	10
1.8.8	Método estadístico y de probabilidades.....	10

CAPÍTULO II

2	MARCO TEÓRICO.....	13
2.1	Motor diésel.....	13
2.2	Comportamiento durante el ciclo.....	14
2.2.1	Admisión.....	14
2.2.2	Compresión.....	14
2.2.3	Explosión.....	15
2.2.4	Escape.....	15
2.3	Parámetros característicos.....	16
2.3.1	Velocidad.....	16
2.3.2	Torque o par motor.....	17
2.3.3	Potencia al freno.....	17
2.3.4	Caudal de combustible.....	18
2.3.5	Consumo másico de aire.....	18
2.3.6	Consumo másico de combustible.....	19
2.3.7	Relación aire-combustible.....	19
2.3.8	Consumo específico de combustible.....	20
2.3.9	Trabajo indicado por ciclo.....	20
2.3.10	Rendimiento mecánico.....	21
2.3.11	Consumo volumétrico de aire teórico.....	21
2.3.12	Presión media efectiva.....	22
2.3.13	Eficiencia térmica.....	22
2.3.14	Eficiencia volumétrica.....	23
2.4	Ciclo diesel.....	23
2.5	Diferencias entre motores diesel y otto.....	26
2.6	Diesel y sus propiedades.....	29
2.6.1	Índice de cetano.....	30
2.6.2	Porcentaje de azufre.....	30

2.6.3	Densidad API.	30
2.6.4	Viscosidad cinemática.	31
2.6.5	Volatilidad.	31
2.6.6	Poder calorífico	31
2.7	Biodiesel.	32
2.8	Materias primas para la obtención de biodiesel.	33
2.8.1	Aceites naturales.	34
2.8.2	Alcohol.	35
2.8.3	Catalizadores.	36
2.9	Reacción química para la obtención de biodiesel.	37
2.9.1	Transesterificación.	38
2.10	Procesos de postratamiento de biodiesel.	41
2.10.1	Separación de glicerina.	41
2.10.2	Lavado.	42
2.10.3	Secado.	43
2.10.4	Almacenamiento.	43
2.11	Ventajas y desventajas del biodiesel.	44
2.11.1	Ventajas.	44
2.11.2	Desventajas.	47
2.12	Biodiesel en Ecuador.	49
2.13	Biodiesel de girasol.	51
2.13.1	Situación de las plantaciones de girasol en Ecuador.	51
2.13.2	Características y ventajas respecto a productos similares.	52

CAPÍTULO III

3.	PROCESO DE OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL BODIESEL DE PRUEBA.	54
3.1	Materiales utilizados.	54
3.2	Normas de seguridad.	56
3.2.1	Implementación del área de trabajo.	56
3.2.2	Equipo de protección personal.	57
3.3	Obtención de biodiesel casero por medio de transesterificación.	59
3.3.1	Preparación del aceite.	59

3.3.2	Preparación del metóxido de sodio.	60
3.3.3	Proceso de transesterificación.	61
3.3.4	Separación de la glicerina.	62
3.3.5	Lavado.....	63
3.3.6	Obtención de las mezclas (B2, B5, B10, B15, B25, B50, B100).....	66
3.3.7	Obtención de densidades.....	68
3.4	Obtención del poder calorífico.....	70
3.4.1	Protocolo de uso para el calorímetro adiabático.	70
3.4.2	Obtención del PCI y PCS.	75
3.4.3	Cálculos: poder calorífico superior (PCS), inferior (PCI) y Neto (Q).....	78
3.5	Elección de muestras para pruebas de caracterización.	81
3.6	Ensayos de caracterización sometidos a las mezclas.....	82
3.6.1	Pruebas elegidas.....	82
3.6.2	Resultados obtenidos.....	83
3.6.3	Densidad API a 60°F.....	85
3.6.4	Viscosidad cinemática.....	86
3.6.5	Punto de inflamación.....	87
3.6.6	Sedimento básico y agua (%BSW).	88
3.6.7	Corrosión a la lámina de cobre.....	89
3.6.8	Índices de cetano calculado.	90

CAPÍTULO IV

4.	ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y TÉRMICAS DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA CICLO DIESEL CON EL USO DE BIOCOMBUSTIBLE.	94
4.1	Introducción.....	94
4.1.1	Elementos constitutivos.....	95
4.1.2	Protocolo de uso para el banco y el motor de pruebas.	99
4.2	Desempeño a velocidad variable y aceleración constante.....	101
4.3	Pruebas de opacidad de gases.....	108
4.3.1	Opacímetro.....	108
4.3.2	Protocolo de uso del opacímetro.....	109
4.3.3	Opacidad.....	110

4.4	Cálculo de parámetros mecánicos y térmicos.	112
4.4.1	Ejemplo de cálculo para obtención de valores requeridos.	114
4.4.2	Velocidad angular.	118
4.4.3	Torque.	119
4.4.4	Potencia al freno.	120
4.4.8	Consumo específico de combustible.	124
4.4.9	Presión media efectiva.	125
4.4.10	Eficiencia térmica.	126
4.4.11	Eficiencia volumétrica.	127

CAPÍTULO V

5.	MARCO ADMINISTRATIVO.	129
5.1	Generalidades.	129
5.2	Factibilidad del proyecto.	129
5.2.1	Recursos humanos.	132
5.2.2	Recursos materiales.	132
5.2.3	Recursos técnicos.	133
5.3	Costos de operación.	133
5.3.1	Costos directos.	133
5.3.2	Costos indirectos.	135
5.4	Financiamiento.	135
5.5	Costos de producción de las mezclas de biodiesel.	136
5.6	Elección de la muestra óptima como combustible alternativo.	138
5.7	Cronograma.	139
	CONCLUSIONES.	141
	RECOMENDACIONES.	144
	BIBLIOGRAFÍA.	146
	ANEXOS.	153

Anexo a: Informe de laboratorio, tipificación de aceite

Anexo b: Manual Gallempack, bomba calorimétrica

Anexo c: Características del opacímetro.

Anexo d: Informe de laboratorio, mezclas combustibles

Anexo e: Propuesta y estudio económico.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Operacionalización variable independiente (Biodiesel de aceite de girasol)	7
Tabla 2	Operacionalización de variable dependiente.	8
Tabla 3	Metodología, instrumentación y laboratorios.....	11
Tabla 4	Operatividad de biodiesel a bajas temperaturas.	34
Tabla 5	Características de operación de metanol y etanol	35
Tabla 6	Clasificación por el tipo de catalizador	36
Tabla 7	Composición de fases separadas.	41
Tabla 8	Demanda de diesel en Ecuador.....	49
Tabla 9	Características del aceite de colza y girasol y de sus esteres metílicos.....	52
Tabla 10	Cantidades de biodiesel requeridas para 4000 cc de muestra. ...	54
Tabla 11	Características del aceite de girasol recolectado.....	60
Tabla 12	Cantidades requeridas para muestras de 500cc.....	66
Tabla 13	Densidades de las muestras de combustible.....	69
Tabla 14	Características de la bomba calorimétrica	71
Tabla 15	Datos obtenidos de práctica de ácido benzoico.....	75
Tabla 16	Constantes en pruebas de poder calorífico.....	78
Tabla 17	Datos para ejemplo de cálculo de PCS, PCI y Q	78
Tabla 18	Variables de poder calorífico inferior.....	79
Tabla 19	Variables de poder calorífico superior.....	80
Tabla 20	Poder calorífico neto.	80
Tabla 21	Límites en especificación del biodiesel.	82
Tabla 22	Requisitos para el diesel	83
Tabla 23	Muestras renombradas.	84
Tabla 24	Caracterización de las muestras.	85
Tabla 25	Características del banco de pruebas.....	95
Tabla 26	Vueltas del cigüeñal en consumirse 25cc de muestra.	101
Tabla 27	Tiempo de consumo de 25cc de muestra.	102
Tabla 28	Datos para ejemplo de cálculo de velocidad real.....	103
Tabla 29	Velocidades reales calculadas.....	104

Tabla 30	Fuerzas obtenidas de pruebas realizadas en el motor.....	105
Tabla 31	Consumos másico de aire de pruebas realizadas en el motor...	106
Tabla 32	Temperaturas de gases de escape.....	107
Tabla 33	Características del opacímetro.	108
Tabla 34	Límites de opacidad para móviles.....	111
Tabla 35	Porcentajes de opacidad.....	111
Tabla 36	Datos para ejemplo de cálculo, ecuaciones de primer nivel.	114
Tabla 37	Datos para ejemplo de cálculo, ecuaciones de segundo nivel...	115
Tabla 38	Datos de velocidad angular calculados.....	118
Tabla 39	Datos de torque calculados.....	119
Tabla 40	Datos de potencia al freno.	120
Tabla 41	Datos calculados de caudal de combustible.	121
Tabla 42	Datos calculados de consumo másico de combustible.	122
Tabla 43	Datos calculados de relación aire-combustible.	123
Tabla 44	Datos calculados de consumo específico de combustible.	124
Tabla 45	Datos de presión media efectiva.	125
Tabla 46	Datos calculados de eficiencia térmica.	126
Tabla 47	Datos de eficiencia volumétrica.	127
Tabla 48	Recursos humanos	132
Tabla 49	Recursos materiales	132
Tabla 50	Recursos técnicos.....	133
Tabla 51	Costos directos del proyecto.....	134
Tabla 52	Costos indirectos del proyecto.	135
Tabla 53	Precios de obtención de muestras por galón.	137
Tabla 54	Comparativo de elección de muestra óptima.	138

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Árbol de planteamiento de los problemas.....	3
Figura 2: Diferencia volumétrica entre motor diesel y gasolina.....	13
Figura 3: Curvas características del motor.	16
Figura 4: Curva de relación p-v del ciclo diesel real.....	21
Figura 5: Comportamiento físico del motor diesel.....	24
Figura 6: Ciclo ideal modelar para motores de encendido por compresión.	25
Figura 7: Diagrama p-v para comparar los ciclos otto y diesel.....	28
Figura 8: Diagrama de refinamiento de petróleo.....	29
Figura 9: Transesterificación para biodiesel a partir de aceite.....	39
Figura 10: Proceso de producción de biodiesel transesterificación alcalina.....	40
Figura 11: Señales de advertencia para el transporte de biodiesel.	46
Figura 12: Dispensador de biodiesel B20 para Ecuador.....	50
Figura 13: Energía requerida por hectárea para 1000 kg de biodiesel.	53
Figura 14: Envases plásticos usados durante el proceso.	56
Figura 15: Sistema dispensador de aire.	56
Figura 16: Equipo de seguridad personal.	58
Figura 17: Revisión de la temperatura del aceite.....	60
Figura 18: Muestra de metóxido de sodio obtenido.	61
Figura 19: Aceite y metóxido antes de ser agitados.	62
Figura 20: Mezcla después del reposo.	62
Figura 21: Biodiesel y glicerina.	63
Figura 22: Muestra para prueba de calidad.	63
Figura 23: Emulsión de agua y biodiesel.	64
Figura 24: Agua y biodiesel listos para lavado.....	64
Figura 25: Recipiente tapado durante el lavado.....	65
Figura 26: Burbujas creadas por el sistema dispensador.	65
Figura 27: Volumen para prueba A.....	66
Figura 28: Volumen para prueba B.....	67
Figura 29: Volumen para prueba C.....	67

Figura 30: Volumen para prueba D.....	67
Figura 31: Volumen para prueba E.....	67
Figura 32: Volumen para prueba F.....	67
Figura 33: Cantidad de biodiesel en muestras de 3500 cc.....	68
Figura 34: Muestras de 500cc y 3500cc.....	68
Figura 35: Comparativo de densidades de muestras combustibles.....	69
Figura 36: Consola y bomba calorimétrica Gallempack.....	71
Figura 37: Peso de la muestra.....	72
Figura 38: Preparación de la muestras.....	72
Figura 39: Armado de la bomba de calor.....	72
Figura 40: Presurización de bomba de calor.....	73
Figura 41: Revisión de temperatura de agua de camisa externa.....	73
Figura 42: Prueba de correcto armado de la bomba.....	73
Figura 43: Sellado del calorímetro.....	74
Figura 44: Puesta en marcha del calorímetro.....	74
Figura 45: Lector/vibrador.....	74
Figura 46: Comparativo de poder calorífico neto entre muestras.....	81
Figura 47: Muestras enviadas al laboratorio.....	84
Figura 48: Comparativo de densidad API entre muestras.....	86
Figura 49: Comparativo de viscosidad cinemática entre muestras.....	87
Figura 50: Comparativo de punto de inflamación entre muestras.....	88
Figura 51: Comparativo de sedimento básico y agua entre muestras.....	89
Figura 52: Estándares de corrosión a la lámina de cobre ASTM.....	90
Figura 53: Ábaco para índice de cetano calculado.....	92
Figura 54: Comparativo del índice de cetano calculado entre muestras.....	93
Figura 55: Motor diesel de prueba.....	95
Figura 56: Panel de control.....	96
Figura 57: Generador eléctrico.....	96
Figura 58: Medidor de muestra de diesel.....	96
Figura 59: Contador electrónico.....	97
Figura 60: Tanque de combustible.....	97
Figura 61: Sensor MAF.....	97
Figura 62: Adaptación de sistema de escape.....	98

Figura 63: Tubo de escape hacia el exterior.....	98
Figura 64: Software TIA de recolección de datos.	98
Figura 65: Protectores de oídos.....	99
Figura 66: Medición de consumo de combustible.....	100
Figura 67: Datos obtenidos por el contador.....	100
Figura 68: Datos obtenidos por el software TIA.....	100
Figura 69: Comparativo de vueltas del cigüeñal a 3600 rpm entre las muestras.....	102
Figura 70: Comparativo de tiempo de consumo a 3600 rpm entre las muestras.....	103
Figura 71: Comparativo de velocidad real a 3600 rpm entre las muestras.....	105
Figura 72: Comparativo de fuerza a 3600 rpm entre las muestras.....	106
Figura 73: Comparativo de consumo másico de aire a 3600 rpm entre las muestras.....	107
Figura 74: Comparativo de temperatura de gases de escape a 3600 rpm entre las muestras.....	108
Figura 75: Opacímetro NEXTECH NDO-6000.....	109
Figura 76: Calibración del opacímetro.....	109
Figura 77: Sonda dentro del tubo de escape.....	110
Figura 78: Impresión de informe.....	110
Figura 79: Comparativo de opacidad entre muestras.....	112
Figura 80: Diagrama de fórmulas.....	113
Figura 81: Comparativo de velocidad angular entre muestras.....	119
Figura 82: Comparativo de torque entre muestras.....	120
Figura 83: Comparativo de torque entre muestras.....	121
Figura 84: Comparativo de torque entre muestras.....	122
Figura 85: Comparativo de consumo másico de combustible entre muestras.....	123
Figura 86: Comparativo de relación aire/combustible entre muestras.....	124
Figura 87: Comparativo de consumo específico de combustible entre muestras.....	125
Figura 88: Comparativo de presión media efectiva entre muestras.....	126

Figura 89: Comparativo de eficiencia térmica entre muestras.	127
Figura 90: Comparativo de eficiencia volumétrica entre muestras.....	128
Figura 91: Precios de diesel a nivel mundial.....	136
Figura 92: Porcentajes de variación de precios de biocombustibles.....	137
Figura 93: Cronograma de actividades.	140

ÍNDICE DE ECUACIONES.

Ecuación 1. Velocidad angular.....	16
Ecuación 2. Torque.....	17
Ecuación 3. Potencia al freno	17
Ecuación 4. Caudal de combustible.....	18
Ecuación 5. Consumo másico de aire.....	18
Ecuación 6. Consumo másico de combustible.....	19
Ecuación 7. Relación aire-combustible	20
Ecuación 8. Consumo específico de combustible.....	20
Ecuación 9. Trabajo del ciclo	20
Ecuación 10. Rendimiento mecánico.....	21
Ecuación 11. Consumo volumétrico de aire teórico	22
Ecuación 12. Presión media efectiva	22
Ecuación 13. Eficiencia térmica	23
Ecuación 14. Eficiencia volumétrica.....	23
Ecuación 15. Calor agregado al ciclo.....	26
Ecuación 16. Calor extraído del ciclo.....	26
Ecuación 17. Trabajo del ciclo en función del calor	26
Ecuación 18. Eficiencia térmica en función del trabajo del ciclo	26
Ecuación 19. Eficiencia térmica ciclo otto	26
Ecuación 20. Calor extraído del ciclo diesel	27
Ecuación 21. Eficiencia térmica del ciclo diesel.....	27
Ecuación 22. Densidad API	31
Ecuación 23. Cantidad de hidróxido necesaria para la investigación.	61
Ecuación 24. Densidad	68
Ecuación 25. Energía liberada del ácido benzoico	75
Ecuación 26. Variación de la temperatura	76
Ecuación 27. Capacidad calorífica del calorímetro	76
Ecuación 28. Energía liberada en función de la variación de la temperatura.	76
Ecuación 29. Calor específico.....	77

Ecuación 30. Calor específico en función de la capacidad calorífica del calorímetro.....	77
Ecuación 31. Viscosidad.....	86
Ecuación 32. Índice de cetano calculado.....	91
Ecuación 33. Ecuación de Sidney Young.....	91
Ecuación 34. Velocidad de giro real del cigüeñal.....	101

RESUMEN

La investigación trata sobre la caracterización del biodiesel de aceite de semillas de girasol obtenido de manera casera mediante pruebas con mezclas biodiesel en porcentajes de 2%, 5%, 10%, 15%, 25% y 50% determinando sus parámetros de funcionamiento mecánicos y térmicos en un motor diesel. El biodiesel se obtuvo con aceite de girasol caducado recolectado a través del proceso de transesterificación de manera casera en un área de trabajo que brindaba las facilidades para los procesos de: preparación del aceite con el catalizador, mezclado y lavado del biodiesel. Se realizaron las pruebas de caracterización de las propiedades químicas en el laboratorio para las mezclas B5, B10, B15 y B25 verificando el cumplimiento de las normas establecidas para el combustible diesel. Se realizaron las pruebas de desempeño mecánico para todas las mezclas incluyendo al diesel y al biodiesel en estado puro para tener límites de comparación, usando un motor diesel Petter AA1 de un banco de pruebas PLINT TE – 16 se obtuvo las lecturas de fuerza, flujo másico de aire, caudal de combustible y temperatura de gases de escape para trece rangos de velocidad establecidos, también se analizó el porcentaje de opacidad de los gases emanados de cada mezcla. Con los datos obtenidos de las pruebas en el motor se realizó los cálculos pertinentes para obtener los parámetros de desempeño térmico de las mezclas puestas a prueba para compararlos por medio de gráficas. Se analizó los resultados obtenidos durante la producción, medición de opacidad, caracterización química, desempeño mecánico y desempeño térmico para concluir cual es la mezcla óptima que sirva como un combustible alternativo al diesel.

PALABRAS CLAVE:

- **BIODIESEL**
- **TRANSESTERIFICACIÓN**
- **BIOCOMBUSTIBLES**
- **MOTORES DIESEL**

ABSTRACT

The investigation is about the characterization of biodiesel from sunflower seed oil obtained in a homemade way by testing with mixtures of biodiesel in percentages of 2%, 5%, 10%, 15%, 25% and 50% determining its mechanical and thermal operating parameters in a diesel engine. The biodiesel was obtained with expired sunflower oil collected by the transesterification process in a homemade way in a work area that provided the facilities for the processes of preparation of the oil with the catalyst, mixing and washing biodiesel. Chemical characterization tests were performed in the laboratory for mixtures B5, B10, B15 and B25 verifying compliance with established standards for diesel fuel. Mechanical performance tests were performed for all mixtures including diesel and biodiesel in the pure state to have comparison limits, using a Petter AA1 diesel engine from a PLINT TE-16 test bench, strength, mass airflow, Fuel flow and exhaust gas temperature to establish thirteen speed ranges, the percentage of opacity of the gases emanating from each mixture was also analyzed. With the data obtained from the tests in the engine, the relevant calculations were made to obtain the thermal performance parameters for the mixtures tested to compare them by means of statistical graphs. The results obtained during the production, measurement of opacity, chemical characterization, mechanical performance and thermal performance were analyzed to conclude which is the optimal mixture that serves as an alternative diesel fuel.

KEYWORDS:

- BIODIESEL.
- TRANSESTERIFICATION.
- BIOFUEL
- DIESEL ENGINE

CAPÍTULO I

1. MARCO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.

1.1 Antecedentes.

Desde la aparición del automóvil de motor de combustión interna como un medio de transporte el combustible hecho a base de hidrocarburos se ha convertido en su principal fuente de energía para el funcionamiento del motor, siendo los combustibles más usados la gasolina y el diesel.

Los gases generados de los combustibles utilizados por los motores de los automóviles son expulsados hacia el ambiente por medio del sistema de escape, estos gases tienen entre sus componentes más contaminantes: monóxido de carbono (CO), óxido de nitrógeno (NOx) e hidrocarburos no quemados (HC).

Bravo E. (2010) afirma “El exceso de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera produce una capa traslúcida, parecida a un invernadero que permite que la radiación solar entre al planeta, pero que no pueda salir durante la noche.” (pág. 16). Este efecto es también denominado efecto de invernadero, estudios epidemiológicos han mostrado que la exposición prolongada a este tipo de contaminantes puede causar enfermedades al sistema respiratorio.

En la misión de reducir las emisiones de gases contaminantes el sector automotriz ha llegado a la experimentación y creación de nuevas fuentes de energía que puedan ser usadas como combustibles alternativos, otra de las ventajas de estos nuevos combustibles es reducir la dependencia del diesel y la gasolina que son combustibles provenientes de yacimientos petroleros.

Ortiz (2010) afirma “Con objeto de reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera, causantes del efecto invernadero, se ha comenzado a utilizar

combustibles que llevan el prefijo bio, indica que tiene un origen vegetal por lo que no contribuyen a aumentar el efecto invernadero.” (pág. 28). Pero, aunque la elaboración de estos biocombustibles reduce la emisión de gases contaminantes, el mismo proceso de elaboración consume energía que evita la reducción total.

El biodiesel se obtiene de un proceso de transesterificación con el aceite obtenido de semillas oleaginosas mientras que el bioetanol son alcoholes obtenidos de la fermentación y destilación de cultivos ricos en azúcares. Ambos biocombustibles ya han sido empleados en motores de combustión interna sin necesidad de grandes cambios en el sistema de alimentación, el reto actual de los investigadores es encontrar cual es el producto natural más adecuado en características físicas, químicas y costos de producción.

1.2 Planteamiento del problema.

El uso de diesel como combustible para maquinaria pesada fue de gran ayuda durante el desarrollo de la industria, pero el uso de este fluido por varias décadas ha demostrado que conlleva efectos nocivos hacia el medio ambiente especialmente hacia la atmósfera, con el avance de la tecnología automotriz se ha logrado que el diesel también pueda ser usado como combustible en camionetas pequeñas y automóviles tipo turismo, esto solo ha servido para denotar más el problema ambiental que causa. Además que de la gran cantidad de automotores que usan el diesel como combustible ha ido aumentando con el paso del tiempo, esto ayuda a la creación de mayor cantidad de smog dentro de zonas urbanas y a su vez causa una dependencia del petróleo.

De la calidad del diesel que es utilizado en Ecuador, el grupo de investigación Marcelmid (2012) afirma “ Diesel Premium con un máximo de 500 partículas por millón (p.p.m) de contenido de azufre, destinado solo para el Distrito Metropolitano de Quito y Cuenca, con un máximo de 700 ppm de azufre

para el resto del país”, se puede saber que tan contaminantes son los gases que se generan durante su combustión y que tan alto es su grado de contaminación para el medio ambiente y para la salud.

En el Ecuador existen programas nacionales que generan biodiesel de varias fuentes de semillas oleoguminosas, están se llevan a cabo bajo la norma INEN 2 482:2009 en las plantas de elaboración de biocombustibles del programa ECOPAIS. La Figura 1 muestra las causas y posibles soluciones que conlleva el problema planteado.

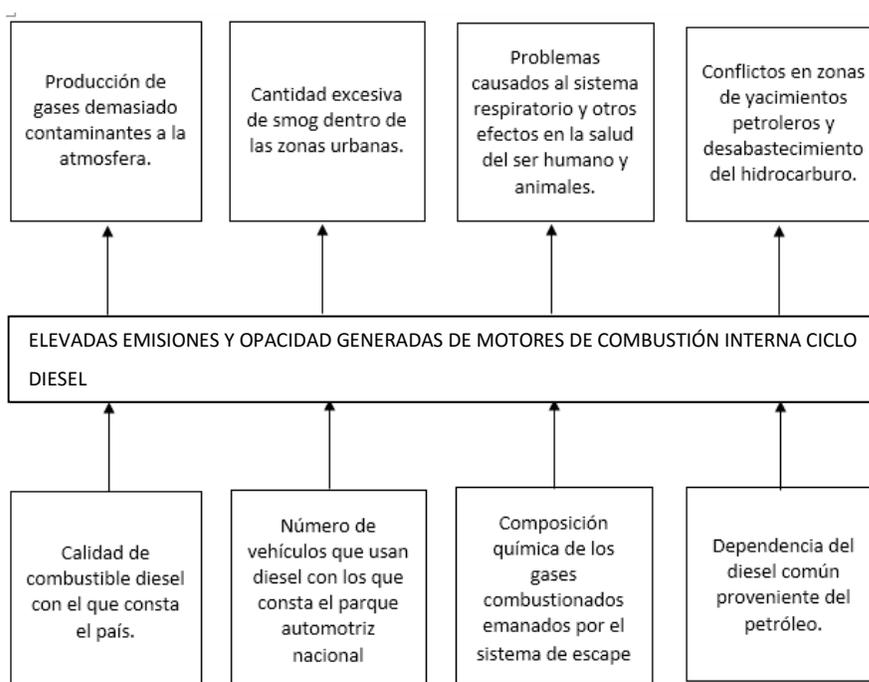


Figura 1: Árbol de planteamiento de los problemas.

1.3 Descripción resumida del proyecto.

La investigación consideró la recopilación de información de fuentes confiables de libros especializados en el tema y de páginas web certificadas.

La obtención de biodiesel de aceite de semillas de girasol se llevó a cabo en la ciudad de Quito, desde la adquisición de la materia prima, los compuestos químicos hasta el proceso de transesterificación que hizo de manera casera dentro de un área adaptada, todo el proceso se realizó bajo las normas de seguridad recomendadas de otros procesos caseros investigados en artículos o foros de la web. Para utilizar el biodiesel obtenido en sus diferentes mezclas se necesitó obtener un volumen mayor o igual a 10000 ml.

El biodiesel se mezcló con diesel premium en proporciones del: 2%, 5%, 10%, 15%, 25% y 50% ya establecidos en el tema de este proyecto, se preparó lotes de 6 litros de cada una de las mezclas para usarlos en las pruebas requeridas. Se envió el valor de 1 galón (3,8 litros) de cada mezclas hacia el Laboratorio de Motores de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE donde se realizó las pruebas de rendimiento en el motor de pruebas PLINT TE-16 bajo las condiciones de velocidad variable y aceleración constante. Para tener las mezclas de diesel-biodiesel se adquirió diesel Premium en un volumen de 25000 ml.

Obtenidos los resultados de las pruebas de rendimiento se elaboró un comparativo de todas las mezclas para saber cuáles se asemejan más al rendimiento del diesel. Se concluyó cuales convenían como alternativas al uso del diesel y se llevaron 2 litros de cuatro mezclas escogidas hacia el laboratorio de la facultad de química de la Universidad Central del Ecuador, allí se hizo ensayos para obtener sus características y saber si cumplían con la norma especificada para el combustible diesel.

Al obtener los resultados de las pruebas de caracterización se analizó de manera estadística las características de trabajo y las propiedades físico-químicas para deducir cuál de las mezclas serviría como combustible alternativo, también se tomó en cuenta aspectos como el costo de producción y la opacidad de los gases emanados.

1.4 Justificación e importancia.

Desde la aparición del automóvil como medio de transporte masivo la contaminación del ambiente ha aumentado significativamente siendo la contaminación atmosférica uno de los que mayor índice contiene, la emanación de gases contaminantes de automóviles que usan gasolina o diesel ha hecho necesario buscar nuevas alternativas de combustibles menos contaminantes.

La investigación se justifica en el hecho de usar a una de esas fuentes, como es el biodiesel de aceite de girasol, buscando que proporciones son las adecuadas en una mezcla diesel-biodiesel para usarse como combustible alternativo que favorezca en aspectos como rendimiento, emisión de gases, calidad de biocombustible y costos de producción.

Otra de las razones es dar continuidad a investigaciones previas tanto dentro como fuera del país y así poder cumplir con los objetivos del plan nacional del buen vivir 2013-2017: garantizar los derechos de la naturaleza junto a la sostenibilidad ambiental y asegurar la seguridad de los sectores estratégicos para la transformación industrial con visión a garantizar una fuente de trabajo digno.

1.5 Objetivos.

1.5.1 Objetivo general.

- Caracterizar el biodiesel obtenido del aceite de las semillas de girasol utilizado como combustible alternativo para reducir las emisiones contaminantes manteniendo los parámetros térmicos y mecánicos de funcionamiento del motor de combustión interna ciclo diesel.

1.5.2 Objetivos específicos

- Obtener información bibliográfica referente al tema en fuentes confiables.
- Llevar a cabo la obtención de un biodiesel de buena calidad de manera casera con materiales baratos de fácil adquisición y que no sean de grave riesgo para la salud
- Realizar pruebas químicas de laboratorio que me permitan caracterizar un biodiesel de aceite de girasol en proporciones de: 2%, 5%, 10%, 15%, 25% y 50%.
- Establecer los parámetros mecánicos comparativos del motor ciclo diesel cuando se trabaja con mezclas de diesel y biodiesel de aceite de girasol en proporciones de: 2%, 5%, 10%, 15%, 25% y 50%.
- Obtener resultados relevantes de funcionamiento del motor de combustión interna cuando trabaja con diesel comercial y biocombustible.
- Tabular los datos obtenidos durante la investigación para poder registrarlos y compararlos de manera estadística.

1.6 Metas.

- Obtener un combustible alternativo basado en los rendimientos de las mezclas porcentuales de 2%, 5%, 10%, 15%, 25% y 50%.
- Reducir los grados de contaminación al combustionarse el diesel común con el biocombustible elegido entre un 15% y 20%.

- Determinar cual es la mejor alternativa de entre todas las muestras para ser usada como combustible alternativo basándose en las pruebas de rendimiento y costes de producción del mismo.

1.6.1 Hipótesis.

¿El uso de combustibles alternativos como el biodiesel obtenido de aceite de semillas de girasol en un motor de combustión interna ciclo diesel permite mejorar los parámetros mecánicos y térmicos?

1.7 Operacionalización de variables.

1.7.1 Variable independiente.

Tabla 1
Operacionalización variable independiente (Biodiesel de aceite de girasol)

Concepto	Categorías	Indicadores	Ítem	Técnica	Instrumentos
<ul style="list-style-type: none"> • Combustible alternativo que se obtiene a través de Transesterificación del aceite de girasol y que puede ser usado en motores de ciclo diesel. 	Propiedades físicas y químicas	Densidad	kg/m^3	Medición	Norma PNE/DPEC/P/ASTM D-287
		Punto de inflamación	$^{\circ}C$	Medición	Norma PNE/DPEC/P/ASTM D-93
		Porcentaje de agua y Sedimentos	%	Medición	Norma ASTM D-4007
		Viscosidad cinemática.	mm^2/S	Medición	Norma PNE/DPEC/P/ASTM D-445
		Corrosión lámina de cobre	Código de colores	Medición	Norma PNE/DPEC/P/ASTM D-130
		Número de cetano.	Z	Medición	Protocolo de pruebas.

1.7.2 Variable dependiente.

Tabla 2
Operacionalización de variable dependiente.

Concepto	Categorías	Indicadores	Ítem	Técnica	Instrumentos
Datos obtenidos para evaluar y valorar el funcionamiento de un motor ciclo diesel usando biodiesel de aceite de girasol como combustible.	Rendimiento térmico y mecánico	Presión media efectiva	Kgf/cm^2	Medición	Protocolo de pruebas.
		Velocidad	RPM	Medición	Protocolo de pruebas
		Torque	Nm	Medición	Protocolo de pruebas
		Potencia	Kw	Medición	Protocolo de pruebas
		Caudal de aire	m^3/h	Medición	Protocolo de pruebas
		Flujo másico de aire	Kg/h	Medición	Protocolo de pruebas
		Flujo másico de combustible	Kg/h	Medición	Protocolo de pruebas
		Consumo específico de combustible	Kg/Kwh	Medición	Protocolo de pruebas
		Eficiencia térmica	%	Medición	Protocolo de pruebas
Gases producto del proceso de combustión del automóvil que son enviados al ambiente por el sistema de escape.	Contaminación	Opacidad	%	Medición	Protocolo de pruebas

1.8 Metodología de la investigación.

1.8.1 Método inductivo

La investigación partió desde la hipótesis con el objetivo de conseguir un combustible alternativo llegando a comparar los diferentes datos obtenidos por medio de la experimentación del uso del biodiesel como alternativa de biocombustible, después de hacer una clasificación y análisis de cada uno de

los datos obtenidos se puede concluir si la investigación cumplió con su objetivo.

1.8.2 Método deductivo

Según trabajos de investigación previos el biodiesel consta con más ventajas que el diesel común, esta investigación fue deductiva para analizar según resultados obtenidos de la experimentación si el uso del biodiesel mezclado con diesel en proporciones establecidas es una mejor opción de combustible alternativo al comercial.

1.8.3 Método analítico

Partiendo de que un biodiesel es una mejor opción al diesel obtenido de hidrocarburos la investigación fue analítica porque estudió cada una de las partes que comprenden la idea general de la misma, desde el uso de los datos obtenidos de ensayos de laboratorio que cumplan las normas INEN 2 482:2009 hasta el uso de fórmulas matemáticas con los datos obtenidos de las pruebas de cada una de las mezclas, concluyendo en que parámetros es una mejor alternativa.

1.8.4 Método experimental.

Por la cantidad de variables que se manipula, mide y controla por experimento de laboratorio desde la obtención del biodiesel de manera casera hasta las pruebas de rendimiento que se llevaron cabo en un banco de pruebas de un motor diesel y pruebas de caracterización en un laboratorio de química.

1.8.5 Método comparativo.

Las pruebas de rendimiento se llevaron a cabo con varios tipos de mezclas diésel-biodiésel en diferentes porcentajes, por lo cual se obtuvo diferentes datos en funcionamiento, costos e impacto ambiental.

1.8.6 Método de medición.

Fue de medición en las dimensiones de las variables de las pruebas llevadas a cabo, al momento de medir las propiedades del biocombustibles se lo hizo con las herramientas necesarias, al momento de medir el rendimiento se utilizaron las escalas de medida con las que consta el banco de pruebas.

1.8.7 Método de matematización.

Los resultados obtenidos de las pruebas de rendimiento debieron ser confirmados por cálculos realizados con el uso de fórmulas matemáticas, todos los resultados obtenidos y confirmados por medio de los cálculos pudieron ser representados gráficamente para mayor comprensión de los cambios obtenidos en: relación aire/combustible, consumo específico, eficiencias entre otros.

1.8.8 Método estadístico y de probabilidades.

Se depuró los datos y se crearon parámetros que denotaron si el trabajo de investigación llegó a cumplir su objetivo de encontrar una mejor alternativa al uso del diésel común y poder cambiarlo por una de las mezclas diésel-biodiésel que fueron puestas a prueba, para lo cual la muestra debió cumplir o mejorar los requisitos de funcionamiento dentro del motor y en variantes como el impacto ambiental y el costo de producción. En la Tabla 3 se muestra cuales fueron los instrumentos, equipos y laboratorios que fueron utilizados para llevar a cabo los métodos de investigación.

Tabla 3

Metodología, instrumentación y laboratorios.

Táctica/Método	Descripción	Instrumento/Equipo	Laboratorio
Método Inductivo	Conseguir un combustible alternativo llegando a comparar los datos obtenidos de la experimentación del uso del biodiesel.	Banco de pruebas PLINT –TE46	Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE Matriz.
Método deductivo	Analiza según resultados obtenidos del uso de biodiesel en mezclas con el diesel y el biodiesel obtenido de aceite de girasol.	Banco de pruebas PLINT –TE46	Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE Matriz.
Método analítico.	Estudia cada una de las partes que comprenden la idea general de la misma para concluir si el uso del biodiesel es una mejor alternativa y en que parámetros.	Equipos de medición para ensayo de propiedades de fluidos. Banco de pruebas PLINT –TE46	Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE Matriz. Laboratorio de Química Universidad Central del Ecuador.
Método experimental.	Manipula, mide y controlara una cantidad de variables causadas desde la obtención del biodiesel hasta las pruebas de rendimiento.	Banco de pruebas PLINT –TE46 Calorímetro Gallpack CB 100, CB 200.	Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE Matriz.
Método comparativo.	Las pruebas de rendimiento se llevaron a cabo con varios porcentajes de mezclas diésel-biodiesel obteniendo diferentes datos para comparar funcionamiento, costos, impacto ambiental entre otros.	Equipos de medición para ensayo de propiedades de fluidos. Diesel comercial ecuatoriano. Aceite de girasol Mezclas diesel-biodiesel	Laboratorio de la facultad de Química Universidad Central del Ecuador.
Método de medición.	Mide en las dimensiones de las variables de las pruebas llevadas a cabo las propiedades del biocombustibles y de rendimiento en el banco de pruebas.	Banco de pruebas PLINT –TE16 Opacímetro, Marca NEXTECH NDO-6000	Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE Matriz.

CONTINÚA 

Método de matematización.	Los resultados obtenidos fueron confirmados por los cálculos realizados con el uso de fórmulas matemáticas y representaciones gráficas.	Laptop
Método estadístico y de probabilidades.	Se depura los datos y se crearon parámetros que denotaron si el trabajo de investigación llegó a cumplir su objetivo de encontrar una mejor alternativa al uso del diésel común.	Laptop

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO.

2.1 Motor diésel.

Gil. H (2003) afirma “Los motores de combustión interna pueden ser, según el tipo de combustible, motores de explosión o gasolina y motores de diesel o de gasóleo” (pág. 17). Los del primer tipo son usados en vehículos turismo mientras que los del segundo tipo son usados en vehículos de trabajo pesado. La diferencia más relevante radica en que los motores diesel no necesitan de una fuente de calor para crear la combustión debido a que el ciclo termodinámico en el que se solventa difiere del ciclo Otto.

Aunque los motores diesel sean similares a los de gasolina existen diferencias que lo hacen ver más grande y robusto, estos elementos constitutivos tiene el objetivo de dar un mayor rendimiento utilizando como combustible el diesel debido a que su relación de compresión es mucho más elevada.



Figura 2: Diferencia volumétrica entre motor diesel y gasolina.

Fuente: (SsangYong, 2010)

Gil H. (2002) afirma “Se adivina desde aquí la necesidad de contar con un sistema capaz de crear las elevadas presiones de inyección, de dosificar y

pulverizar el combustible y que este combustible esté exento de cualquier impureza” (pág. 6). Los elementos que hacen posible esto son los inyectores capaces de crear un chorro de combustible por unos agujeros de diámetros 40 veces menores al del cabello humano.

La combustión espontánea comprenderá de tres factores:

- La diferencia de temperatura del aire y el autoencendido del combustible.
- La presión en la cámara de combustión (depende de la temperatura del aire).
- El tamaño de las partículas de combustible pulverizado.

2.2 Comportamiento durante el ciclo.

El motor diesel al igual que el de gasolina funciona tanto en ciclos de cuatro o dos tiempos pero por cuestiones de dimensión lo más utilizados son los de cuatro tiempos, especialmente cuando se trata de motores diseñados y fabricados con el objetivo de propulsar automóviles o maquinaria pesada, el comportamiento durante cada uno de los ciclos en que trabaja Diesel varia en comparación con el ciclo Otto.

2.2.1 Admisión.

La admisión se genera por el vacío creado cuando el pistón desciende del PMS al PMI, en el motor de gasolina este vacío absorbe la mezcla creada por el aire absorbido y el combustible pulverizado del carburador, de Castro. V (1992) afirma “En el motor Diesel, (...), la entrada de aire se produce directamente de la atmósfera sin intermedio de carburador alguno por lo que el cilindro se llena exclusivamente de aire” (pág. 15)

2.2.2 Compresión.

La compresión se lleva a cabo cuando el pistón asciende del PMI al PMS mientras las válvulas permanecen cerradas, la mezcla en los motores a

gasolina se comprimen a una relación de 7,5 a 10 mientras que el diesel al no contener ninguna mezcla y puede ser comprimido a mayor relación volumétrica.

De Castro. V (1992) afirma “En los motores diesel, utilizados en el automóvil, las relaciones de compresión se establecen entre 18 y 23, de modo que la compresión resulta extraordinariamente más elevada” (pág. 18). La diferencia que existe entre ambas relaciones volumétricas demuestra que el motor diesel necesita ser más robusto para poder alcanzar presiones de 30 a 50 bar.

2.2.3 Explosión.

Los motores a gasolina llevan a cabo este ciclo mientras el pistón se encuentra en el PMS con la mezcla combustible presionada, en ese momento se enciende la chispa producida por la bujía que hace que la mezcla explote. En los motores diesel existe una inyección de combustible a plena carga de poco antes de que el pistón llegue al PMS durante la compresión, inmediatamente se genera una combustión espontánea con el aire comprimido que se encuentra a 600°C.

De Castro. V (1992) afirma “La característica fundamental de este tiempo es la enorme presión a la que se ha de conseguir introducir el combustible en el interior de la cámara dado el caso de que esta ya se encuentra a valores de 30 a 40 bar” (pág. 19)

2.2.4 Escape

La presión ocasionada durante la explosión dirige el pistón hacia el PMI ocasionando el ciclo de trabajo, esta combustión genera gases que son expulsados al abrirse la válvula de escape mientras el pistón regresa al PMS, en este ciclo el combustible ya ha cumplido su misión, la mecánica del

movimiento es la misma para los motores a gasolina como para los motores a diesel.

2.3 Parámetros característicos.

Los motores de combustión interna, ya sean por chispa o autoencendido, cumplen con ciertos parámetros que pueden ser medidos y calculados por medio de fórmulas para saber de su funcionamiento, estos valores pueden ser representados por medios de gráficos estadísticos conocidos como las curvas características del motor.

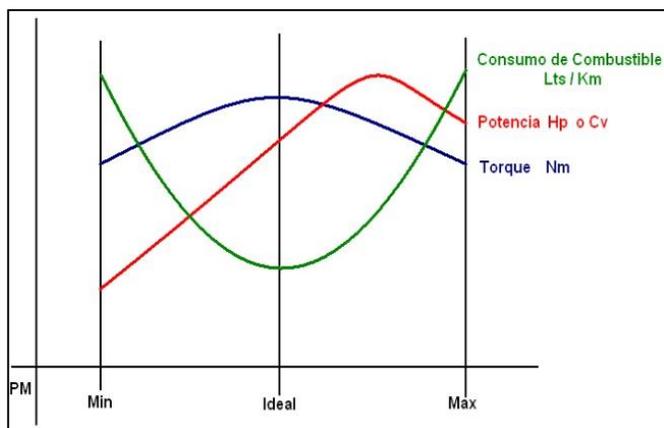


Figura 3: Curvas características del motor.

Fuente: (Aguirre, 2011)

2.3.1 Velocidad.

Es el arco total que rota un cigüeñal durante un tiempo determinado, sirve para encontrar la potencia al freno pero debe estar medida en radianes por segundo para lo cual se utiliza la siguiente fórmula:

$$\omega = \frac{2\pi N}{60}$$

Ecuación 1. Velocidad angular

Donde:

N = Arco total de giro del cigüeñal (rpm)

ω = Velocidad angular. (rad/seg)

La frecuencia de giro es igual al número de revoluciones del cigüeñal por unidad de tiempo. Se mide con un contador de vueltas o un tubo estroboscópico.

2.3.2 Torque o par motor.

En el proceso de combustión dentro de la cámara, la presión generada desplaza el pistón del PMS al PMI esta presión genera una fuerza a la biela que es transmitida a uno de los codos del cigüeñal también llamado brazo de palanca, el producto del componente de esta fuerza aplicada al pistón y al brazo de palanca se lo conoce como torque, se obtiene usando la siguiente ecuación:

$$\tau = F \cdot B_p$$

Ecuación 2. Torque

Donde:

F = Fuerza aplicada durante la combustión (N)

B_p = Brazo de palanca (m)

τ = Torque o par motor (N.m)

2.3.3 Potencia al freno.

Es la rapidez con la que se intercambia energía entre dos sistemas o un sistema y el medio en cierto lapso de tiempo. En la mecánica la potencia medida es la energía que el motor entrega al volante de inercia, también es conocida como potencia efectiva y viene dado por la fórmula:

$$P_f = (\tau)(\omega)$$

Ecuación 3. Potencia al freno

Donde:

ω = Velocidad angular. (rad/seg)

τ = Torque o par motor (N.m)

P_f = Potencia al freno (kW)

2.3.4 Caudal de combustible.

Es cierta cantidad de combustible que fluye en una corriente por el sistema de alimentación por un tiempo determinado. También es conocido como el consumo volumétrico de combustible y puede ser medido por un caudalímetro integrado en el sistema o midiendo cuanto tiempo tarda en consumirse un volumen de prueba del combustible, se obtiene por la siguiente ecuación.

$$\dot{v}_c = \frac{V_p}{t}$$

Ecuación 4. Caudal de combustible

Donde:

V_p = Volumen puesto a prueba (cc)

t = tiempo de consumo (s)

2.3.5 Consumo másico de aire.

Cantidad en masa de aire que ingresa al cilindro para crear la mezcla aire-combustible durante los ciclos del motor, se calcula por la siguiente fórmula:

$$\dot{m}_a = \frac{(\pi)(\phi^2)}{4} \cdot c \cdot \sqrt{\frac{2(c_1)(h_0)(P_a)}{(R_a)(T_a)}}$$

Ecuación 5. Consumo másico de aire

Donde:

ϕ = Diámetro del orificio de entrada de aire (cm)

c = coeficiente de descarga. (0.62)

c_1 = constante de transformación referida al fluido del manómetro
 $\left[9.807 \frac{N}{mmH_2O \cdot m^2}\right]$.

h_0 = altura del manómetro. (mmH_2O)

P_a = Presión atmosférica. (73687.3 Pas)

R_a = coeficiente residual de gases. ($287 \frac{N \cdot m}{Kg \cdot K}$)

T_a = Temperatura ambiente ($^{\circ}C$)

\dot{m}_a = Consumo másico de aire (g/seg)

2.3.6 Consumo másico de combustible.

Es la cantidad en masa de combustible que consume un motor al crear la mezcla aire-combustible durante el trabajo de los ciclos del motor, se calcula por la siguiente fórmula:

$$\dot{m}_c = (\dot{v}_c)(\rho)$$

Ecuación 6. Consumo másico de combustible

Donde:

\dot{v}_c = Caudal de combustible (cc/seg)

ρ = Densidad del combustible (g/cc)

\dot{m}_c = Consumo másico de combustible (g/seg)

2.3.7 Relación aire-combustible.

Es el número que representa cuanta cantidad de aire es aspirada para mezclarse con una unidad de combustible en el momento de la compresión y explosión de la misma dentro de la cámara de combustión del motor, esta relación depende del combustible, tipo de motor, regulación y carburación.

La relación aire/combustible puede ser medido en masa o volumen pero también puede encontrarse en función del flujo másico del aire y del combustible durante el mismo tiempo de trabajo:

$$A/C = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_c}$$

Ecuación 7. Relación aire-combustible

Donde:

\dot{m}_a = Consumo másico de aire (g/seg)

\dot{m}_c = Consumo másico de combustible (g/seg)

A/C = Relación aire-combustible.

2.3.8 Consumo específico de combustible.

Rolle. K (2006) afirma “El consumo específico de combustible, *sfc* (*de specific fuel consumption*), es la cantidad de combustible usado para producir una cantidad de trabajo, o bien la tasa de consumo de combustible para producir determinada potencia” (pág. 301). Viene determinado por la fórmula:

$$CEC = \frac{\dot{m}_c}{P_f}$$

Ecuación 8. Consumo específico de combustible

Donde:

\dot{m}_c = Consumo másico de combustible (g/seg)

P_f = Potencia al freno (kW)

CEC = Consumo específico de combustible (g/kW.seg)

2.3.9 Trabajo indicado por ciclo.

Es el área que se encuentra encerrada en la curva presión – volumen como la mostrada en la Figura 4, para calcular la transferencia de trabajo del combustible al pistón se usan los datos de presión que genera el combustible en el cilindro durante el ciclo de funcionamiento por medio de una integral cíclica de la presión en relación al volumen del ciclo indicado.

$$W_{i,c} = \oint p dV$$

Ecuación 9. Trabajo del ciclo

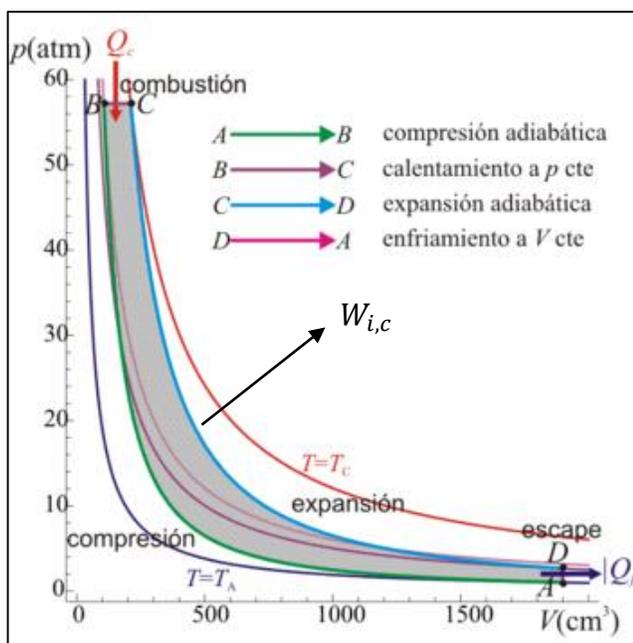


Figura 4: Curva de relación p-v del ciclo diesel real.

Fuente: (Laplace, 2013)

2.3.10 Rendimiento mecánico.

La eficiencia mecánica es la relación porcentual entre la potencia al freno y la potencia indicada, viene dada por la siguiente fórmula:

$$\eta_m = 1 - \frac{P_f}{P_i}$$

Ecuación 10. Rendimiento mecánico

Donde:

P_f = Potencia al freno (kW).

P_i = Potencia indicada del motor (kW).

η_m = Eficiencia mecánica.

Debido a que la potencia indicada depende de las pérdidas de fricción es difícil obtener la eficiencia mecánica real, los parámetros son confiables.

2.3.11 Consumo volumétrico de aire teórico.

Es la cantidad teórica de aire que debe ingresar al cilindro, este valor no toma en cuenta las condiciones ambientales de la atmosfera, temperatura, nivel del mar, etc. Se define mediante la siguiente fórmula:

$$V_D = \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right) (s)(i) \left(\frac{N}{60k_i} \right)$$

Ecuación 11. Consumo volumétrico de aire teórico

Donde:

D = Diámetro del cilindro (cm).

s = carrera del pistón (cm).

i = Número de cilindros del motor.

N = Arco total de giro del cigüeñal (rpm).

k_i = Constante del dinamómetro.

V_D = Consumo volumétrico de aire teórico (cc/min).

2.3.12 Presión media efectiva.

Rolle. K (2006) afirma “también se puede concebir el trabajo neto como el desplazamiento, o cambio de volumen, multiplicado por una presión promedio” (pág. 300). La presión promedio obtenida es la presión media efectiva.

$$PME = \frac{P_f}{V_D}$$

Ecuación 12. Presión media efectiva

Donde:

P_f = Potencia al freno (kW).

V_D = Consumo volumétrico de aire teórico (cc/min).

PME = Presión media efectiva (kPas).

2.3.13 Eficiencia térmica.

Es la división entre la producción generada y el consumo de energía en máquinas y sistemas, la eficiencia térmica de un motor transforma el calor

generado por la explosión del combustible en trabajo mecánico, se tiene la siguiente fórmula:

$$n_t = \frac{1}{(CEC)(Q_{NETO})}$$

Ecuación 13. Eficiencia térmica

Donde:

CEC = Consumo específico de combustible (g/kW.seg)

Q_{NETO} = Poder calorífico neto del combustible (J/g).

n_t = Eficiencia térmica.

2.3.14 Eficiencia volumétrica.

Es el caudal volumétrico de aire en el sistema de admisión dividido por la velocidad en la que el volumen es desplazado por el pistón, se calcula la efectividad con la que se realiza el llenado dentro del cilindro con carga fresca con la siguiente formula:

$$n_v = \frac{\dot{m}_a}{(V_D)(\rho_a)}$$

Ecuación 14. Eficiencia volumétrica

Donde:

\dot{m}_a = Consumo másico de aire (g/seg)

V_D = Consumo volumétrico de aire teórico (cc/min).

ρ_a = Densidad real del aire (g/cc).

n_v = Eficiencia volumétrica.

2.4 Ciclo diésel

Durante este ciclo el pistón del motor comprime el aire dentro de la cámara hasta su PMS en donde un inyector suministra el gasóleo, en este punto la relación de compresión hace posible que la temperatura del aire presionado en

la cámara sea lo suficientemente alta como para encender el combustible sin necesidad de la chispa de una bujía, en la Figura 5 se observa como actúa el pistón y los demás componentes en un motor diesel.

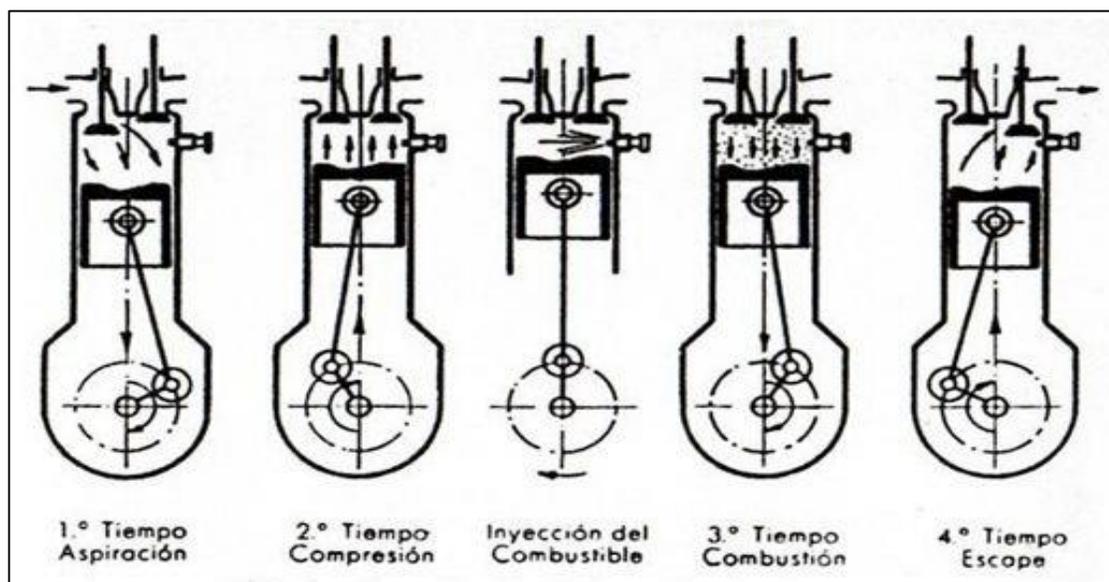


Figura 5: Comportamiento físico del motor diesel.

Fuente: (Echavarría, 2016)

Howell R. & Buckios O. (1990) afirman “La máquina Otto no opera con una relación de compresión tan alta, ya que la elevación de la temperatura durante la compresión de la mezcla combustible-aire haría que ésta se encendiese antes de la llegada del pistón al límite de su carrera” (pág. 328), este efecto causaría un golpeteo y posterior avería del motor a gasolina, en los motores diesel no ocurre este fenómeno porque la mezcla aire-combustible se lleva cabo después de que el aire sea comprimido dentro de la cámara.

El ciclo diesel es un ciclo de adición de calor a presión constante que lleva a cabo la explosión de la mezcla por medio de la compresión de la misma dentro del cilindro del motor, conlleva consigo cuatro procesos que se muestra en la Figura 6:

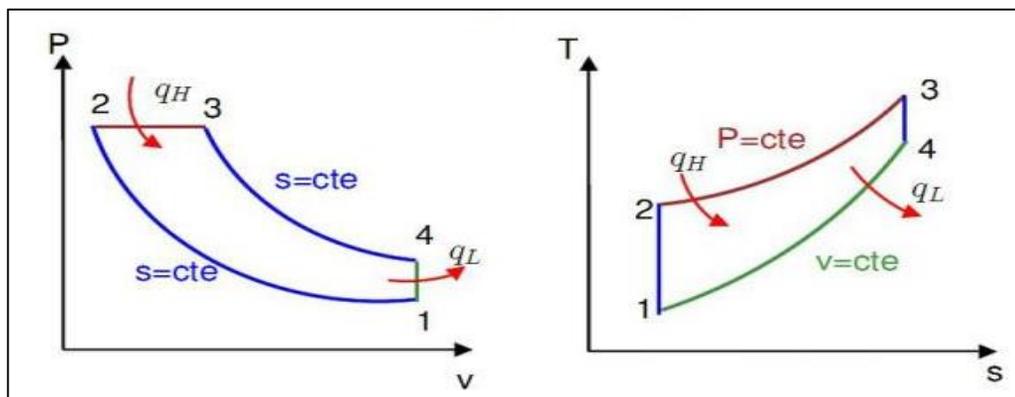


Figura 6: Ciclo ideal modelar para motores de encendido por compresión.

Fuente: (Rodríguez, 2015)

- Durante los procesos 1-2 se lleva a cabo la **compresión isentrópica** donde se comprime la mezcla en el PMS a entropía constante.
- En el proceso 2-3 se lleva a cabo la **adición isobárica de calor** o combustión a presión constante que simula la inyección de gasoil.
- Durante el proceso 3-4 se realiza la **expansión isentrópica** del fluido termodinámico a entropía constante.
- La última etapa 4-1 es la descarga isométrica de calor o **proceso isócoro** que simula el escape a volumen constante.

Çengel Y. & Boles M. (2012) afirman “Un ejemplo de que tan grande puede ser un motor diesel es el de 12 cilindros construido en 1964 por la corporación italiana Fiat, el cual tenía una salida de potencia normal de 25 200 hp (18.8 MW) a 122 rpm, un diámetro del cilindro de 90 cm y una carrera de 91 cm.” (pág. 505)

El ciclo Otto suministra todo el calor antes que el proceso de expansión se inicie y esto le permite la expansión más completa para obtener un mayor rendimiento que en el ciclo diesel, basándose en la aportación de calor y presión máxima el ciclo diesel tiene mayor eficiencia del ciclo Otto. El motor diesel real emplea altas relaciones de compresión (13:22), mientras que el

motor Otto está limitado a relaciones bajas (7.5:9), por las restricciones en la detonación.

2.5 Diferencias entre motores diesel y otto.

Rolle K. (2006) afirma “El parámetro más común para comparar diversos motores es la eficiencia termodinámica” (pág. 319). La eficiencia térmica son todos los procesos termodinámicos que suceden durante los ciclos y denotan si toda la combustión transformada en energía es utilizada en mayor medida.

Tomando en cuenta la formula general de eficiencia térmica (18), reemplazando los valores con las fórmulas de calor agregado (15) y calor extraído (16) en la del trabajo de ciclo (17) se tiene:

$$Q_{agr} = C_v(T_z - T_c)$$

Ecuación 15. Calor agregado al ciclo

$$Q_{ext} = C_v(T_b - T_a)$$

Ecuación 16. Calor extraído del ciclo

$$W_{i,c} = Q_{agr} - Q_{ext}$$

Ecuación 17. Trabajo del ciclo en función del calor

$$n_t = \frac{W_{i,c}}{Q_{agr}}$$

Ecuación 18. Eficiencia térmica en función del trabajo del ciclo

$$n_t = \frac{Q_{agr} - Q_{ext}}{Q_{agr}}$$

$$n_t = 1 - \frac{Q_{ext}}{Q_{agr}}$$

$$n_t = 1 - \frac{(T_b - T_a)}{(T_z - T_c)}$$

Ecuación 19. Eficiencia térmica ciclo otto

Donde:

Q_{agr} = Calor agregado (kJ/kg).

Q_{ext} = Calor extraído (kJ/kg).

$W_{i,c}$ = Trabajo del ciclo (kJ/kg).

C_v = Calor específico a volumen constante $\left(0,718 \frac{KJ}{kg \cdot K}\right)$

T_a = Temperatura de admisión (K).

T_c = Temperatura de compresión (K).

T_b = Temperatura de expansión (K).

T_z = Temperatura de combustión (K).

n_t = Eficiencia térmica.

Se tiene la fórmula para la eficiencia térmica en ciclo otto donde todos los procesos son a volumen constante, pero en el ciclo diesel los procesos en la adición y expansión son a presión constante y para la fórmula de calor extraído se utiliza el valor del calor específico a presión constante obteniendo:

$$Q_{ext} = C_p(T_b - T_a)$$

Ecuación 20. Calor extraído del ciclo diesel

Donde:

C_p = Calor específico a presión constante $\left(1,005 \frac{KJ}{Kg \cdot K}\right)$

T_a = Temperatura de admisión (K).

T_b = Temperatura de expansión (K).

Q_{ext} = Calor extraído (kJ/kg).

Utilizando la ecuación (20) y conociendo que $k = \frac{C_p}{C_v}$ se tiene:

$$n_t = 1 - \frac{(T_b - T_a)}{k(T_z - T_c)}$$

Ecuación 21. Eficiencia térmica del ciclo diesel

Donde:

T_a = Temperatura de admisión (K).

T_b = Temperatura de expansión (K).

T_c = Temperatura de compresión (K).

T_z = Temperatura de combustión (K).

k = Coeficiente adiabático.

n_t = Eficiencia térmica.

Dejando las ecuaciones (19) y (21) en función de la relación de compresión $\varepsilon = \frac{V_a}{V_c}$ y del grado de expansión previa en el caso del Diesel $\rho = \frac{V_z}{V_c} = \frac{T_z}{T_c}$ gracias a manipulación matemática se obtiene la eficiencia térmica para motores diesel:

$$n_T = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$$

Eficiencia térmica motores ciclo Otto.

$$n_T = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \times \frac{\rho^{k-1}}{k(\rho-1)}$$

Eficiencia térmica motores ciclo Diésel.

Entonces se deduce que los motores ciclos diesel necesitan un grado de expansión previa a la combustión que lleva a que los procesos de compresión y combustión sean a presión constante, esto hace que se pierda trabajo como se ve en la Figura 7.

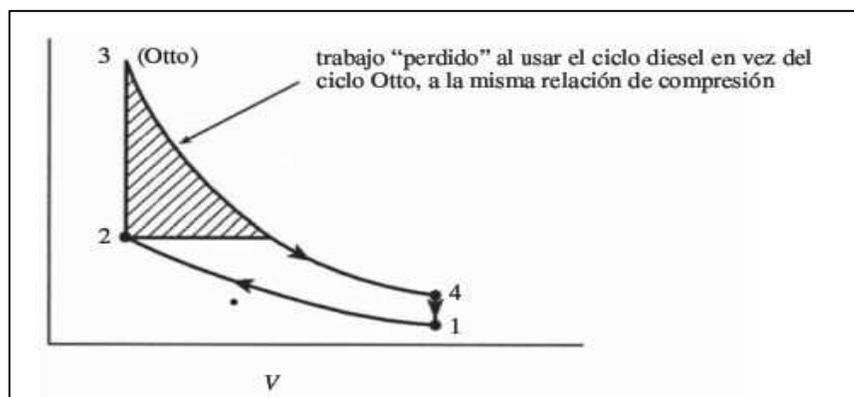


Figura 7: Diagrama p-v para comparar los ciclos otto y diesel

Fuente: (Rolle, 2006)

Los motores diesel son mayormente usados porque puede aumentar su relación de compresión a elevados valores sin que la pre ignición del combustible cause problemas, la pre ignición combustiona la mezcla por lo que el limitante para que estos motores alcancen una elevada relación de compresión es la resistencia de sus materiales.

2.6 Diesel y sus propiedades.

El diesel también llamado gasóleo es un combustible líquido transparente verdoso compuesto de parafinas, se obtiene por la destilación del petróleo entre 200°C y 350°C a presión atmosférica, se obtiene por refinamiento mostrado en la Figura 8 como uno de los derivados de petróleo en la categoría de crudos pesados.

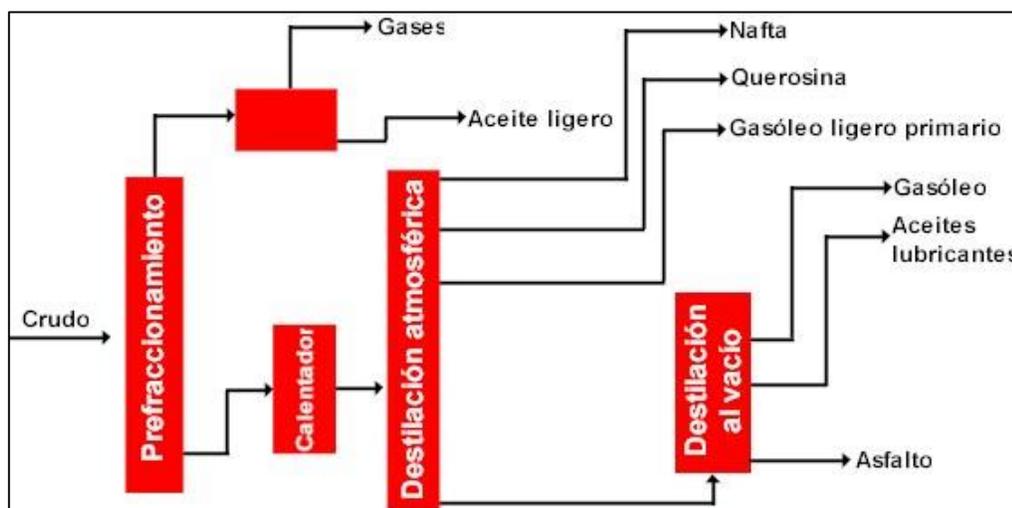


Figura 8: Diagrama de refinamiento de petróleo.

Fuente: (Leiva & Rodriguez, 2012)

Tiempo atrás la manufactura de diesel utilizaba lo que quedaba de remover productos del petróleo útil pero con el paso del tiempo su fabricación se ha vuelto más compleja, ahora comprende escoger y mezclar fracciones de petróleo que cumplan con especificaciones precisas. Debe ser calificado bajo estrictas normas de laboratorio en una producción estable y homogénea que requiere de experiencia.

El mejor diesel es el que tenga un índice de cetano parecido al del keroseno, esa parte del crudo es más interesada en la desintegración catalítica por lo que la desviación de los combustibles para ser desintegrados en diesel requiere que la materia prima cumpla la demanda de los aceites combustibles.

Obert E. (1999) afirma “Antes de que esos depósitos puedan venderse deberán ser procesados otra vez para asegurar su calidad como combustibles EC” (pág. 324) un diesel al ser refinado adquiere las siguientes propiedades:

2.6.1 Índice de cetano.

Es el equivalente al índice de octano u octanaje en la gasolina y mide la calidad de ignición del diésel, es inversamente proporcional al retraso de la ignición por lo que este indica la eficiencia del combustible en los motores.

2.6.2 Porcentaje de azufre.

Ciria I. (2007) afirma sobre el azufre “Contribuye al desgaste del motor y a la aparición de depósitos que varían considerablemente en importancia dependiendo en gran medida de las condiciones de funcionamiento del motor.” (pág. 9)

El azufre forma parte del petróleo pero al ser refinado puede ser eliminado en gran cantidad para cumplir con las tendencias internacionales, es necesario crear capacidades adicionales de desulfuración. Las fallas que provienen del azufre suceden cuando se forma el trióxido de azufre (SO_3) durante la combustión creando resinas duras en las paredes del cilindro al mezclarse con el lubricante.

2.6.3 Densidad API.

Villareal M. (2015) afirma” En la tecnología petrolera, aun cuando se emplean tanto el peso específico como la densidad (expresada en las unidades

métricas o inglesas antes indicadas), se usa casi exclusivamente los “grados API”, siglas de “AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE”. (pág. 8).

Esta densidad se mide tomando en cuenta la densidad del agua que es 10° API, es proporcional al número de cetano del combustible y está dada por la siguiente fórmula.

$$API = \frac{141.5}{\text{peso específico } 15.5^{\circ}\text{C}} - 131.5$$

Ecuación 22. Densidad API

Donde:

API = Grado de densidad (API).

2.6.4 Viscosidad cinemática.

Es la relación entre la viscosidad y la densidad de una muestra, mide la resistencia al flujo de un líquido en segundos que tarde en fluir por el tubo capilar de un viscosímetro calibrado a temperatura controlada. Como la viscosidad cambia con la temperatura se debe especificar a cuantos grados se realizó la prueba, en un viscosímetro universal de saybolt (SU) las temperaturas a las que se hacen las pruebas son 21, 38, 54 y 99 °C y se emplea para aceites cuyo tiempo de escurrido sea de 32 a 1000 seg.

2.6.5 Volatilidad.

El punto inicial de destilación de gasóleo esta entre 160 y 190 °C y el punto máximo esta en los 370°C, la volatilidad mide los residuos de la destilación formados por los componentes de la fracción con más átomos de carbono.

2.6.6 Poder calorífico

También llamado calor de combustión se determina quemando una cantidad de combustible con oxígeno dentro de una bomba adiabática, depende de la temperatura que alcanza la camisa refrigerante.

Obert E. (1999) afirma, “La cantidad de calor transferido al refrigerante, dependerá parcialmente, de que todo o parte del vapor de agua formada por la combustión se condense.” (pág. 330). Cuando todo el vapor de agua se condensa se obtiene el poder calorífico superior de lo contrario se obtiene el inferior.

2.7 Biodiesel

Castro P. (2007) afirma, “El biodiesel es un combustible renovable derivado de aceites o grasas de origen vegetal o animal. El prefijo bio hace referencia a su naturaleza renovable y biológica (...); mientras que diésel se refiere a su uso en motores de este tipo.” (pág. 40).

Con el pasar de los años el impacto ambiental causado por las emisiones de gases de escape de los motores que usan combustibles fósiles ha creado el interés de crear nuevas alternativas que disminuyan la contaminación atmosférica y que no intervengan negativamente en el progreso industrial, como una alternativa se decidió retomar la idea de usar los aceites naturales para la creación del diesel, de allí apareció el biodiesel.

García C & García L (2006) afirman, “A diferencia de otros combustibles, los biocarburantes presentan la particularidad de utilizar productos vegetales como materia prima.” (pág. 32) Pero para que exista garantías para el desarrollo en la industria de los biocarburantes no solo es necesaria la disponibilidad de la materia prima sino también de una demanda suficiente en el mercado. Al igual que con el bioetanol el biodiesel puede ser mezclado con gasóleo para poder ser usado como combustible alternativo

Cuando exista una demanda suficiente en el mercado de los biocombustibles se pueden crear leyes que favorezcan al sector agrícola para

que se pueda producir plantaciones específicas a la creación de aceites base de biocombustibles sin que esto afecte a la industria alimenticia.

2.8 Materias primas para la obtención de biodiesel.

Cuando se obtiene un diesel de un aceite natural y no de la destilación del petróleo se lo llama biodiesel, se lo lleva a cabo por un proceso químico junto con un alcohol y un catalizador, las materias primas base pueden variar dependiendo del uso y la calidad de biodiesel que se quiera obtener.

El grupo de investigación Whitman Direct Action (2015) afirma, "Lo que mucha gente no sabe es que el motor diesel fue originalmente diseñado para correr con aceite vegetal. El único problema con la maquinaria diesel existente es que no puede lidiar con la viscosidad de la mayoría de los aceites vegetales." (pág. 6) Cualquier tipo de aceite puede llegar a servir como materia base para la creación de biodiesel.

Se puede obtener de grasas animales o de frituras pero la mejor opción son los aceites vegetales debido a que sus propiedades químicas evitarían la creación de cebos que obstruyan el paso en las líneas de combustible, bomba inyectora e inyectores. Las principales materias primas usadas son la colza, palma, soya, girasol, jatropha, semilla de algodón y canola.

Ganduglia F. (2009) afirma, "Por cuanto los aceites vegetales representan del 60 al 75% del costo final del biodiesel, se investiga permanentemente en busca de materias primas de menor costo" (pág. 2) debido a que no existe interés real en la implementación del biodiesel no se ha hecho énfasis en encontrar un aceite base exclusivamente echo para la transesterificación, los productores han optado por aceite usado o desechado para no afectar la industria alimenticia, el problema con este tipo de aceite es que debe pasar por procesos previos de destilación, filtrado, lavado o nivelación acida.

2.8.1 Aceites naturales.

El aceite a usarse como base para el biodiesel puede ser de origen animal o vegetal pero dependerá de sus propiedades químicas si puede ser usado en un motor diesel común sin necesidad de adaptaciones especiales para su funcionamiento, los aspectos más importantes a tomar en cuenta es su punto de nublado y de gelatinado.

Ganduglia F. (2009) afirma, “El aceite utilizado para la fabricación del biodiesel por transesterificación debe presentar unas características determinadas para que el biocombustible final cumpla con las especificaciones deseadas.” (pág. 3) no debe tener partículas sólidas en suspensión, su acidez debe ser $< 1\%$ y su humedad $< 0.5\%$.

A bajas temperaturas se comienzan a crear cristales que opacan al aceite que antes era cristalino, a este punto se le llama nublado, mientras que cuando el aceite llega a solidificarse se le llama punto de gelatinado, en la Tabla 5 se observa los puntos de nublado y gelatinado de algunos biodiesel obtenidos de diferentes clases de aceite.

Tabla 4

Operatividad de biodiesel a bajas temperaturas.

Biodiesel	Punto de Nublado °C	Punto de gelatinado °C
Aceite de soja	2	-1
Aceite de canola	-3	-4
Manteca	14	11
Grasa comestible	20	13
Grasa amarilla	42	12

Fuente: (Whitman Direct Action, 2015)

Los aceites más recomendables para ser usados son los de origen vegetal debido a que su punto de nublado y gelatinado son bajos y pueden ser almacenados a temperatura ambiente a menos que se tenga que trabajar a temperaturas bajas.

2.8.2 Alcohol.

Son una serie de compuestos que contiene uno o más grupos hidróxido (-OH) enlazados a sus moléculas y se clasifican en monohidroxílicos, dihidroxílicos y trihidroxílicos. El alcohol actúa en la unión de esteres a la glicerina convirtiendo un triglicérido en un diglicérido y una molécula de biodiesel, para poder hacer esta reacción química es más común el uso de etanol (C_2H_6O) o metanol (CH_3OH) que forman parte del grupo monohidroxílicos.

Castro P. (2007) afirma “El alcohol es el principal insumo para la producción de biodiesel. En volumen, representa alrededor del 10-15% de los insumos consumidos.” (pág. 107) Los más usados en la producción de biodiesel son el metanol y el etanol debido a que otros alcoholes como el propanol y butanol son sensibles a la contaminación con agua.

Tabla 5
Características de operación de metanol y etanol

	METANOL (C_2H_6O) líquido	ETANOL (CH_3OH). Líquido
Punto de ebullición (°C)	64.7	78.4
Densidad ($\frac{g}{cm^3}$)	0.792	0.789
Punto de Inflamabilidad con pureza 99% (°C)	12	12
Temperatura de ignición °C	385	793

El metanol puede prepararse solamente con la destilación de la madera mientras que el etanol se obtiene de la fermentación de azúcares que tienen frutas como la uva, es más conveniente el uso de metanol para la obtención de biodiesel sin necesidad de gastar materia prima importante en otros ámbitos como en el caso del etanol. Otro aspecto importante a la hora de la elección del alcohol es su fácil adquisición y el bajo costo, en ese caso el metanol sigue

siendo la mejor opción debido a que puede encontrarse como disolvente de pintura, hay que tomar en cuenta que su índice de pureza debe ser de 99%.

2.8.3 Catalizadores.

Debido a que la transesterificación es una reacción química que necesita de una energía de activación, es necesario el uso de una sustancia química que acelere el proceso de la reacción, a esta sustancia se la llama catalizador, para la elaboración de biodiesel se usan varios métodos dependiendo del tipo de catalizador a ser usado, en la Tabla 7 se puede apreciar la clasificación que se le ha dado a estos catalizadores.

Tabla 6
Clasificación por el tipo de catalizador

Inorgánicos o no biológico	Homogéneos	Básico o Alcalino	KOH NaOH
		Ácido	
	Heterogéneos	Másico	
		Soportado	
Biológico	Enzimas		

Fuente: (Camps Michelena, 2008)

Los catalizadores inorgánicos se presentan como homogéneos en la misma fase que los reactivos o heterogéneos en fase diferente, los más utilizados son los básicos como el hidróxido potásico (KOH) o el hidróxido sódico (NaOH).

Camps M. (2008) afirma, “La transesterificación alcalina es el método más simple y es el generalmente utilizado para fabricar biodiesel, tanto en la Unión Europea como en el resto de Europa, América y Asia” (pág. 317) debe tenerse como material base un aceite con bajo contenido de ácidos grasos libres, agua u otras impurezas, los aceites naturales son los más aptos.

En el caso de usar catalizadores homogéneos ácidos se puede llevar a cabo un proceso de esterificación posterior de los ácidos grasos libres, la

desventaja es que al usar estos catalizadores las condiciones de reacción son más exigentes, la sustancia más usada es el ácido sulfúrico (H_2SO_4).

Los catalizadores heterogéneos tienen como ventaja una purificación y separación de elementos químicos más simple, por otro lado se requiere de una relación mayor de alcohol/aceite y de mayor volumen de metanol o etanol, las sustancias que pueden ser usadas con este tipo de catalizadores son los óxidos metálicos.

Los más usados para la elaboración de biodiesel son los homogéneos alcalinos KOH y NaOH, se presentan como cristales y deben ser disueltos por completo en metanol, el que genera mejores resultados en rendimientos de transformación es el KOH pero su desventaja frente al NaOH es su elevado costo.

El NaOH es barato y fácil de conseguir, su manipulación debe hacerse bajo normas de seguridad al contacto con la piel y el sistema respiratorio, debe mantenerse totalmente seco refrigerado cuando este diluido en alcohol para evitar su evaporación.

Castro P. (2007) afirma, “el NaOH es muy higroscópico (absorbe humedad del ambiente) lo cual hace que los cristales se peguen entre sí y sean más difíciles de manipular”. (pág. 110)

Una alternativa para evitar el uso de catalizadores ácidos o básicos son los biológicos que favorecen reacciones entre 36 y 37°C, son eficaces y efectivos de manera que los reactivos encajan perfectamente en la molécula de la enzima, entre utilizadas están las transferasas, ligasas, liasas.

2.9 Reacción química para la obtención de biodiesel.

Es el proceso en el cual al unir dos o más reactivos o reactantes se tiene como producto una o varias sustancias. Querini C. (2010) afirma, “Cuando la grasa o el aceite reaccionan con el alcohol, se obtienen dos productos, uno es

el biodiesel (que es una mezcla de compuestos) y otro es la glicerina” (pág. 226).

La reacción tiene el objetivo de obtener ésteres metílicos de un aceite vegetal, puede llevarse a cabo por el proceso de esterificación utilizando un catalizador ácido o la transesterificación que utiliza un catalizador básico.

La esterificación es el método más recomendable debido a que el subproducto de la reacción será agua a diferencia de la glicerina obtenida en la transesterificación, existen varios métodos de esterificación.

García C. & García L. (2006) afirma “El más común es el calentamiento de una mezcla del alcohol y del ácido correspondiente con ácido sulfúrico, utilizando el reactivo más económico en exceso para aumentar el rendimiento y desplazar el equilibrio hacia la derecha” (pág. 43).

La esterificación es teóricamente posible pero existen inconvenientes durante el proceso: el alcohol puede llegar a eliminarse formando olefinas, esterificación con el propio ácido sulfúrico y el ácido orgánico sufre descarboxilación. El proceso más común y usado en la fabricación de biodiesel es la transesterificación.

2.9.1 Transesterificación.

Es un proceso químico desarrollado por los científicos E. Duffy y J. Patrick a mediados del siglo XIX, mayormente usado en la industria alimenticia como la obtención de nuevos lípidos para la elaboración de margarinas, pero fue hasta finales del siglo XX que se comenzó a utilizar en la elaboración de biodiesel debido a preocupaciones ambientales, no fue es hasta el 2004 que con la obtención de biocombustibles se utilizó la transesterificación con un diferente fin al que fue creado.

La transesterificación reacciona las moléculas de triglicéridos encontrados en aceites naturales con alcoholes de bajo peso molecular para obtener ésteres y glicerina, en proporción molar un mol de triglicérido reacciona con 3 moles de alcohol utilizando un catalizador para mejorar la velocidad de la reacción y su rendimiento final, en la Figura 9 se observa los elementos que forman parte de la reacción y los productos obtenidos.

Castro P. (2007) afirma, “se requiere de un aceite con bajo contenido de ácidos grasos libres, agua y otras impurezas, o de procesos adicionales de pretratamiento de la materia prima para asegurar esta calidad. Además, requiere de pasos posteriores de postratamiento del biodiésel para reducir su contenido de impurezas procedentes del proceso” (pág. 113).

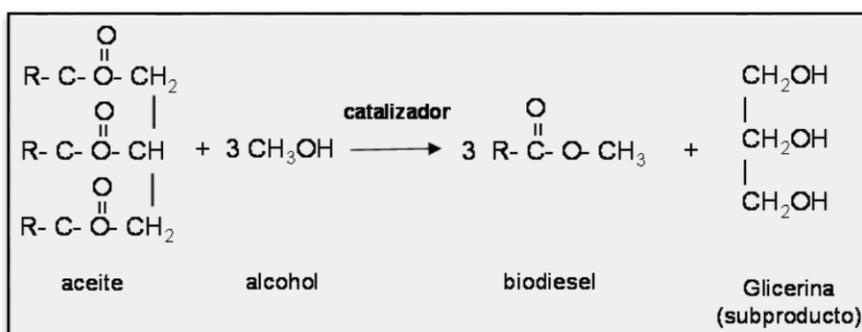


Figura 9: Transesterificación para biodiesel a partir de aceite.

Fuente: (Dufour, 2009)

En teoría la transesterificación químicamente equivale a:



Para que la reacción se produzca el aceite debe calentarse hasta 50 °C mientras se mece ligeramente sin provocar salpicaduras o burbujas, para que el procedimiento se lleve a cabo de mejor manera se usa un reactor de tipo Batch.

Se mezcla con los reactores (metóxidos o hidróxidos y agua) sin dejar de batir por una hora. Los ácidos grasos se separan de la glicerina y el metanol se

una formando metilésteres o etilésteres si se utiliza etanol, el hidróxido de sodio estabiliza la glicerina

El proceso de producción por medio de un catalizador básico alcalino como el Hidróxido de Sodio (NaOH) es sencillo y del cual se pueden usar los subproductos obtenidos hasta el punto de reusar el metanol no reaccionado nuevamente en la transesterificación siguiente como se puede observar en el diagrama de la Figura 10.

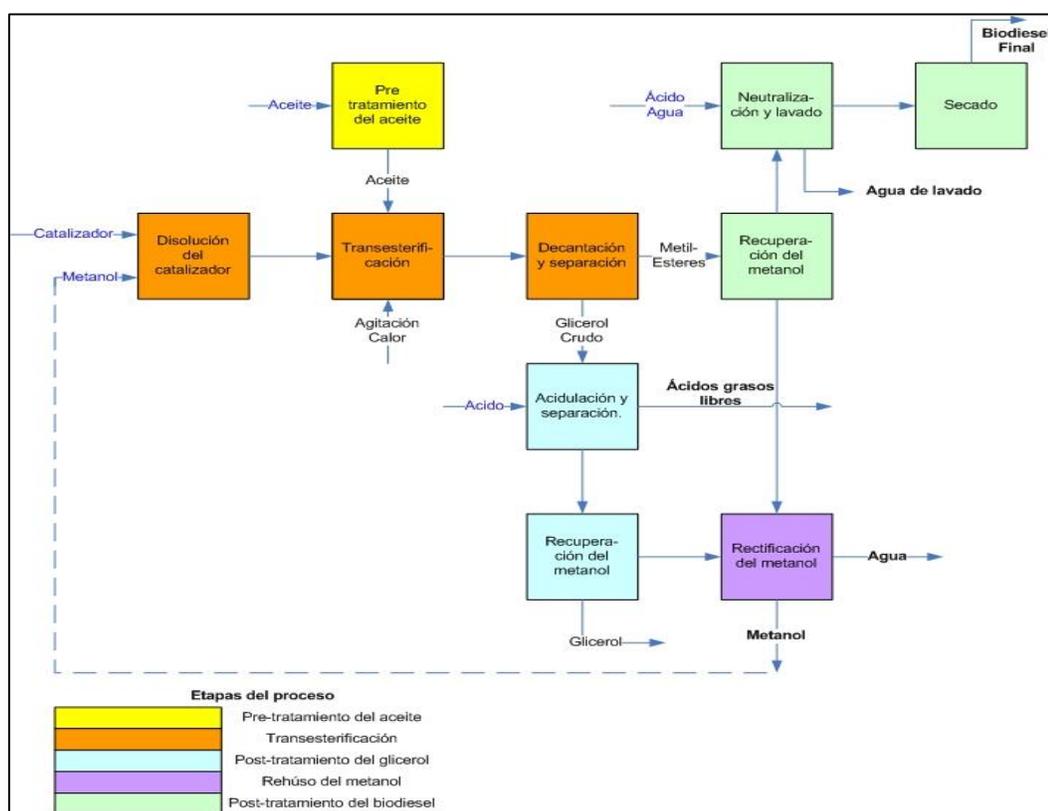


Figura 10: Proceso de producción de biodiesel transesterificación alcalina.
Fuente: Castro P. (2007)

Castellar G., Angulo E., & Cardozo M. (2014) afirman, “los catalizadores sólidos son promisorios al momento de reemplazar los catalizadores homogéneos, ya que son menos corrosivos, más fáciles de manejar, reutilizables y generan menos cantidad de residuos tóxicos.” (pág. 91).

Otros factores que afectan al proceso de transesterificación son el tipo de proceso y la disponibilidad de la materia prima. Los procesos pueden ser semi-continuo cuando se necesite de lotes pequeños de biodiesel o continuo cuando se requiera de grandes producciones debido a las dificultades técnicas de operación y puesta en marcha.

2.10 Procesos de postratamiento de biodiesel.

Las sustancias obtenidas no son puramente biodiesel, los productos obtenidos deben pasar por procesos posteriores a la reacción con el propósito de que el biodiesel obtenido sea de calidad y evitar problemas futuros en líneas de combustible, bomba de alta presión, inyectores u otros elementos que tengan contacto con el biodiesel y puedan verse afectados al no limpiar de jabones y glicerina el producto.

2.10.1 Separación de glicerina.

Después de la transesterificación el líquido ha quedado dividido en dos fases, la de menor densidad y color más claro es la fase éster mientras que la de mayor densidad y color más oscuro es la fase glicérica, para que las fases se separen correctamente hay que dejar en reposo la sustancia reaccionada por aproximado de 8 horas, en la Tabla 8 se puede notar la composición y densidad que diferencian a estas dos fases.

Tabla 7
Composición de fases separadas.

Fase Glicérica		Fase éster	
Glicerina:	5,5%	Éster:	93,9%
Metanol:	31,4%	Metanol:	6,0%
Impurezas:	8,5%	Aceite:	0,1%
Base:	4,6%		
Densidad:	1,0379 kg/l	Densidad:	0,87 kg/l

Fuente: (Castro, 2007)

Cuando la sustancia se encuentre lista para separarse debe hacérselo cuidadosamente para que la glicerina no se mezcle con el biodiesel y absorba las impurezas separadas, el recipiente donde se encuentre la reacción debe

constar con una válvula en la parte inferior para decantar la glicerina por acción de la gravedad, hay que esperar que un poco de biodiesel caiga al igual que la glicerina para detener el flujo antes del siguiente proceso.

2.10.2 Lavado.

Como se puede ver en la Tabla 8 la obtención del biodiesel (fase éster) aun contiene impurezas que no llegaron a separarse, para eliminarlas evitarse problemas de mayor medida cuando es necesario de por lo menos dos procesos de lavado.

El alcohol, jabón y aceites restante tienen una buena solubilidad en agua por lo que se debe juntar agua común con el biodiesel obtenido para crear una fricción mecánica entre ambos fluidos, después de dejar reposar el agua con las impurezas irán hacia el fondo mientras el biodiesel lavado flotara en la parte superior por efecto de densidades.

Se puede separar el agua del biodiesel como se hizo con la glicerina pero en diferentes recipientes tomando en cuenta que son dos procesos distintos para así evitar contaminación de impurezas, es recomendable llevar a cabo más de un lavado hasta notar que el agua del lavado, mientras más lavados se lleve a cabo más cristalina será el agua y también el biodiesel.

Pasquale G. & Ruiz D. (2010) “El lavado es la primer prueba de calidad del biocombustible, si al agitarlo con agua, el biodiesel posee mucho jabón, la emulsión que se forma no se separa o tarda mucho en separarse, si el biodiesel obtenido es de buena calidad la separación se logra en unos minutos.” (pág. 6).

Para evitar emulsiones demasiado densas que se producen por el lavado de agitación se puede usar otros métodos más sutiles como el lavado por burbujeo o el lavado por neblina.

2.10.3 Secado.

Después de los lavados existen pequeñas cantidades de agua que en el combustible llega a ser dañina. El secado es igual al de lavado por burbujas pero sin la necesidad de agregar agua, solo es necesario introducir un elemento dosificador de aire para que las burbujas creen una interface entre el biodiesel y el agua que llega a calentarse por inercia para después evaporarse.

Existen el método de secado por roció que usa una bomba para trasladar el biodiesel de un recipiente a otro usando un pulverizador, puede llevarse a cabo con una fuente de calor que agilice la evaporación del agua, esta fuente puede ser el mismo sol. Un nuevo método muy popular entre la comunidad productora de biodiesel es el secado al sol con barril negro poniendo un filtro para moscas en la abertura del barril.

El grupo de investigación Whitman direct action (2015) afirma en su obra, “Dependiendo de la humedad relativa, la intensidad del sol y el viento, debería tomar de 1 día a 2 semanas para que su biodiesel se seque al sol” (pág. 66).

A pesar de ser un proceso sencillo el secado no suele ponerse en práctica por ser considerado una pérdida de tiempo y energía, se deja el problema del agua en el combustible a los filtros del motor o al mantenimiento preventivo del mismo.

2.10.4 Almacenamiento.

Pasquale G. & Ruiz D. (2010) afirma “El biodiesel así obtenido no requiere un almacenaje especial. De hecho estando puro o en mezcla puede ser almacenado igual que el gasoil.” (pág. 6) Aunque si va a ser usado en maquinarias que trabajen en lugares de baja temperatura será conveniente

tener en cuenta las temperaturas de nublado y gelatinización del aceite que se ve en la Tabla 5.

Los recipientes usados para su almacenamiento pueden ser los mismos que para el diesel común: aluminio, el acero, el polietileno fluorado, el polipropileno fluorado, teflón entre otros, a excepción de tanques de cobre, plomo, zinc o concreto porque el aceite tiende a pegarse a las paredes.

El biodiesel puede ser almacenado en estado puro o en mezclas con diesel, a las mezclas se las denomina según su porcentaje de biodiesel pre seguido de la letra B, por ejemplo: B10 es una mezcla combustible con 10% de biodiesel y 90 % de diesel. Como están hechos a base de un material orgánico sufren de oxidación que empieza a aparecer después de 6 meses de almacenado.

Lo recomendable para almacenar una mezcla B100 es de máximo 3 meses aunque puede usarse un aditivo antioxidante para aumentar ese tiempo, en el caso de tener mezclas mayores a B20 se recomienda tenerlo almacenado 6 meses y en el caso de tener mezclas menores o iguales a B20 el tiempo no es relevante debido a que la mezcla adquiere las propiedades del diesel base.

2.11 Ventajas y desventajas del biodiesel

Si bien el biodiesel es el combustible alternativo más usado en maquinarias y automóviles también se ha demostrado por medio de estudios que existen algunos inconvenientes con el uso del mismo, aún se hace análisis sobre si el uso de este biocombustible es el ideal al relacionar tanto sus ventajas y desventajas.

2.11.1 Ventajas.

El mayor aspecto positivo viene desde el punto de vista ambiental, al ser una energía renovable ayuda a reducir la dependencia del diesel derivado de petróleo y así evitar la destrucción de zonas naturales donde están instalados

yacimientos petroleros debido a derrames, contaminación atmosférica o impacto en la fauna.

Fernandez J., Lucas H., & Ballesteros M. (2006) afirman, “Se puede considerar que por cada litro de gasóleo reemplazado se evita la emisión de 2,38 kg de CO₂, de los que 2,31 corresponden a la combustión directa del carburante y el resto a los procesos de extracción, transporte y refino.” (pág. 12) incluso las mezclas en pocas proporciones han logrado reducir las emanaciones de CO₂ y azufre,

El biodiesel es un producto 100% biodegradable por lo que a más tardar en 21 días desaparecen todos sus efectos en el planeta, su índice de toxicidad es incluso menor al de la sal común de mesa.

Castro P. (2007) afirma, “El biodiésel puede reducir la dependencia del petróleo importado y contribuir al ahorro de divisas y a la seguridad energética. Como puede ser empleado directamente en motores diésel, el biodiésel tiene un potencial inmediato para reducir la demanda de petróleo.” (pág. 48)

Los países latinoamericanos son importadores de hidrocarburos y consumen más combustibles que el que producen, todo esto debido al crecimiento que ha tenido el parque automotor en la región los últimos 25 años.

Querini C. & Molina C. (2007) afirman, “Usando materias primas residuales, el aceite muy ácido se transforma pudiendo aprovecharse los residuos.” (pág. 1) se puede aprovechar de aceite que haya alcanzado su fecha de caducidad, no es necesario que el aceite usado sea apto para el consumo humano pero si debe cumplir con estándares de acidez el cual no lo pierde incluso después de un año de haber caducado, en el caso de tener un aceite que su acidez sea muy alta este puede ser estabilizado por catálisis.

El biodiesel a diferencia del diesel tiene características bioquímicas diferentes, en caso de ser ingerido no causa intoxicación a menos que las cantidades sean alrededor de 17,4 (g/kg) de peso corporal, por lo que un derrame de biodiesel no sería perjudicial comparándolo con un derrame de diesel.

Es altamente biodegradable con el agua según estudios hechos por la Universidad de Idaho que muestra que un biodiesel B20 alcanza un 50% de biodegradación al agua en tan solo 16 días a diferencia de los 28 que suceden con el diesel común, el biodiesel puede ser usado sin problema alguno en embarcaciones, botes, yates o cualquier nave fluvial sin miedo al daño causado en caso de un derrame.

Otro estudio demostró que el biodiesel es toxico para el suelo cuando su concentración sea del 12% en peso, mientras que en el diesel esa concentración fue de solamente el 3%.

El punto de inflamación del biodiesel es demasiado alto por lo que se lo considera de bajo riesgo a auto incinerarse, en el caso de transportarse se utiliza un símbolo de advertencia como los mostrados en la Figura 11 dependiendo de su punto de inflamación, en el caso de biodiesel B100 no es necesario de un símbolo de emergencia.

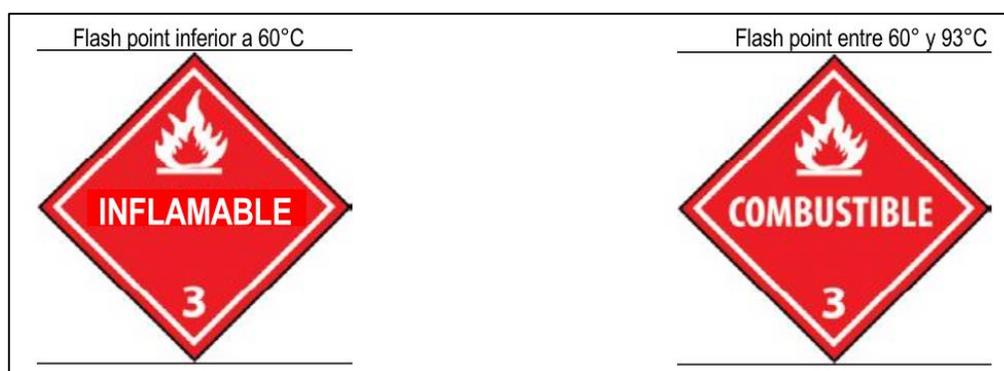


Figura 11: Señales de advertencia para el transporte de biodiesel.

Fuente: (Ganduglia, 2009)

La lubricidad del biodiesel es mayor a la del diesel, esto aumenta la vida útil de la bomba de inyección y los inyectores, reduce el ruido de funcionamiento del motor y genera menores emisiones de compuestos orgánicos volátiles o metales pesados.

2.11.2 Desventajas

El biodiesel conserva casi las mismas características físicas y químicas que el diesel por lo que de querer usar un motor solamente con biodiesel B100 se debe cambiar filtros cada 130 horas en vez de 200 horas debido a que la viscosidad es mayor y se llega a tapar el papel filtrante más rápido, en el mercado existen filtros especiales pero sus costos son mayores y solamente son rentables cuando el tiempo de trabajo es largo.

Otros inconvenientes mecánicos que se encuentran son:

- Pérdida de potencia aproximadamente de 5%.
- Dilución del aceite y aumento en su frecuencia de cambio.
- Aparición de residuos en inyectores, cámara, pistón y asientos de válvulas.
- Problemas en el arranque en frío especialmente a bajas temperaturas.

Es muy susceptible a cambios en sus propiedades, es por eso que se recomienda almacenarlo por máximo tres meses en un lugar libre de cualquier tipo de luz mientras que solo puede pasar máximo un mes dentro del tanque de combustible sin ser usado.

El aceite causa mayor corrosión y mayor deterioro en juntas de estanqueidad echas de caucho, la solución sería cambiar las juntas dañadas

por otras echas con viton o caucho fluorado que son más resistentes a químicos.

Castro P. (2007) afirma, “La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos en un estudio que compila datos de diversas investigaciones (EPA, 2002) encontró que las emisiones vehiculares de NOx se incrementan en un 10% con el biodiesel respecto del diésel 2” (pág. 51)

El problema del NOx es que no solo contamina a nivel de tropósfera donde se origina la lluvia acida sino que una sola molécula de N_2O contiene el mismo calor que 310 moléculas de CO_2 haciéndolo un gas de invernadero más nocivo. Se está implementando tecnologías como la recirculación de gases para reducir las emisiones de NOx pero esto aumenta la emisión de partículas de metales e hidrocarburos no quemados.

Elaborar biodiesel a gran escala cuesta casi el doble que de la extracción de diesel aunque esto cambia dependiendo del tipo de aceite usado, país de origen o la tecnología usada en el proceso.

El mayor inconveniente viene de conseguir el material necesario para la elaboración del aceite base, las semillas leguminosas son mayormente sacadas al mercado para uso alimenticio y su costo es elevado, en el caso de que se usen plantaciones agrícolas especializadas solo para crear aceite para biodiesel existe el debate de que tan importante es encontrar una fuente de energía limpia por sobre la nutrición de la comunidad, este debate toma más fuerza especialmente en países en vía de desarrollo.

El uso de biodiesel evitaría pagar impuestos a hidrocarburos pero esto puede ser visto como evasión de impuestos e ingresos gubernamentales no adquiridos lo cual puede ser una ventaja personal pero un inconveniente a nivel país. Existen países en la Unión Europea que han optado por leyes donde se

permite el uso de mezclas de hasta B25 para no impedir que los productores dejen la elaboración.

2.12 Biodiesel en Ecuador.

El gobierno ecuatoriano ya lleva a cabo un programa de producción de biocombustibles llamado ecopaís para diversificar la malla energética siguiendo el plan del buen vivir. A pesar de ser exportadores de petróleo, este programa cumple con el objetivo de aplacar la dependencia de los combustibles hidrocarburos para ser una alternativa ante el desabastecimiento del crudo y la crisis mundial petrolera. La Tabla 8 muestra como está repartida porcentualmente la demanda de diesel que ingresa al Ecuador, demostrando que un poco más de la mitad de toda la importación se usa en el sector automotriz.

Tabla 8
Demanda de diesel en Ecuador.

SECTOR	Barriles al año	PORCENTAJE
Automotriz	10 628 021	51%
Industrial	7 788 628	37%
Eléctrico	2 250 737	11%
Otros	283 197	1%
TOTAL	20 950 583	100%

Fuente: (Bravo E. , 2010)

Bravo E. (2010) afirma, “El programa nacional de biocombustibles será llevado a cabo en dos fases: una primera a través de un plan piloto en Guayaquil con etanol y otro en Quito con biodiesel, y la segunda fase será extender estos planes pilotos a nivel nacional.” (pág. 99)

A pesar de que el principal biocombustible obtenido en Ecuador es el etanol procedente de la caña de azúcar cultivada en la región costa la demanda del

diesel por parte de los sectores automotriz, industrial y eléctrico ha generado una necesidad de crear biodiesel en grandes cantidades.



Figura 12: Dispensador de biodiesel B20 para Ecuador.
Fuente: (Toaza, 2012)

La demanda nacional de diesel es de 10 628 021 barriles al año o 29118 barriles diario, en el caso de querer formular de un biodiesel B5 echo de una mezcla de diesel 2 con biodiesel de palma africana se requerirán 1456 barriles al día del biodiesel que equivale al 5% de la mezcla, ósea que se debe producir más de 531401 galones al año para cubrir la demanda. En el Ecuador se planta palma africana en 11 de sus provincias siendo Pichincha, Esmeraldas y Los Ríos los que mayor producción generan, las plantaciones de palma aumentan cada año a pesar del daño que causan extendiendo los cultivos.

Bravo E. (2010) “Estas plantaciones crecen sacrificando bosques primarios en la zona del Chocó biogeográfico ecuatoriano, una de las zonas de mayor biodiversidad del planeta, y en la Amazonía.” (pág. 111) se ha buscado la implementación de nuevos cultivos para crear una mayor biodiversidad sin dejar de crear aceites base para biocombustibles, se ha buscado materia prima que pueda ser plantada bajo las mismas condiciones climáticas y de suelo que la palma africana, entre los más destacados que se han encontrado están la soja, la jatropha y el girasol.

2.13 Biodiesel de girasol.

El girasol (*Helianthus annuus*) es una planta originaria de América del Norte de la familia de las asteráceas que es cultivada para propósitos ornamentales y por sus semillas oleaginosas, su aceite es obtenido por extracción de sus semillas y su mayor uso es para la industria alimenticia, para su uso en la elaboración de biodiesel se recomienda el girasol de alto oleico y su bajo punto de fusión menor a 12 °C.

2.13.1 Situación de las plantaciones de girasol en Ecuador.

Las plantaciones en el país no tienen una matriz fija de cultivo pero existen ciudades como Quevedo donde las características del clima y del suelo se prestan para crear grandes plantaciones de girasol, a pesar de que los cultivos necesitan de varios cuidados se trata de una plantación de ciclo corto de verano que llega a generar ingreso de manera seguida durante todo el año.

En el país la producción de girasol es escasa y las empresas deciden importar la planta o el aceite en bruto, en el 2015 se importaron cerca de 20000 toneladas de girasol, en provincias como Manabí la empresa privada está dispuesta a comprar la producción local siempre y cuando el estado genere las condiciones y facilite la importación de semillas híbridas para incentivar a que los agricultores vean en el girasol una fuente de ingresos rentable.

La empresa Pronaca se ha comprometido en adquirir las semillas o el aceite virgen que es obtenido de la Universidad Católica de Ibarra creando una alianza de cooperación que incentive a los estudiantes a seguir investigando sobre este cultivo que puede ser explotado en el territorio ecuatoriano.

Al obtener aceite de girasol por prensado el material sólido que queda se llama expeler y puede ser usado tanto como abono para las mismas

plantaciones o procesado como biomasa que es otro tipo de combustible del cual se llevan varias investigaciones dentro del país.

2.13.2 Características y ventajas respecto a productos similares.

El aceite de girasol que puede ser usado no necesariamente debe ser refinado como el que se encuentra en el mercado de la industria alimenticia, sino que también puede usarse el aceite crudo o incluso aceite usado pero tomando en cuenta que su índice de acides no aumente demasiado.

El girasol puede llegar a ser una excelente opción para la elaboración de biodiesel debido a las características con las que consta que lo diferencia de otros aceites como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9
Características del aceite de colza y girasol y de sus esteres metílicos.

CARACTERÍSTICAS	Aceite de		Ester metílico de		Gasóleo
	Colza	Girasol	Colza	Girasol	
Densidad (g/cm ³)	0,916	0,924	0,88	0,88	0,835
PCS específico (MJ/g)	37,2	36,5	-	35,3	38,4
PCI específico (MJ/g)	34,3	34,14	33,1	33,04	35,4
Viscosidad mm^2/s 20°C	77,8	65,8	7,5	8	5,1
Viscosidad mm^2/s 50°C	25,7	34,9	3,8	4,2	2,6
Nº de Cetano	44/51	33	52-56	45/51	> 45
Residuo carbonoso %	0,25	0,42	0,02	0,05	0,15
Azufre %	0,0001	0,01	0,002	0,01	0,29

Fuente: (Fernandez, Lucas, & Ballesteros, 2006)

El aceite de girasol tiene un alto contenido de ceras con compuestos insaponificables que debe eliminarse, este problema solo se presenta con el aceite crudo, la solución es someterlos a un filtrado y enfriamiento posterior a la obtención del biocombustible, estos procesos también pueden usarse al tener

un lote que conste de aceite usado y/o crudo, después se debe medir el índice de acides del aceite.

El biodiesel obtenido de girasol debe cumplir con los estándares de calidad establecidos en la norma NTE INEN 2 482:2009, el proceso de preferencia debería fortalecerse con materia prima de buena calidad y los mayores avances tecnológicos que se puedan adquirir.

Gracia C. (2009) afirma, “La semilla de girasol contiene un 26 por ciento de aceite. Su cosecha es de 1500 kg/ha. El cultivo de una hectárea de girasol requiere 4494 Mcal de los que, a diferencia de la soja que es una planta fijadora de nitrógeno, la fracción más elevada corresponde a los fertilizantes, especialmente los nitrogenados.” (pág. 116)

Si los productores se decidieran por el cultivo de girasol para fuentes de energía este puede llegar a competir con la soja incluso superándola en rentabilidad como se demuestra en la Figura 14.

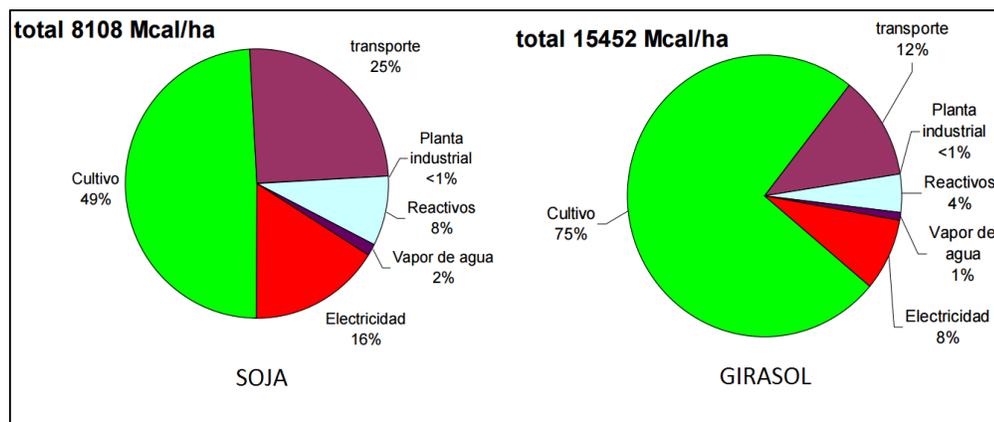


Figura 13: Energía requerida por hectárea para 1000 kg de biodiesel.

Fuente: (Gracia, 2009)

CAPÍTULO III

3. PROCESO DE OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL BIODIESEL DE PRUEBA.

3.1 Materiales utilizados.

El proceso se lo llevó a cabo de manera casera siguiendo el ejemplo de informes mostrados por productores caseros encontrados en las fuentes de información establecidas, se hizo un análisis de cuáles serían los materiales necesarios y se calculó las cantidades de aceite y catalizador así como la búsqueda de un área de trabajo que no genere complicaciones.

Las pruebas de caracterización en el laboratorio se hicieron en un litro por muestra mientras que para las pruebas de rendimiento en el motor se necesitarían de tres litros por muestra, se llevó a cabo las operaciones matemáticas en una matriz para conocer la cantidad tanto de diesel y de biodiesel necesarias para obtener 4000cc por muestra necesario para las pruebas de caracterización y rendimiento, los resultados se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10
Cantidades de biodiesel requeridas para 4000 cc de muestra.

Muestra	Porcentajes por muestra (%)		Cantidad (cc)	
	Biodiesel	Diesel	Biodiesel	Diesel
Diesel	0	100	0	4000
B2	2	98	80	3920
B5	5	95	200	3800
B10	10	90	400	3600
B15	15	85	600	3400
B25	25	75	1000	3000
B50	50	50	2000	2000
B100	100	0	4000	0
TOTAL (cc)			8280	23720

Los resultados mostraron que se requería 8,28 litros de biodiesel y 23,72 litros de diesel, era necesario un excedente que no sobrepase el 25% por margen de error, se adquirió 10 litros de aceite de girasol y 6 galones de diesel premium.

El lote total de aceite fue obtenido en envases de aceites que ya pasaron su fecha de caducidad o estaban pronto a hacerlo, además de aceites mal sellados o almacenados bajo condiciones de humedad, temperatura y exposición a la luz para no malgastar aceite nuevo. El diesel en su totalidad se adquirió de las gasolineras de la ciudad de Quito, en esta ciudad al igual que en Cuenca y Guayaquil se suministra diesel de calidad premium que es menos contaminante que el diesel 1 o diesel 2, entre sus características sobresalen su bajo número de octanaje (92) y su bajo contenido de azufre (465 ppm).

El catalizador que se utilizó durante la transesterificación era el metóxido de sodio creado al mezclar metanol de 99% de pureza con hidróxido de sodio (NaOH) presente en el producto de limpieza conocido normalmente como lejía y que es comercializado bajo el nombre de sello rojo. Se eligió la lejía por sobre el hidróxido de sodio químicamente puro debido a su bajo costo y fácil adquisición sin permisos particulares que demanda la ley, también se eligió el metanol por la diferencia de costo en relación al etanol.

Los materiales usados para la transesterificación son de uso casero, fácil adquisición y costos bajos para instalar una pequeña estación donde se llevaría a cabo la reacción, para calentar el aceite se usó un recipiente de acero que no altera sus características químicas con el calor, los recipientes para la transesterificación, lavado y secado eran de materiales que no sufren cambios en su estructura ante la presencia de metóxido de sodio.

Se requirió dos envases de tres litros hechos de polipropileno (PP), un cubo transparente de diecisiete litros con dispensador y tapa fabricado de tereftalato (PET) y otro de doce litros fabricado de polietileno de alta densidad (PEAD):



Figura 14: Envases plásticos usados durante el proceso.

Para el lavado se requirió de un sistema dispensador de aire con bomba de acuario y piedras disipadoras de aire redondas como se puede observar en la Figura 15.



Figura 15: Sistema dispensador de aire.

Para el almacenamiento y transportación se requirió ocho recipientes fabricados de plástico PET de un galón y cuatro de 1 litro de capacidad comprados en tiendas especializadas en el manejo de sustancias químicas.

3.2 Normas de seguridad.

3.2.1 Implementación del área de trabajo.

Se llevó a cabo la experimentación desde la preparación del aceite, metóxido, transesterificación, separación de glicerina, lavado, secado y almacenamiento del biodiesel.

Cuando el área se encuentra dentro o cerca de una zona habitable se requiere que sea un lugar alejado de habitaciones donde duerman personas o animales que podrían verse afectados, al área solo deben ingresar personal autorizado que pueda asegurarlo cuando no se encuentre en uso.

Debe existir espacio para cada proceso donde el experimentador trabaje con buena iluminación, accesibilidad a los elementos, rangos de temperatura para el almacenamiento y acceso permitido solo a personal autorizado.

Para esta investigación se usó una habitación con un área de $(7 \times 5)m^2$ que constaba de: una mesa de concreto de $(1 \times 4)m^2$ recubierta de baldosa al igual que el piso y empotrada a la pared, un lavamanos, cuatro lámparas fluorescentes, ventanas conectadas con el exterior y acceso a conexiones eléctricas.

3.2.2 Equipo de protección personal.

Con el propósito de no afectar la salud del experimentador se evitó el contacto directo con la piel, ojos o sistema respiratorio de cualquier químico incluyendo el diesel, evitando los gases emanados o fluidos generados durante la transesterificación, se usó implementos de seguridad personal que observan en la Figura 16.



Figura 16: Equipo de seguridad personal.

Las gafas protectoras y mascarilla cumplen con los requisitos del producto establecidos en la norma RTE INEN 216 que son:

- Las gafas protectoras y máscaras especiales para la protección de trabajadores deben estar sólidamente contruidos con materiales adecuados y no deben tener revestimiento metálico o piezas metálicas, excepto los tornillos y bisagras.
- Los protectores oculares deben estar libres de defectos evidentes.
- Las gafas protectoras y máscaras especiales para la protección de trabajadores deben estar libres de salientes, bordes cortantes u otros elementos que pudieran causar malestar.
- Los materiales utilizados deben ser seleccionados de manera que se evite cualquier irritación de la piel.

Debido a la manipulación de metóxido de sodio que es muy corrosivo se usó guantes para la protección de la piel que cumplan con los requisitos de la norma RTE INEN 270 que son:

- cumplir los requisitos de inocuidad, talla, destieridad, limpieza, transmisión y absorción del vapor de agua.

- cumplir los requisitos químicos, mecánicos, integridad de los guantes, eficacia de atenuación y uniformidad de la distribución del material protector, resistencia al agrietamiento por ozono.
- cumplir los requisitos de longitud mínima impermeable a los líquidos, penetración, permeabilidad

El mandil es una prenda que cubre la parte delantera del cuerpo desde el pecho hasta las piernas, debe cumplir con los requerimientos de la norma PRTE INEN 282 que son:

- Cumplir con los requisitos de diseño, resistencia a la penetración, resistencia al corte, características ergonómicas, inocuidad, penetración del agua, limpieza y desinfección establecida en la Norma ISO 13998.
- Ser confeccionado de tela gruesa que no impida el fácil movimiento de las extremidades.

Son necesarias toallas desechables de papel absorbente para limpiar el área de trabajo de fluidos que lleguen a regarse en el piso o en la mesa de trabajo. Es importante tener cerca una fuente de agua limpia para lavar un área que haya tenido contacto con los elementos químicos corrosivos, puede ser una gran cantidad almacenada o un grifo de constante caudal. Es mejor no usar jabón u otros elementos higiénicos para limpiar piel afectada y evitar irritaciones.

3.3 Obtención de biodiesel casero por medio de transesterificación.

3.3.1 Preparación del aceite.

Se almacenó un lote de aceite solamente de girasol igual a la cantidad de biodiesel a obtenerse, el total eran 10 litros que se obtuvo al recolectar aceite sobrante de botellas abiertas, aceite mal almacenado propenso a los rayos de luz solar y aceite a pocos días de su fecha de caducidad.

Para saber cuál es el índice de ácidos y de saponificación se tomó una muestra de 200 ml del lote total y se realizó pruebas en el laboratorio de Alimentos de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Central del Ecuador bajo el certificado No. OAE LE IC 0-002, los resultados obtenidos se los observa en la Tabla 11:

Tabla 11

Características del aceite de girasol recolectado.

PARÁMETROS	UNIDAD	RESULTADO	METODO/NORMA
Índice de acidez (oleico)	mg/g	0.14	NTE INEN-ISO 660:2013
Índice de saponificación	mg/g	183.13	NTE INEN-ISO 3657:2013

Fuente: Laboratorio de Alimentos, Universidad Central del Ecuador.

El índice de ácidos sirve para calcular la cantidad de metóxido a usarse mientras que el índice de saponificación muestra la cantidad máxima de metóxido que se podía agregar antes que el aceite se convierta en jabón, ambos resultados están ampliamente distanciados y eso indicaba que el aceite estaba apto para la creación del biodiesel evitando la creación excesiva de glicerinas o jabones en el proceso.

La transesterificación se lleva a cabo entre 45°C y 50°C (113°F a 122°F) por lo que el aceite debió ser calentado hasta llegar a los rangos establecidos, la temperatura tenía que revisarse con un termómetro de cocina para líquidos como muestra en la Figura 17.



Figura 17: Revisión de la temperatura del aceite.

3.3.2 Preparación del metóxido de sodio.

Pelly M. (2003) afirma, “Generalmente la cantidad de metanol necesaria es del 20% en masa de la cantidad de aceite.” pero como tiene densidades parecidas puede usarse la relación en volumen.

Pelly M. (2003) afirma, “Cada litro de aceite que no ha sido cocinado (aceite nuevo) necesita 3,5 gr de catalizador para la reacción. Por eso hay que sumar 3,5 gr de catalizador por cada litro de aceite cocinado que se vaya a transesterificar.” Luego se multiplicaba por los diez litros de biodiesel a obtenerse obteniéndose la ecuación:

$$W. \text{biodiesel} \left(\text{acidez} + 3.5 \frac{\text{grKOH}}{\text{g}} \right)$$

Ecuación 23. Cantidad de hidróxido necesaria para la investigación.

$$10 \text{ gr.} \left(1.4 \frac{\text{grKOH}}{\text{gr}} + 3.5 \frac{\text{grKOH}}{\text{g}} \right)$$

$$10 \text{ gr.} \left(4.9 \frac{\text{grKOH}}{\text{gr}} \right) = 49 \text{ grKOH}$$

Los 49 gramos calculados se mezclaron con los 2 litros de metanol, que representa el 20% del volumen, en un recipiente plástico totalmente seco y que soporte el calor emanado por una reacción exotérmica, se diluyeron todas las escamas de lejía por completo con un mezclador para obtener el metóxido de sodio. Se evitó usar elementos de aluminio, estaño o zinc que podían reaccionar con la lejía y ser corroída la pintura por el metóxido, la solución final tenía una apariencia lechosa como se ve en la Figura 18.



Figura 18: Muestra de metóxido de sodio obtenido.

3.3.3 Proceso de transesterificación.

El aceite a la temperatura adecuada y el metóxido se vertieron en el cubo de doce litros, los fluidos estaban separados por densidad de los líquidos como se puede notar en la Figura 19, para mezclarlos se usó del método de agitación con la ayuda de una batidora de cocina usada, cualquier elemento que tuviera contacto con el metóxido no podía volver a ser usado con los alimentos.

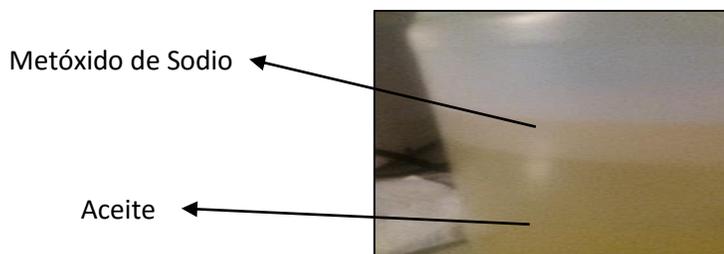


Figura 19: Aceite y metóxido antes de ser agitados.

Para que la reacción se completara se necesitaron de 20 a 30 minutos mezclando con la batidora a velocidad baja evitando salpicaduras y burbujeo, la reacción hizo que los ácidos grasos se separen de la glicerina hasta tener un líquido amarillo rojizo demostrando que la reacción se ha completado. El biodiesel contenía partículas de glicerina flotando que debían ser separadas, la mezcla descansó por más de 8 horas durante toda una noche y al día siguiente se observó como la glicerina estaba en el fondo por efecto de la gravedad, el aceite se tornó más claro mientras que la glicerina era de color marrón oscuro como se ve en una muestra de un litro y medio de la Figura 20.

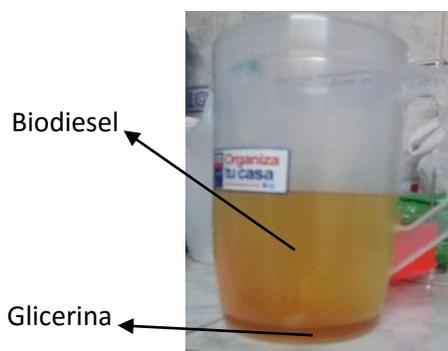


Figura 20: Mezcla después del reposo.

3.3.4 Separación de la glicerina.

Para separar la glicerina se decantó por un agujero hecho al fondo del recipiente de la mezcla dejando pasar un poco del biodiesel para que se lleve los restos de glicerina que pudieron haberse quedado en la base del recipiente. Se evitó tener la mínima cantidad de glicerina para que no pueda solidificarse y causar problemas en el proceso, la Figura 21 muestra la cantidad de biodiesel de amarillo y glicerina marrón que se obtuvo del lote total.



Figura 21: Biodiesel y glicerina.

3.3.5 Lavado.

Aún existían sobrantes de alcohol y jabón disueltos en el biodiesel que tenía un tono oscuro, el lavado se hizo solamente con agua usando el método de burbujeo.

Se hizo una prueba de calidad que consistía en agregar 200 cc del biodiesel obtenido con 200 cc de agua dentro de un envase cristalino donde para observar la separación de ambos fluidos como se muestra en la Figura 22.



Figura 22: Muestra para prueba de calidad.

Se tapó y se agitó por 30 segundos, la mezcla causó una emulsión parecida a la mayonesa que se forma cuando las impurezas del biodiesel se mezclan con el agua al igual que cuando se tiene agua jabonosa, la apariencia se observa en la Figura 24.



Figura 23: Emulsión de agua y biodiesel.

La emulsión debe separarse una vez que se ponga a reposar, dependiendo del tiempo de separación se analiza cuantos lavados son necesarios, en el caso de que tarde más de 40 minutos en separarse el biodiesel contiene demasiadas impurezas porque la reacción no se completó o se llevó a cabo de mala manera.

La emulsión obtenida en esta experimentación tardó en separarse 21 minutos que demostraban que serían necesarios mínimo dos lavados para obtener un biodiesel cristalino y usarlo con seguridad en un motor.

Para el lavado se vertió el biodiesel con la mitad de la cantidad de su volumen en agua en el balde con dispensador, en este caso 5 litros. Se dejó reposar hasta que el agua llegó a la base como se observa en la Figura 24.



Figura 24: Agua y biodiesel listos para lavado.

Se utilizó el sistema dispensador de aire de la Figura 16 instalando las piedras disipadoras hasta el fondo del sistema y el balde lleno cerca de una toma de corriente para el funcionamiento de la bomba de acuario.

Para que el sistema no impidiera que se tape el recipiente se hizo una abertura en la pared del balde para permitir el paso de la manguera de aire, durante el lavado el biodiesel emanaba un olor fuerte que se produce al evaporarse el alcohol del biocombustible cuando se calienta el aceite por el burbujeo, fue necesario que el recipiente se encontrara tapado el tiempo que duraba el lavado para evitar la fuga de gases que puedan contener etanol, tal como se observa en la Figura 25.



Figura 25: Recipiente tapado durante el lavado.

En la Figura 26 se muestra como las burbujas generadas por el sistema dispensador lavan con una fina capa de agua que se eleva hacia la superficie y pasa por el biodiesel limpiándolo, el agua regresa al fondo llevándose las impurezas para volver a repetir el proceso.



Figura 26: Burbujas creadas por el sistema dispensador.

Este proceso duró seis horas de burbujeo constante y después reposar tres horas para que el agua se separe por completo del biodiesel. Se drenó el agua abriendo la válvula del recipiente hasta que solamente quedaba el biodiesel lavado dejando pasar un poco de biodiesel en el agua antes del siguiente lavado, se repitió tres veces seguidas durante dos días hasta que al final el biodiesel y el agua del lavado eran cristalinos.

La cantidad de biodiesel obtenido después de los lavados fue de 9100 cc que cumplen con los 8280 cc mínimos requeridos para las pruebas de rendimiento y laboratorio según indica la Tabla 10, los 23720 cc de diesel se los adquirió comprando cinco galones de diesel premium al precio de 5.50 dólares.

3.3.6 Obtención de las mezclas (B2, B5, B10, B15, B25, B50, B100)

Cumpliendo los cálculos se midió 500cc hasta completar 4000cc por muestra, se utilizó este método para mayor precisión al medir el diesel y biodiesel en tres envases graduados: dos de 500cc y uno de 50cc como muestra la Tabla 12.

Tabla 12
Cantidades requeridas para muestras de 500cc.

Denominación	Tipo	diesel (cc)	biodiesel (cc)
A	B2	10	490
B	B5	25	475
C	B10	50	450
D	B15	75	425
E	B25	125	375
F	B50	250	250



Figura 27: Volumen para prueba A



Figura 28: Volumen para prueba B.



Figura 29: Volumen para prueba C.



Figura 30: Volumen para prueba D.



Figura 31: Volumen para prueba E.



Figura 32: Volumen para prueba F.

Se agregaron muestras de 500cc de biodiesel (denominado 0) y diesel al 100% (denominado 100) para las pruebas de rendimiento y tener parámetros de comparación, la Figura 33 muestra los recipientes de un galón con la cantidad de biodiesel necesaria para cada muestra.



Figura 33: Cantidad de biodiesel en muestras de 3500 cc

Se separó el total de las mezclas en dos: una de 500cc y otra de 3500cc para transporte, las mezclas ya listas se las puede observar en la Figura 34.



Figura 34: Muestras de 500cc y 3500cc.

3.3.7 Obtención de densidades.

Las densidades son necesarias para el consumo másico de combustible y el consumo específico, para el proyecto se pesaron 100cc de cada muestra y haciendo uso de la Ecuación 23 se obtuvo los datos mostrados en la Tabla 13.

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Ecuación 24. Densidad

Donde:

m = Masa (g)

v = Volumen (cc)

ρ = Densidad (g/cc)

Tabla 13
Densidades de las muestras de combustible.

Combustible	masa (m) g	volumen (v) cc	densidad (ρ)	
			g/cc	kg/m ³
Diesel	83,15	100	0,832	831,5
B2	83,1	100	0,831	831
B5	83,32	100	0,833	833,2
B10	83,19	100	0,832	831,9
B15	83,64	100	0,836	836,4
B25	83,74	100	0,837	837,4
B50	84,52	100	0,845	845,2
B100	86,05	100	0,861	860,5



Figura 35: Comparativo de densidades de muestras combustibles

La Figura 35 muestra como la densidad aumenta cuanto más porcentaje de aceite tenga la muestra especialmente en las mezclas B50 y B100, todo esto debido a que la densidad del aceite es mayor a la del diesel, la densidad teórica de cualquier combustible que vaya a usarse en un motor diesel no debe superar

los 880 (kg/cm³) por lo que todas las muestras se encontraban dentro de los estándares para ser usadas.

3.4 Obtención del poder calorífico.

El poder calorífico en los combustibles es la cantidad de calor producida por la combustión completa de un kilogramo o un metro cúbico del combustible, al ser una cantidad de energía se lo expresa en calorías por kilogramo (*Cal/kg*) para combustibles líquidos o sólidos y en calorías por metro cubico (*Cal/m³*) para combustibles gaseosos. El poder calorífico que puede encontrarse puede ser superior (PCS) o inferior (PCI):

En el PCS se supone que el combustible y aire son tomados a 0°C y los gases combustionados llegan a 0°C después de la combustión, por lo que el vapor de agua se encontrará condensado, el vapor de agua puede provenir de la unidad del combustible o la combustión del hidrogeno. En el PCI se considera que el vapor de agua no se condensa permaneciendo en estado gaseoso sin aportar calor adicional por la condensación del agua.

Puede hallarse con el método analítico aplicando el principio de conservación de la energía o con el método práctico con una bomba calorimétrica que quema una cantidad de combustible para después calcular la cantidad de energía térmica ganada por un líquido conocido como el agua.

3.4.1 Protocolo de uso para el calorímetro adiabático.

Las pruebas se llevaron a cabo en un calorímetro adiabático marca Gallenkamp del que consta el laboratorio de motores de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. El calorímetro consta con las siguientes características mostradas en la Tabla 14.

Tabla 14

Características de la bomba calorimétrica

MARCA	Gallempack
Norma	ASTM D240
Elementos Constitutivos	
CB 110 Consola	<ul style="list-style-type: none"> • Gallempack • Circuitos especificados en la carcasa • Termómetro con lector/vibrador • Dimensiones (51.5x40x109) cm • 110/150V, 60Hz. • Ignición de prueba para bomba. • Agitador electrónico
CB 200 Bomba	<ul style="list-style-type: none"> • Gallempack, acero de alta densidad resistente a la corrosión. • Ring de sellado de caucho. • Compresor de muestras sólidas. • Porta muestras líquidas. • Válvula de alta presión. • Válvula de desfogue. • Electrodo de 25 mm de diámetro. • Tapa.

Fuente: Manual Gallempack, bombas calorimétricas.

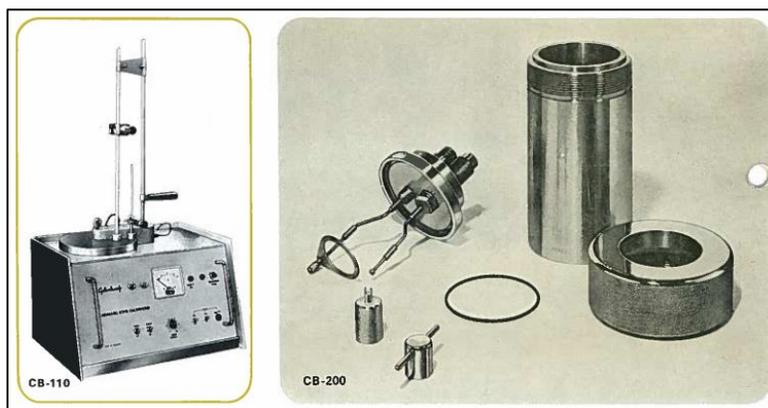


Figura 36: Consola y bomba calorimétrica Gallempack.

Fuente: Manual Gallempack, bombas calorimétricas.

La camisa interna sirve como bomba de calor y tiene una conexión eléctrica para que la maquina envíe una chispa que encienda el combustible hasta que combustione por completo, los pasos a seguir fueron los siguientes:

- Pesar 0.8 gramos exactamente de la muestra combustible con una balanza electrónica de precisión y un cuenta gotas o jeringa.



Figura 37: Peso de la muestra.

- Poner la muestra en el soporte de la tapa de la bomba que contiene dos electrodos unidos entre sí por un hilo de cobre, unir a la muestra por una mecha de hilo de lana sumergida en el combustible como se observa en la Figura 38.



Figura 38: Preparación de la muestras.

- Armar la bomba poniendo la tapa y la porta muestra armado dentro de la camisa, luego asegurar fuertemente.



Figura 39: Armado de la bomba de calor.

- Presurizar la bomba a 250 psi (17.24 Bar) de oxígeno como se observa en la Figura 40, para mantener todas las pruebas a presión constante.



Figura 40: Presurización de bomba de calor.

- Revisar que el agua de la camisa aislante de la carcasa se mantenga a 21°C, como se observa en la Figura 41, para que las pruebas se lleven bajo las mismas condiciones de temperatura.



Figura 41: Revisión de temperatura de agua de camisa externa.

- Probar el correcto armado de la bomba uniéndolo a la conexión del calorímetro para simular la corriente que pasa a los electrodos, si se enciende una luz verde quiere decir que la bomba está bien armada y se puede seguir con la prueba real.



Figura 42: Prueba de correcto armado de la bomba.

- Introducir la bomba en la camisa externa de la carcasa y llenar de agua a 21°C, asegurar el calorímetro como se ve en la Figura 43 antes de activarlo.



Figura 43: Sellado del calorímetro.

- Poner en marcha el calorímetro, como se muestra en la Figura 44, manteniendo activado el paso de corriente hacia los electrodos hasta que el termómetro comienza a subir de los 21°C.



Figura 44: Puesta en marcha del calorímetro.

- Cuando la temperatura se dispare desactivar el paso de corriente y observar hasta que temperatura máxima llega antes de volver a bajar, se puede activar constantemente el vibrador del lector que se observa en la Figura 45.



Figura 45: Lector/vibrador.

El vibrador se traslada a lo largo del termómetro y permite obtener una lectura más clara de la temperatura sin el problema de la tensión superficial que

afecta al mercurio, el visor tiene un foco integrado que permite una lectura más precisa.

Para sacar el PCS es necesario introducir una gota de agua que condensarse dentro de la camisa de la bomba, mientras que para encontrar el PCI se debe tener la camisa de la bomba completamente seca.

3.4.2 Obtención del PCI y PCS.

Para encontrar la capacidad calorífica total del calorímetro se encuentra la energía liberada de un gramo de ácido benzoico previamente preparado, obteniendo los siguientes datos mostrados en la Tabla 15:

Tabla 15
Datos obtenidos de práctica de ácido benzoico.

Valor	Símbolo	Unidad	Cantidad
Poder calorífico ácido benzoico.	$Q_{C_7H_6O_2}$	J/gr	25350
Peso quemado	m	gr	1
Temperatura inicial	T_0	$^{\circ}C$	21
Temperatura final	T_f	$^{\circ}C$	23.75

Se calculó la energía liberada (Ecuación 25) y la variación de temperatura (Ecuación 26) para calcular la capacidad calorífica del calorímetro (Ecuación 27).

$$E = Q_{C_7H_6O_2} \cdot m$$

Ecuación 25. Energía liberada del ácido benzoico

Donde:

$Q_{C_7H_6O_2}$ = Poder calorífico del ácido benzoico (J/g).

m = Masa (g).

E = Energía liberada (J)

$$E = \left(25350 \frac{J}{gr}\right) (1gr) = 25350J$$

$$\Delta T = T_f - T_0$$

Ecuación 26. Variación de la temperatura

Donde:

T_0 = Temperatura inicial (°C).

T_f = Temperatura final (°C).

ΔT = Variación de temperatura (°C).

$$\Delta T = 23.75^\circ\text{C} - 21^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 2.75^\circ\text{C}$$

$$C = \frac{E}{\Delta T}$$

Ecuación 27. Capacidad calorífica del calorímetro

Donde:

E = Energía liberada (J)

ΔT = Variación de temperatura (°C)

C = Capacidad calorífica (J/°C).

$$C = \frac{25350\text{J}}{2.75^\circ\text{C}} = 9218.18 \frac{\text{J}}{^\circ\text{C}}$$

Obtenida la capacidad calorífica del calorímetro y con la variación de temperatura encontrada se puede calcular el poder calorífico de cada muestra, la energía liberada del combustible se la consigue despejando la Ecuación 27 y el poder calorífico (superior e inferior) de la Ecuación 25.

$$C = \frac{E}{\Delta T}$$

$$E = C \cdot \Delta T$$

Ecuación 28. Energía liberada en función de la variación de la temperatura.

Donde:

C = Capacidad calorífica (J/°C).

ΔT = Variación de temperatura (°C)

E = Energía liberada (J)

$$E = Q \cdot m$$

$$Q = \frac{E}{m}$$

Ecuación 29. Calor específico

Donde:

E = Energía liberada (J)

m = Masa (g)

Q = Poder calorífico (J/g).

Sustituyendo la Ecuación 28 en la Ecuación 29 se obtiene una ecuación única para el poder calorífico.

$$Q = \frac{C \cdot \Delta T}{m}$$

Ecuación 30. Calor específico en función de la capacidad calorífica del calorímetro

Donde:

C = Capacidad calorífica (J/°C).

ΔT = Variación de temperatura (°C)

m = Masa (g)

Q = Poder calorífico (J/g).

Llevado a cabo el procedimiento para cada muestra tanto para el PCS y PCI se obtienen los datos de la Tabla 16 que serán constantes para los cálculos.

Tabla 16
Constantes en pruebas de poder calorífico.

Capacidad calorífica del calorímetro (C) $J/^\circ C$	Peso de la muestra (m) g	Temperatura inicial (T_0) $^\circ C$
9218.18	0.8	21

3.4.3 Cálculos: poder calorífico superior (PCS), inferior (PCI) y Neto (Q).

Los datos usados para el ejemplo son los de la prueba con diesel puro.

Tabla 17
Datos para ejemplo de cálculo de PCS, PCI y Q

DATOS	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD	UBICACIÓN
Peso de la muestra	m	0.8	g	
Temperatura inicial	T_0	21	$^\circ C$	Tabla 16
Capacidad calorífica del calorímetro	C	9818.18	$J/^\circ C$	
Muestra	diesel	-	-	-
Temperatura final	T_f	24.7 (PCI) 25 (PCS)	$^\circ C$	Tabla 17 Tabla 18

Se calculó la variación de temperatura para PCI y PCS usando la Ecuación 25:

$$\Delta T = T_f - T_0$$

$$\Delta T = 24.7^\circ C - 21^\circ C$$

$$\Delta T = 3.7^\circ C \text{ (Para PCI)}$$

$$\Delta T = 25^\circ C - 21^\circ C$$

$$\Delta T = 4^\circ C \text{ (Para PCS)}$$

Se encontró la energía total liberada para PCI y PCS usando la Ecuación 27.

$$E = C \cdot \Delta T$$

$$E = 9818.18 \text{ J}/^{\circ}\text{C} \cdot 3.7^{\circ}\text{C}$$

$$E = 34107,27 \text{ J (Para PCI)}$$

$$E = 9818.18 \text{ J}/^{\circ}\text{C} \cdot 4^{\circ}\text{C}$$

$$E = 36872,72 \text{ J (Para PCS)}$$

Se usó la Ecuación 28 para el poder calorífico inferior (PCI) y superior (PCS).

$$Q = \frac{E}{m}$$

$$Q (\text{PCI}) = \frac{34107,27 \text{ J}}{0.8 \text{ g}}$$

$$Q (\text{PCI}) = 42634,09 \text{ J/g}$$

$$Q (\text{PCS}) = \frac{36872,72 \text{ J}}{0.8 \text{ g}}$$

$$Q (\text{PCS}) = 46090,9 \text{ J/g}$$

Se obtuvo un valor promedio entre PCI y PCS conocido como poder calorífico neto (Q).

$$(Q) = \frac{Q (\text{PCI}) + Q (\text{PCS})}{2}$$

$$(Q) = \frac{42634,09 \text{ J/g} + 46090,9 \text{ J/g}}{2}$$

$$(Q) = 44362,5 \text{ J/g} = 44,363 \text{ MJ/kg}$$

Los valores calculados de poder calorífico inferior (PCI) están en la Tabla 18 para cada una de las mezclas.

Tabla 18
Variables de poder calorífico inferior.

Muestra	Temperatura final (T_f) $^{\circ}\text{C}$	Variación de temperatura (ΔT) $^{\circ}\text{C}$	Energía total liberada (E) J	Poder calorífico (PCI) J/g
Diesel	24,7	3,7	34107,27273	42634,09091
B2	24,62	3,62	33369,81818	41712,27273
B5	24,55	3,55	32724,54545	40905,68182
B10	24,51	3,51	32355,81818	40444,77273
B15	24,5	3,5	32263,63636	40329,54545

CONTINÚA 

B25	24,36	3,36	30973,09091	38716,36364
B50	24,27	3,27	30143,45455	37679,31818
B100	24,2	3,2	29498,18182	36872,72727

Los valores calculados de poder calorífico superior (PCS) están en la Tabla 19 para cada una de las mezclas.

Tabla 19
Variables de poder calorífico superior.

Muestra	Temperatura final (T_f) °C	Variación de temperatura (ΔT) °C	Energía total liberada (E) J	Poder calorífico (PCS) J/g
Diesel	25	4	36872,72727	46090,90909
B2	24,92	3,92	36135,27273	45169,09091
B5	24,76	3,76	34660,36364	43325,45455
B10	24,69	3,69	34015,09091	42518,86364
B15	24,66	3,66	33738,54545	42173,18182
B25	24,58	3,58	33001,09091	41251,36364
B50	24,34	3,34	30788,72727	38485,90909
B100	24,33	3,33	30696,54545	38370,68182

Los valores calculados de poder calorífico neto (Q) están en la Tabla 20 para cada una de las mezclas

Tabla 20
Poder calorífico neto.

Muestra	Poder calorífico neto (Q_{NETO})	
	J/g	MJ/kg
Diesel	44362,500	44,363
B2	43440,682	43,441
B5	42115,568	42,116
B10	41481,818	41,482
B15	41251,364	41,251
B25	39983,864	39,984
B50	38082,614	38,083
B100	37621,705	37,622

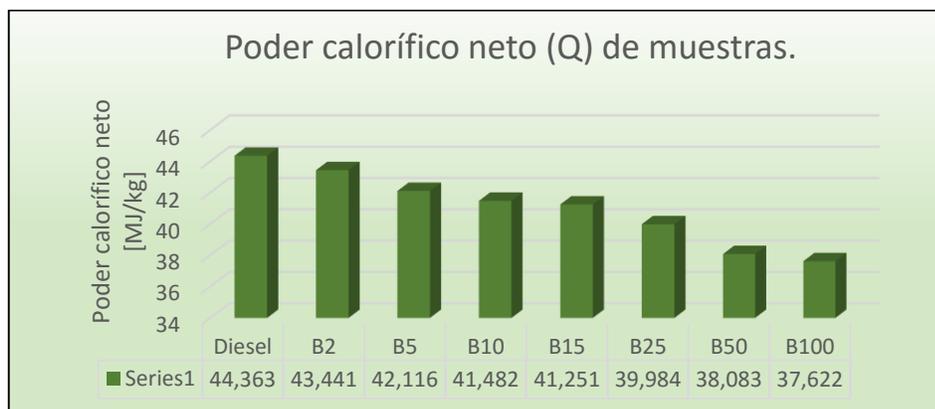


Figura 46: Comparativo de poder calorífico neto entre muestras.

En la Figura 46 se puede notar como el poder calorífico va disminuyendo mientras mayor sea el contenido de biodiesel en la muestra, existiendo una diferencia mayor a 6kJ/kg entre el diesel y el biodiesel puro B100.

3.5 Elección de muestras para pruebas de caracterización.

Se escogió cuatro de las ocho muestras para hacerse las pruebas de caracterización en laboratorio de la Facultad de Química de la Universidad Central del Ecuador, fueron elegidas las más convenientes en porcentaje para saber si todas cumplían las características de un combustible diesel.

Las primeras descalificadas fueron el diesel premium al 100% y el biodiesel de girasol B100, ambos debido a que no forman parte misma del proyecto pero serían usados en las pruebas de rendimiento para tener puntos de comparación.

El siguiente en ser descalificado fue el B2 debido a su bajo porcentaje de biodiesel, las leyes en Latinoamérica establecen un límite de máximo 5% de biodiesel en un combustible por lo que es más conveniente analizar B5. Países como Colombia, Perú o Ecuador tienen planes a corto y mediano plazo para elevar el porcentaje de biodiesel de 2% a 5% haciendo que el uso de biodiesel B2 se reduzca paulatinamente hasta que B5 sea el biodiesel de menor porcentaje.

El otro combustible en ser descalificado fue el B50 debido a que es la de mayor coste de producción, un galón de diesel cuesta 1.08 dólares mientras que obtener un galón de este biodiesel costó 3.04 dólares por lo que un galón de B50 costó 2.06 dólares en obtenerse, un dólar por sobre el precio del galón de diesel. La Unión Europea tiene como límite de uso de biodiesel el 25% incluso teniendo como base diesel Euro 5 y Euro 6, utilizar un combustible B50 en motores ecuatorianos que no implementen mejoras en sus sistemas de alimentación causaría problemas que se revelarían progresivamente.

3.6 Ensayos de caracterización sometidos a las mezclas.

3.6.1 Pruebas elegidas.

Se escogieron seis de las propiedades más importantes de un combustible, en la Tabla 21 se muestra el propósito, importancia y los efectos que pueden causar infringir los límites de las propiedades elegidas que son:

Tabla 21
Límites en especificación del biodiesel.

Descripción	Propósito, importancia y posibles efectos.
Densidad API	Depende del aceite y de la transesterificación. Un valor bajo indica excesivo resto de alcohol.
Punto de inflamación	Seguridad contra incendios, mecanismo para limitar el nivel del alcohol sin reaccionar que permanece en el biodiesel, el punto de inflamación es mayor que el del diesel, un bajo valor puede provocar problemas en el manipuleo, transporte y almacenamiento.
Sedimento básico y agua	Un exceso de agua puede causar corrosión y proveer la proliferación de microorganismos, la oxidación incrementa el nivel de sedimentos: por lo tanto este análisis debe ser usado con el de número ácido y viscosidad para determinar que tanto se oxidó el combustible durante su almacenamiento. Exceso de agua ocasiona problemas de hidrólisis (aparición de ácidos grasos libres), un alto valor indica presencia de insaponificables, jabones e impurezas mecánicas. Dejan residuos en el motor porque tienen mayor punto de evaporación, los jabones dan lugar a cenizas sulfatadas y las impurezas obstruyen filtros.
Viscosidad cinemática	Satisfactoria combustión, el valor debe ser igual al del diesel, se deben evitar valores mayores, una valor bajo del rango puede resultar ventajosa para motores que requieran menor potencia en la

CONTINÚA



	bomba de inyección y en la salida de los inyectores. Bajos valores indican exceso de metanol, altos valores indican degradación térmica y oxidativa, presencia de aceite sin reaccionar y pueden provocar problemas en los inyectores y sistema de bombeo.
Corrosión a la lámina de cobre	Indica dificultades con componentes de bronce, latón o cobre, la presencia de ácidos o de compuestos con azufre puede deteriorar la lámina de cobre indicando la posibilidad de ataque corrosivo. Altos valores provocarían problemas de corrosión durante el almacenamiento y en el motor.
Índice de cetano calculado.	Es una medida de la calidad de ignición del combustible y del proceso de combustión. Los requerimientos dependen del tamaño y diseño del motor, de la naturaleza de las variaciones de velocidad y carga, y de las condiciones atmosféricas.

Fuente: **(Ganduglia, 2009)**

3.6.2 Resultados obtenidos.

La Tabla 22 muestra los siguientes regímenes a cumplir para combustibles diesel 1, diesel 2 y diesel Premium según la norma INEN 1489.

Tabla 22
Requisitos para el diesel

Requisito	Unidad	Diesel 1		Diesel 2		Diesel premium		Método de ensayo
		min.	máx.	min.	máx.	min.	máx.	
Punto de inflamación	°C	40	--	51	-	51	-	ASTM D93
Contenido de agua y sedimento	% (a)	-	0.05	-	0.05	-	0.05	ASTM D2709
Contenido de ceniza	% (b)	-	0.01	-	0.01	-	0.01	ASTM D482
Contenido de azufre	% (b)	-	0.3	-	0.7	-	0.05	ASTM D2622 ASTM D4294 ASTM D5453
Contenido de residuo carbonoso sobre el 10% de residuo destilado	% (b)	-	0.1	-	0.1	-	0.1	ASTM D4530

CONTINÚA 

Viscosidad cinemática a 40%	$\frac{mm^2}{s}$	1.3	2.4	2	5	2	5	ASTM D445
Temperatura de destilación del 90%	°C	-	288	-	360	-	360	ASTM D86
Corrosión a la lámina de cobre	-	-	1 a	-	1 a	-	1 a	ASTM D130
Índice de cetano calculado	-	No aplica	45	-	45	-	-	ASTM D976
Contenido de biodiesel	% (a)	No aplica	-	5	5	10	-	EN 14078

(a) % corresponde a fracción de volumen expresada en porcentaje.
(b) % corresponde a fracción de masa expresada en porcentaje.
(c) La determinación del contenido de biodiesel se debe realizar cuando este adicionado en el diesel.

Fuente: (NTE INEN1489, 2016)

Las muestras fueron renombradas para el laboratorio como la Tabla 23.

Tabla 23

Muestras renombradas.

Combustible	Renombre
B5	I
B10	II
B15	III
B25	IV

La cantidad enviada por mezcla fue de un litro en envases de material PET correctamente sellados como especificaba la orden de trabajo del laboratorio.



Figura 47: Muestras enviadas al laboratorio.

Los ensayos fueron hechos bajo condiciones ambientales de presión (542,6 mm de Hg) y Temperatura (21°C). Los resultados, unidades y métodos usados según los informes se muestran en la Tabla 24.

Tabla 24
Caracterización de las muestras.

DETERMINACIÓN	UNIDADES	MÉTODO	RESULTADOS			
			I (5%)	II (10%)	III (15%)	IV (25%)
Densidad API 60 °F	API	PNE/DPEC/P/ASTM D-287	35,2	35	34,2	34,1
Punto de inflamación	C	PNE/DPEC/P/ASTM D-93	65,2	64,2	69,1	69,2
Sedimento básico y agua (%BSW)	% Vol	ASTM D-4007	0,025	0,025	0,025	0,025
Viscosidad cinemática	cSt	PNE/DPEC/P/ASTM D-445	3,29	3,24	3,29	3,24
Corrosión a la lámina de cobre	Unidad de corrosión	PNE/DPEC/P/ASTM D-130	1a	1a	1a	1a
Índice de cetano calculado	-	Protocolo de pruebas	52	52	51	51

Fuente: Laboratorio de ingeniería Química, Universidad Central del Ecuador.

3.6.3 Densidad API a 60°F.

La densidad API por el método ASTM D-287 se basa en el principio de Arquímedes que cita “todo cuerpo sumergido total o parcialmente en un líquido, recibe un empuje de abajo hacia arriba, igual al peso del líquido que desaloja”.

Se mide llenando una probeta con la muestra del biodiesel calentada a 90°F, se sumerge un hidrómetro API completamente en el crudo de tal manera que se pueda dar lectura de la medida obtenida, la medida debe ser corregido por medio de fórmulas para conseguir la densidad API a 60°F.

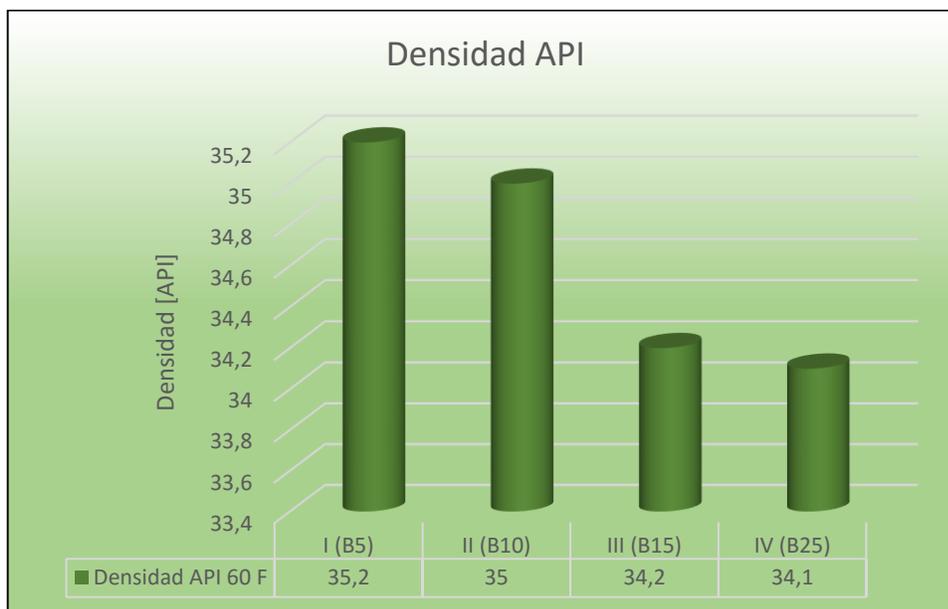


Figura 48: Comparativo de densidad API entre muestras.

La Figura 48 muestra como la densidad va reduciendo a medida que el combustible contiene más biodiesel, B5 y B10 son quienes tiene una mayor densidad, este factor puede afectar al consumo de combustible y a elementos sensibles del sistema de inyección especialmente los de alta presión como el sistema de riel común.

3.6.4 Viscosidad cinemática.

La viscosidad cinemática por el método ASTM D-445 mide la resistencia que opone el fluido a su libre flujo, se mide en centistokes equivalente a un milímetro al cuadrado sobre segundo ($1cSt = 1 \text{ mm}^2/s$), utiliza un viscosímetro calibrado en posición vertical bañado con un líquido transparente, el sistema debe tener una temperatura de 37.8°C . Por medio de un vacío se succiona la muestra hasta el límite inicial y se suelta para que fluya hasta el límite final establecido en el viscosímetro, se mide el tiempo en que fluyo el líquido entre ambos límites calculándose por medio de la siguiente ecuación:

$$V = C \cdot t$$

Ecuación 31. Viscosidad

Donde:

C = Constante de calibración del viscosímetro (mm^2/s^2)

t = Tiempo (s)

V = Viscosidad cinemática (mm^2/s)

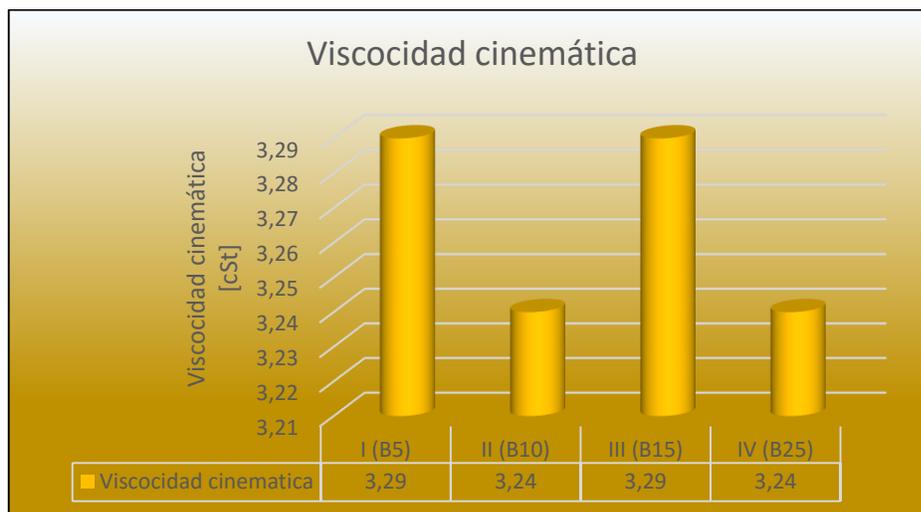


Figura 49: Comparativo de viscosidad cinemática entre muestras.

La Figura 49 muestra como la viscosidad cinemática de las muestra está entre los límites de 2 y 5 centistokes establecidos por la norma, las cuatro son aptas como alternativas al diesel y la diferencia entre ellas es mínima al igual que sus densidades lo que no afectaría al libre flujo del combustible.

3.6.5 Punto de inflamación.

El punto de inflamación por el método ASTM D-93 o también llamado de vaso cerrado (Pensky-Martens) es la temperatura mínima corregida a la presión barométrica de 1 atm, donde una fuente de calor externa hace desprender vapores a la muestra.

Se llena una copa de cobre y se sella con un agitador automático dentro del líquido, se calienta la muestra mientras es agitada y se acerca una fuente de encendido al interior de la copa a intervalos seguidos hasta que el punto de

inflamación sea detectado cuando aparezca una llama que se propage en la superficie del líquido:

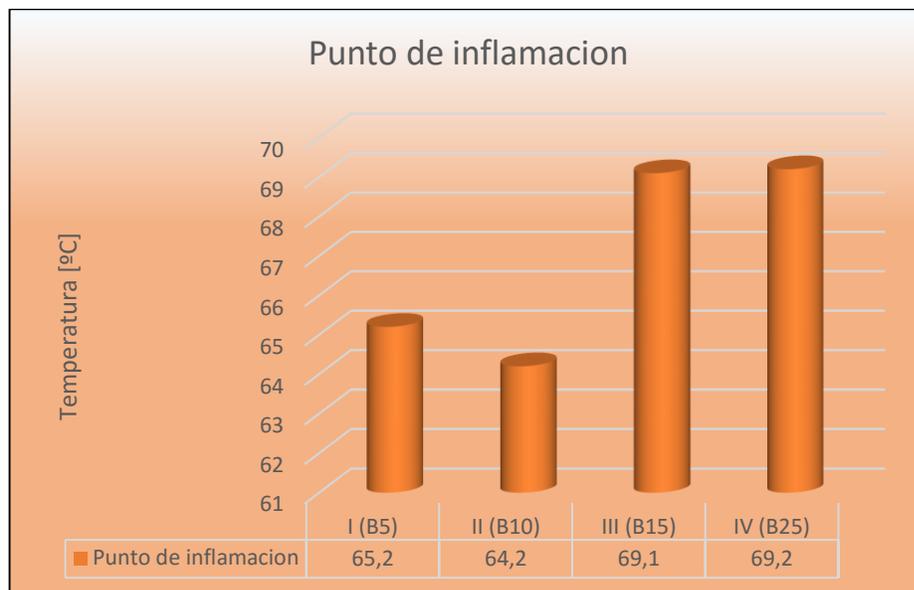


Figura 50: Comparativo de punto de inflamación entre muestras.

El punto de inflamación mínimo para un diesel premium establecido por la norma es 51°C por lo que todas las muestras la cumplen tal como lo demuestra la Figura 50, el punto de inflamación aumenta proporcionalmente al porcentaje de biodiesel, el aceite es menos volátil gracias a su bajo contenido de carbono y azufre. Un punto de inflamación bajo hace que un combustible no afecte al motor en el encendido por presión y que sea más seguro de transportar.

3.6.6 Sedimento básico y agua (%BSW).

El método ASTM D-4007 mide el sedimento básico y agua (%BSW) por separación de sustancias en centrifugación, la centrifuga debe ser capaz de hacer girar dos o más tubos de ensayo a una temperatura de $60 \pm 3^\circ\text{C}$.

Se llena los tubos con 50cc de líquido y se los calienta en baño maría hasta 60°C, se los pone en la centrifuga por 10 minutos a 600 rpm para después dar

lectura a los volúmenes de agua y sedimento al fondo de los tubos, el método se repite hasta que los volúmenes sean constante por dos lecturas seguidas.

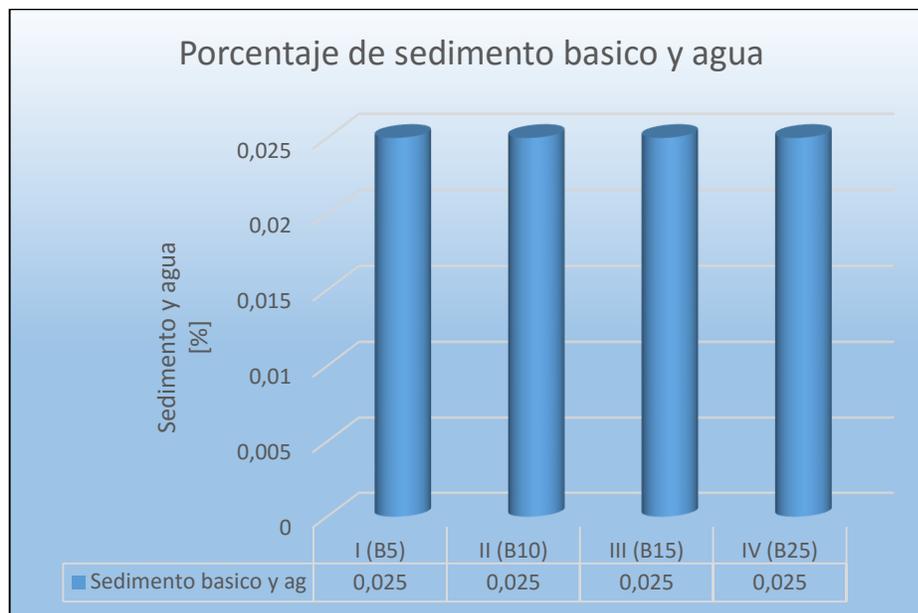


Figura 51: Comparativo de sedimento básico y agua entre muestras.

El porcentaje máximo que establece la norma es 0.05% y en la Figura 51 se observa que las cuatro muestras cumplen con un porcentaje de 0.025%, esto se debe a que el aceite base no era usado y no fue necesario un filtrado previo a la transesterificación.

El bajo porcentaje en los sedimentos del aceite y las cantidades de agua demuestran que el aceite se encontraba limpio y los envases para transportar las mezclas fueron lavados y secados correctamente.

3.6.7 Corrosión a la lámina de cobre.

La corrosión a la lámina de cobre por el método ASTM D-130 se realiza tomando una placa de cobre limpiada con papel de lija de aluminio o carburo de silicio, se sumerge en el líquido muestra calentado por un baño de agua a 100°C durante 24 horas, la lámina se seca por presión con papel filtrante y la corrosión

se la establece por medio de una tabla de estándares ASTM como la demostrada en la Figura 52.

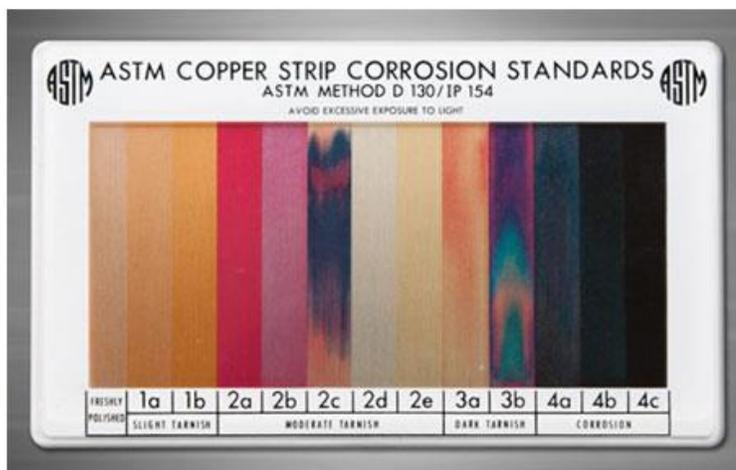


Figura 52: Estándares de corrosión a la lámina de cobre ASTM.
Fuente: (Lublearn, 2014)

Según los resultados mostrados en la Tabla 24 todas las mezclas analizadas pertenecen al grupo 1a es decir que la corrosión fue casi nula, los límites máximos según la norma son hasta el grupo 1 por lo que todas las muestras cumplen.

El azufre es el material que mayor corrosión causa en un combustible por lo que su menor contenido en un biocombustible reducirá esta capacidad de corroer metales de los elementos del sistema de alimentación, incluso si la lectura llegara a los límites del segundo grupo los materiales estarían en riesgo de un ataque químico a largo plazo.

3.6.8 Índices de cetano calculado.

El índice de cetano es calculado por la norma INEN 1 495 teniendo como datos la temperatura del 50% de recuperación y la densidad API, es aplicado a combustibles de obtención directa, traqueteo catalítico o mezcla de ambos. Se determina utilizando la siguiente ecuación:

$$IC_c = 420.34 + 0.016d^2 \log M + 65.01(\log M^2) - 0.0001809M^2$$

Ecuación 32. Índice de cetano calculado

Donde:

d = Densidad API

M = Temperatura del 50% a 760 mm Hg. (°F)

IC_c = Índice de cetano calculado.

La temperatura del 50% a 760 mm Hg de recuperado se determina por corrección barométrica de la temperatura usando la ecuación de Sidney Young descrita en la norma INEN 926, para luego ser usado en la fórmula de índice de cetano calculado.

$$M = 0,00012(760 - P)(273 + t^{\circ}\text{C})$$

Ecuación 33. Ecuación de Sidney Young

Donde:

P = Presión barométrica en el momento del ensayo (mm Hg)

$t^{\circ}\text{C}$ = Temperatura leída (°C)

M = Temperatura del 50% a 760 mm Hg. (°C)

Otro método de cálculo es por medio del grafico del ábaco para índices de cetano calculado que se muestra de la Figura 53, para lo cual es necesario saber la temperatura del 50% de recuperación obtenida por la Ecuación 33 y la densidad API, se unen ambos valores en la gráfica con una línea recta y el valor que corte a la escala de índice de cetano calculado es el valor obtenido.

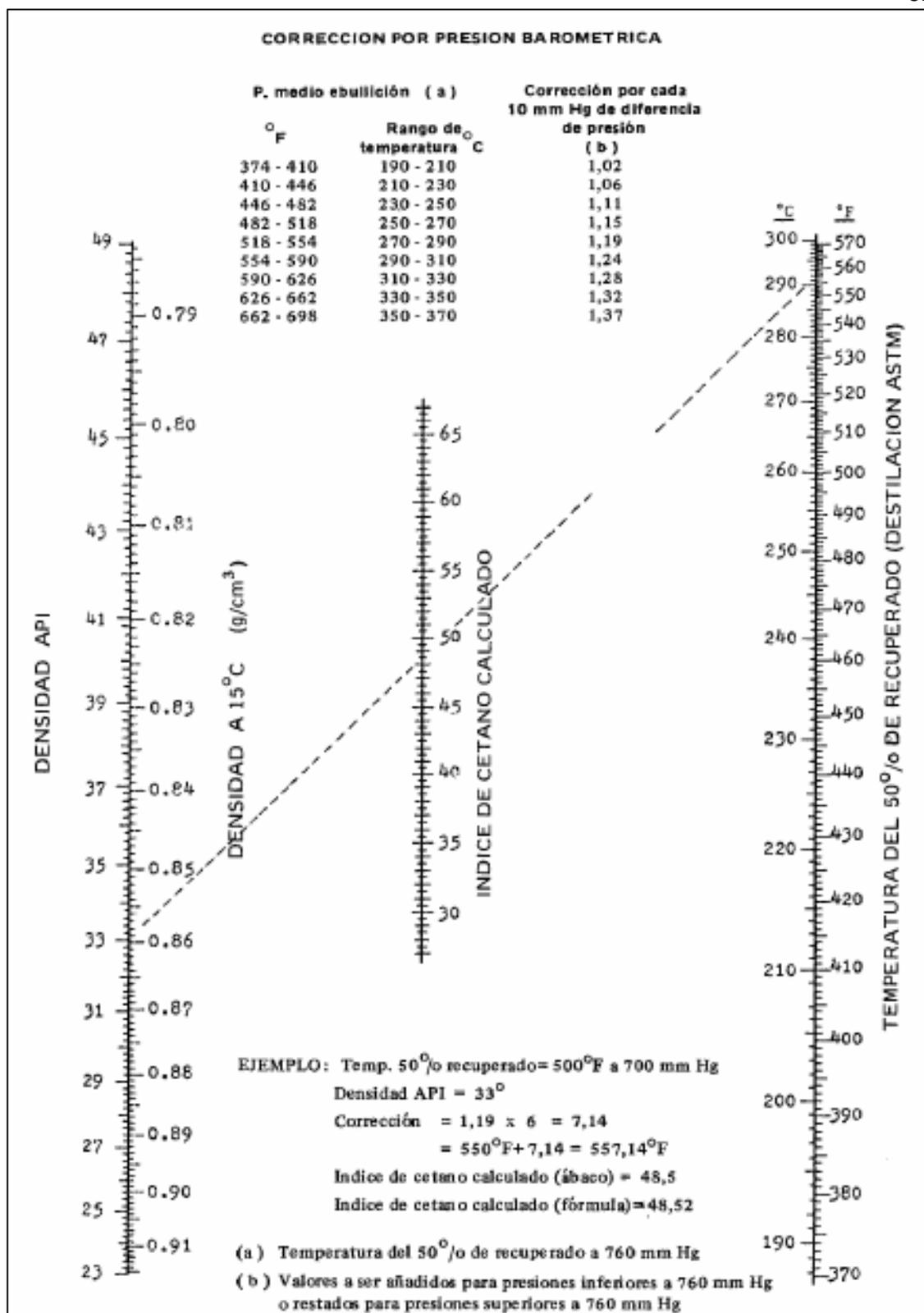


Figura 53: Ábaco para índice de cetano calculado.

Fuente: (INEN 1 495, 1986)

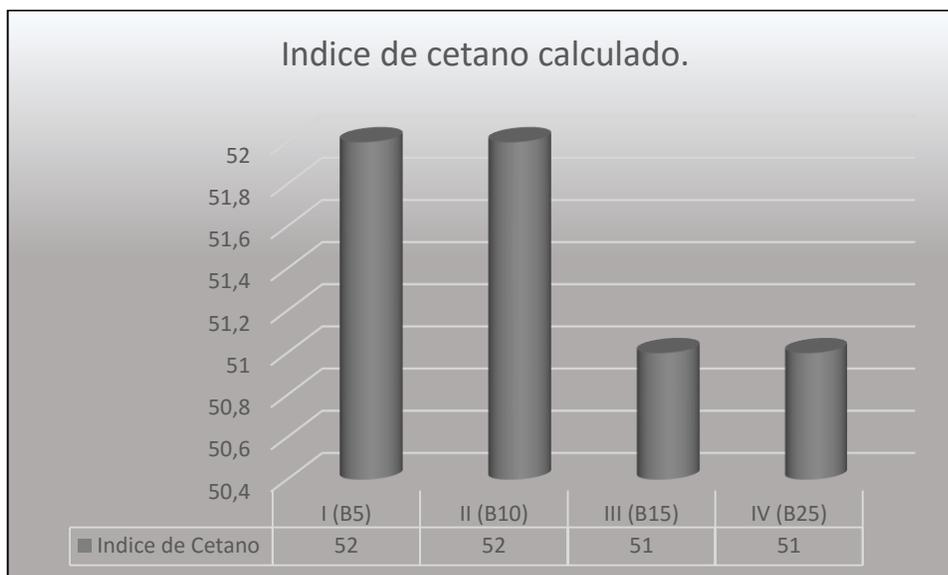


Figura 54: Comparativo del índice de cetano calculado entre muestras.

El índice de cetano permite ver que tan rápido y uniforme es el quemado total del combustible durante el intervalo de encendido. El valor mínimo para el diesel es de 45, la Figura 54 demuestra que B5 y B10 fueron de 52 mientras que las B15 y B25 fueron de 53 por lo que todas las mezclas son aptas para ser alternativas al diesel.

Un índice de cetano elevado demuestra un menor retraso en la ignición del combustible evitando elevación de presiones, ruidos excesivos o aumento de emisiones de gases contaminantes. Un índice de cetano bajo afecta principalmente a los rendimientos térmico y mecánico del motor ocasionándole fatigas.

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y TÉRMICAS DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA CICLO DIESEL CON EL USO DE BIOCOMBUSTIBLE.

4.1 Introducción.

Con el biocombustible obtenido de manera casera y las mezclas en los porcentajes de: 2%, 5%, 10%, 15%, 25% y 50% caracterizados en sus parámetros químicos se procede a realizar las pruebas en el banco de pruebas para establecer las características mecánicas y térmicas en el motor diesel.

Ciertos parámetros y características definen la aptitud del motor para funcionar en diversas condiciones y permitir comparaciones, los parámetros variables de desempeño con son difícil de obtenerse por la cual se determinan en un banco de pruebas con régimen estable y bajo normas establecidas.

Las pruebas de velocidad variable se las llevó a cabo a plena carga (aceleración) para poder determinar la potencia máxima (P_{fmax}) y el consumo específico de combustible (CEC) a diferentes velocidades (N), también puede hacerse a cargas parciales (aceleración parcial) para determinar las variaciones del consumo específico de combustible (CEC).

Para realizar esta investigación se utilizaron los siguientes equipos:

- Banco de pruebas PLINT TE-46.
- Motor Petter AA1.
- Opacímetro Nextech NDO-6000.

Las pruebas se realizaron a plena carga para 13 rangos de velocidades emulando el funcionamiento normal del motor, en la Tabla 25 se puede

observar cuales son las características con las que consta el banco de pruebas y el motor.

Tabla 25

Características del banco de pruebas.

BANCO DE PRUEBAS:	PLINT TE-46		
MOTOR:	PETTER AA1		
SITEMA DE ALIMENTACION:	Inyección directa con bomba lineal.		
CONSTANTES	Símbolo	Unidad	Valor
Diámetro	θ	m	0,07
Carrera	s	m	0,087
# Cilindros	i	-	1
Velocidad Máxima	V_{max}	rpm	3600
Velocidad Mínima	V_{min}	rpm	1200
Volumen de prueba	V_p	cc	25
Brazo de palanca.	B_p	m	0,285

Fuente: Guía de prácticas motor PLINT TE-46.



Figura 55: Motor diesel de prueba.

4.1.1 Elementos constitutivos.

El panel de control consta de: encendido (A), mando elector generador-motor (B), potenciómetro (C), palanca seleccionadora de cargas eléctricas (D), luz

testigo (E), pulsador stop para emergencias (F), voltímetro (G) y amperímetro (H). Todos los elementos se observan en la Figura 56.



Figura 56: Panel de control.

El generador eléctrico inductivo controla el arranque y la velocidad del motor por medio de un grupo de resistencias eléctricas.



Figura 57: Generador eléctrico.

El medidor de muestra de combustible, de la Figura 58, es un tubo de cristal que en su interior tiene dos marcas de 25 cc de volumen y una de 50 cc, sirve para calcular el caudal de combustible.



Figura 58: Medidor de muestra de diesel.

El contador eléctrico mide la cantidad de vueltas que da el cigüeñal en el tiempo que se consume el volumen de prueba, consta de tres pulsadores: uno verde que activa los contadores, un rojo que los detiene y uno amarillo de reset.



Figura 59: Contador electrónico.

El tanque de la Figura 60 fue adaptado al sistema debido a que los tanques del banco de prueba no soportaban el volumen necesario.



Figura 60: Tanque de combustible.

En la Figura 61 se puede ver el sensor de flujo másico de aire (MAF) que entrega sus valores en kilogramo por hora (kg/h), ahorra el trabajo de calcular el consumo másico de aire en base presión manométrica y diámetro del orificio del tanque de agua.

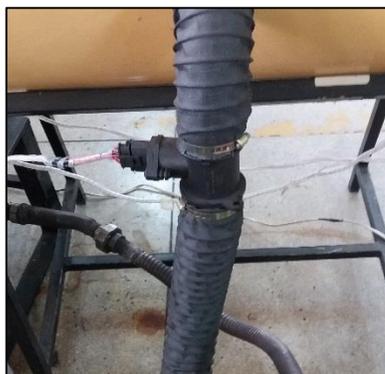


Figura 61: Sensor MAF.

Los gases originados durante la prueba eran enviados a un sistema de enfriamiento y desalajo de gases, debido a que uno de los objetivos es medir la

opacidad de gases se adaptó un sistema de escape hacia el exterior, como se muestra en la Figura 62 soldando una junta de la media del tubo de escape a un tubo de acero.



Figura 62: Adaptación de sistema de escape.

Para que el tubo adaptado lleve los gases contaminantes hacia el exterior se hizo un agujero a la pared de laboratorio, la Figura 63 muestra como quedó el sistema de escape una vez terminadas las adaptaciones.



Figura 63: Tubo de escape hacia el exterior.

El banco de pruebas tiene una interfaz de recolección de datos TIA Portal que usa las señales de los sensores de fuerza, temperatura, velocidad y flujo másico. Esto es una ventaja para obtener datos rápidos y exactos, en la Figura 64 se puede ver el diseño del programa en el monitor de la computadora.

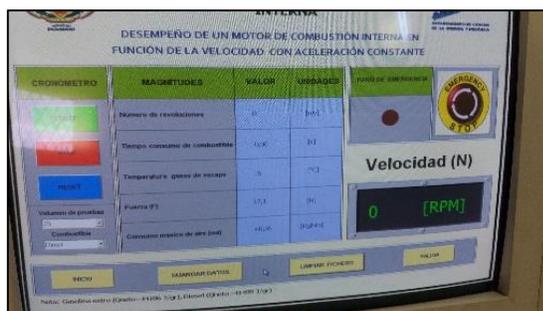


Figura 64: Software TIA de recolección de datos.

4.1.2 Protocolo de uso para el banco y el motor de pruebas.

- Verificar el estado general del banco y la instrumentación involucrada.
- Utilizar protección auditiva como la de la Figura 65 para opacara el ruido que genera el sistema a falta de un silenciador de gases de escape.



Figura 65: Protectores de oídos.

- Chequear en el monitor si existe error de cero para las lectura de fuerza y consumo másico de aire cada vez que se cambie de combustible.
- Encender el motor de suavemente eligiendo la opción de generador del selector, cambiar a la opción motor una vez el motor encienda por completo.
- Calentar el motor a bajas revoluciones (1500 RPM) totalmente acelerado hasta que la temperatura del agua sea más o menos 50°C.
- Realizar todas las pruebas con el acelerador totalmente accionado y asegurado con el freno.
- Establecer el volumen de prueba (25cc) y el tipo de combustible usado en el monitor del computador.
- Seleccionar 3600 rpm de velocidad con la ayuda de la palanca selectora de cargas y estabilizarla usando el potenciómetro.
- Registrar los datos de consumo de combustible cuando el volumen de prueba sobrepasaba las marcas como se indica en la Figura 66.



Figura 66: Medición de consumo de combustible.

- Accionar el contador eléctrico cuando el diesel pase la primera marca y detenerlo cuando pase la segunda marca.
- Registrar los datos de tiempo (t) y número de vueltas ($\#vueltas$) que se observan en la Figura 67, poner en cero los valores con el botón reset.



Figura 67: Datos obtenidos por el contador.

- Registrar los valores de temperatura de gases de escape (T_e), Fuerza (F) y consumo másico de aire (\dot{m}_a) que aparecen en el monitor.



Figura 68: Datos obtenidos por el software TIA.

- Reducir la velocidad al siguiente valor establecido y repetir el procedimiento desde el paso número 9 para las pruebas necesarias.

Se recomienda tener especial cuidado en no sobrepasar los valores límites de velocidad y no exceder los 80°C de la temperatura del agua de refrigeración.

4.2 Desempeño a velocidad variable y aceleración constante.

Para trabajar con datos exactos se encontró la velocidad real (\bar{N}) del motor calculado con la Ecuación 34, no se diferenciaban mucho de los valores teóricos.

$$\bar{N} = \frac{\#vueltas}{t} \cdot 60$$

Ecuación 34. Velocidad de giro real del cigüeñal

Donde:

$\#vueltas$ = Vueltas del cigüeñal.

t = Tiempo (s).

\bar{N} = Velocidad real (rpm)

Se procedió a realizar la medición del número de vueltas que dio el cigüeñal y el tiempo que tardaba en consumirse 25cc de muestra combustible a partir de 3600 rpm hasta las 1200 rpm con intervalos de 200 rpm para después registrarlos en sus debidas tablas de contenido y hacer un análisis de los mismos.

Tabla 26
Vueltas del cigüeñal en consumirse 25cc de muestra.

<i>N</i> (rpm)	<i>#vueltas</i>							
	Diesel	B2	B5	B10	B15	B25	B50	B100
3600	2776	2447	2992	2861	2843	2826	2805	2471
3400	2846	2437	2940	2824	2812	2810	2783	2467
3200	2757	2435	2816	2785	2802	2789	2776	2473

CONTINÚA 

3000	2793	2498	2785	2851	2808	2804	2831	2484
2800	2897	2508	2847	2905	2867	2820	2851	2507
2600	2844	2546	2850	2915	2868	2887	2859	2531
2400	2866	2558	2912	2900	2906	2881	2887	2529
2200	2855	2530	2899	2937	2910	2870	2882	2552
2000	2773	2459	2863	2849	2835	2855	2869	2493
1800	2700	2367	2757	2755	2747	2759	2759	2453
1600	2551	2326	2650	2599	2600	2613	2616	2427
1400	2405	2330	2511	2527	2551	2481	2516	2461
1200	2285	2326	2443	2425	2461	2431	2455	2442

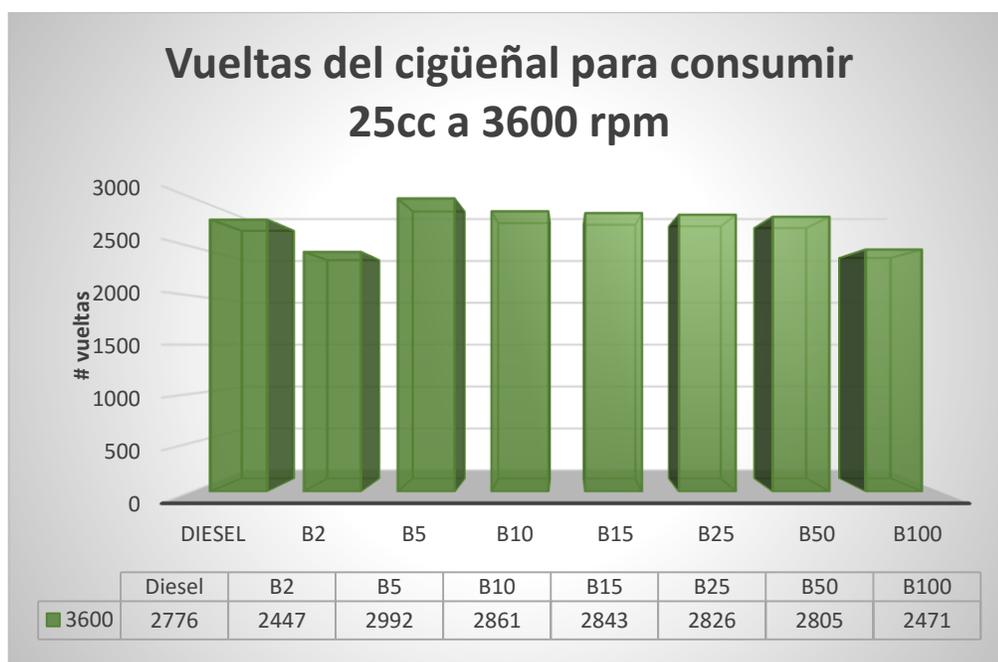


Figura 69: Comparativo de vueltas del cigüeñal a 3600 rpm entre las muestras.

La Figura 69 es un análisis de los datos obtenidos de número de vueltas del cigüeñal para la velocidad teórica 3600 rpm, el mayor consumo por número de vueltas está entre B5, B10 y B15 mientras el de menor consumo fue B2.

**Tabla 27
Tiempo de consumo de 25cc de muestra.**

<i>N</i> (rpm)	<i>t</i> (s)							
	Diesel	B2	B5	B10	B15	B25	B50	B100
3600	46,2	40,9	49,8	47,9	47,5	47,3	47,2	41,6
3400	50,2	43	51,9	49,9	49,8	49,8	49,3	43,7
3200	51,8	45,8	53	53	52,7	52,5	52,2	46,6
3000	56,5	50,2	56	57,2	55,7	56	57,1	50,2

CONTINÚA

2800	62,1	54	61,4	62,7	61,6	60,7	61,7	53,8
2600	65,6	59	66	67,5	66,2	66,9	66,1	58,9
2400	72,1	64,4	72,8	72,8	73,1	71,9	72,5	58,9
2200	78,2	69,3	79	80,5	79,6	78,4	78,8	70,1
2000	83,2	74,2	86,4	86,1	84,9	85,9	86,5	75,5
1800	90,4	79,1	91,8	91,6	91,7	92,6	92,3	81,9
1600	96,2	87,3	99,8	97,8	98	97,1	98,2	91,3
1400	103,5	101,6	108,5	108,7	108,6	110	111,7	105,8
1200	114,1	117,2	140,3	121,1	125,6	121,5	123	122,8

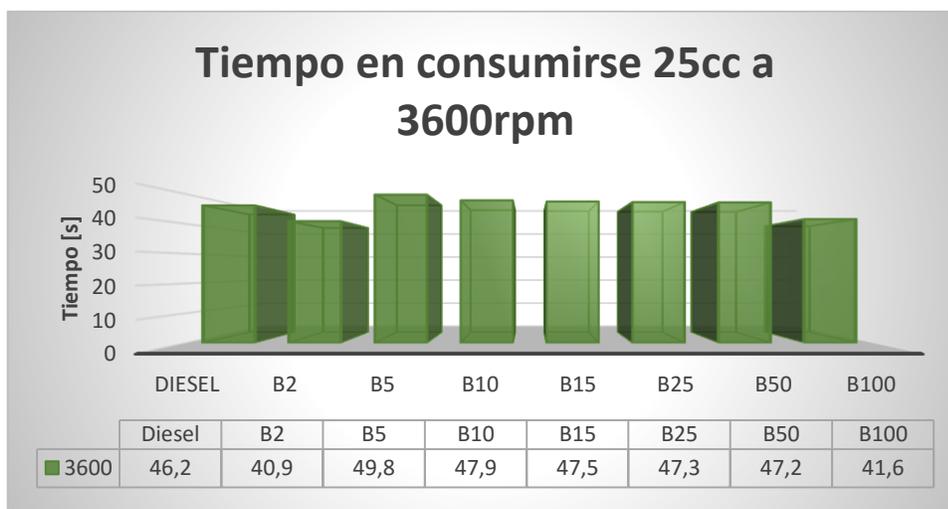


Figura 70: Comparativo de tiempo de consumo a 3600 rpm entre las muestras

La Figura 70 es un análisis de los datos obtenidos del tiempo de consumo para la velocidad teórica 3600 rpm, el que mayor tiempo de consumo tuvo fue B5 con 49,8 segundos mientras el de menor consumo fue B2 con 40,9.

Se usó de los valores del número de vueltas del cigüeñal de la Tabla 26 y los tiempos de consumo del volumen de prueba de la Tabla 27 para obtener la velocidad real de cada mezcla. Para dar un ejemplo se tomó los datos obtenidos de la mezcla B2 a 3600 rpm, utilizando la Ecuación 34 se tiene.

Tabla 28

Datos para ejemplo de cálculo de velocidad real.

DATOS	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD	UBICACIÓN
Vueltas del cigüeñal	# vueltas	2447	-	Tabla 26
Tiempo de consumo	t	40,9	s	Tabla 27

$$\bar{N} = \frac{\#vuel\text{tas}}{t} \cdot 60$$

$$\bar{N} = \frac{2447}{40.9 \text{ s}} \cdot 60 \text{ s}$$

$$\bar{N} = 3589,731 \text{ rpm}$$

El valor real 3589.731 rpm es similar a las 3600 rpm del valor teórico. Los resultados para todas las mezclas en todos los rangos están en la Tabla 29.

Tabla 29
Velocidades reales calculadas.

<i>N</i> (rpm)	\bar{N} (rpm)							
	Diesel	B2	B5	B10	B15	B25	B50	B100
3600	3605,195	3589,731	3604,819	3583,716	3591,158	3584,778	3565,678	3563,942
3400	3401,594	3400,465	3398,844	3395,591	3387,952	3385,542	3387,018	3387,185
3200	3193,436	3189,956	3187,925	3152,830	3190,133	3187,429	3190,805	3184,120
3000	2966,018	2985,657	2983,929	2990,559	3024,776	3004,286	2974,781	2968,924
2800	2799,034	2786,667	2782,085	2779,904	2792,532	2787,479	2772,447	2795,911
2600	2601,220	2589,153	2590,909	2591,111	2599,396	2589,238	2595,159	2578,268
2400	2385,021	2383,230	2400,000	2390,110	2385,226	2404,172	2389,241	2576,231
2200	2190,537	2190,476	2201,772	2189,068	2193,467	2196,429	2194,416	2184,308
2000	1999,760	1988,410	1988,194	1985,366	2003,534	1994,179	1990,058	1981,192
1800	1792,035	1795,449	1801,961	1804,585	1797,383	1787,689	1793,499	1797,070
1600	1591,060	1598,625	1593,186	1594,479	1591,837	1614,624	1598,371	1594,962
1400	1394,203	1375,984	1388,571	1394,848	1409,392	1353,273	1351,477	1395,652
1200	1201,578	1190,785	1044,761	1201,486	1175,637	1200,494	1197,561	1193,160

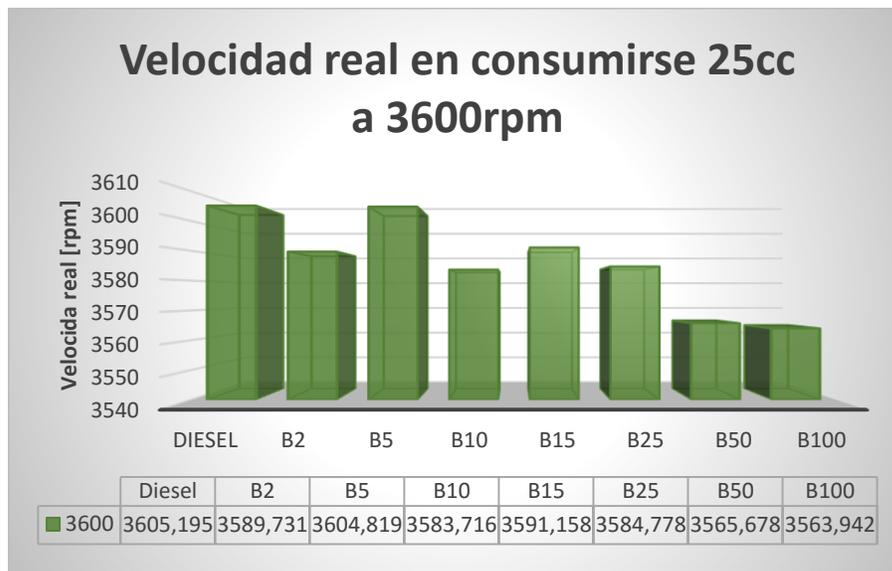


Figura 71: Comparativo de velocidad real a 3600 rpm entre las muestras.

La Figura 71 demuestra que los valores de velocidad real que más se acercaron a la teórica de 3600 rpm fueron dados por el diesel y B5 aunque los demás valores no se alejan demasiado del valor teórico. Otros valores que también se de las pruebas fueron: la fuerza mostrada en la Tabla 30, consumo másico de aire mostrado en la Tabla 31 temperatura de gases de escape mostrados en la Tabla 32.

Tabla 30

Fuerzas obtenidas de pruebas realizadas en el motor.

<i>N</i> (rpm)	<i>F</i> (N)							
	Diesel	B2	B5	B10	B15	B25	B50	B100
3600	55,4	52,6	50,3	50,8	49,9	49,25	49,8	50,53
3400	55,2	52,4	50,4	50,8	51	49,25	49,9	49,55
3200	55	52,6	51,9	51,5	51,45	50,3	49,85	49,95
3000	55,1	52,85	50,8	50,4	51,45	50,2	50,4	49,1
2800	55,45	53,3	52,6	50,6	50,35	49,45	49,2	47,2
2600	54,4	53,5	52,8	52,4	53	53,3	53	49,3
2400	55,2	54,9	48,95	52,9	54,1	50,15	54	49,8
2200	54,6	53,3	48,8	49,75	49,65	49,8	49,6	54,4
2000	54,7	52,8	50,1	49,15	49,75	49,55	49,2	49,35
1800	54,7	51,1	47,8	48,8	54	48,3	48,7	47,6
1600	56,04	51,8	48,1	47,4	48,2	50,1	50,2	49,45
1400	51,5	49,8	48,2	47,4	48,2	47,9	47,4	46,9
1200	51,6	50,5	48,65	46,9	46,8	47,4	47,4	46

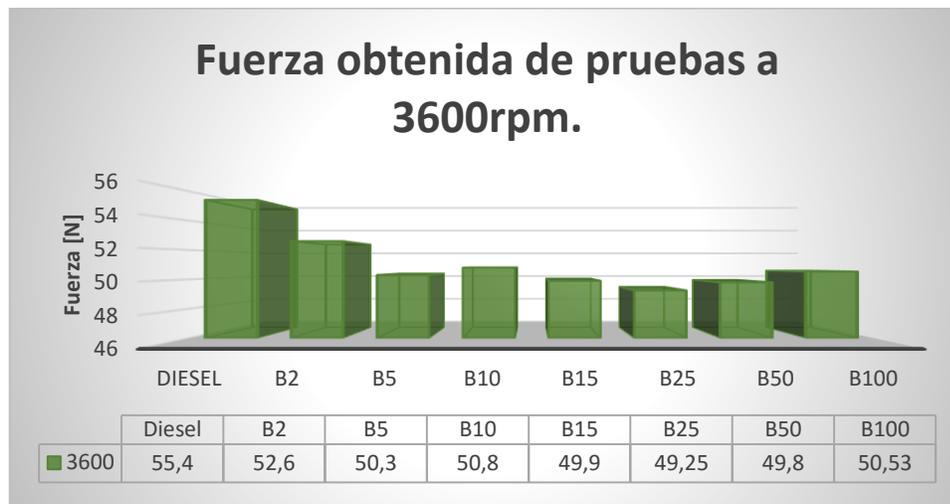


Figura 72: Comparativo de fuerza a 3600 rpm entre las muestras.

La Figura 72 demuestra que los valores de fuerza de todas las mezclas no lograron superar al diesel, quien más cerca estuvo fue el valor de 52,6 N de B2.

Tabla 31

Consumos másico de aire de pruebas realizadas en el motor.

<i>N</i> (rpm)	\dot{m}_a (kg/h)							
	Diesel	B2	B5	B10	B15	B25	B50	B100
3600	30,9	28,4	28,26	28,57	28,8	28,39	29,41	28,65
3400	30,2	29,84	29,26	30,15	27,69	30	30,15	30
3200	30,6	29,85	30	30,75	30,6	30,29	30,3	30,29
3000	26,25	25,36	24,4	26,35	27,59	25,24	25,5	25,62
2800	22,24	22,67	23,22	22,69	22,56	22,46	23	22,48
2600	22,14	22,54	22,24	22,75	22,65	22,56	22,79	22,55
2400	21,41	21,13	21,22	21,52	21,32	21,64	22,03	21,72
2200	18,81	19,05	18,89	18,89	18,84	19,03	18,99	19,14
2000	18	18,13	18,13	18,27	18,58	18,35	18,35	18,31
1800	17,56	17,63	17,49	17,33	17,63	17,29	17,51	17,43
1600	16,8	16,68	16,74	16,85	16,68	16,85	16,62	16,86
1400	16,3	16,51	16,58	16,1	16,39	15,96	16,45	16,86
1200	15,81	15,9	15,8	15,71	15,85	15,8	15,94	15,76

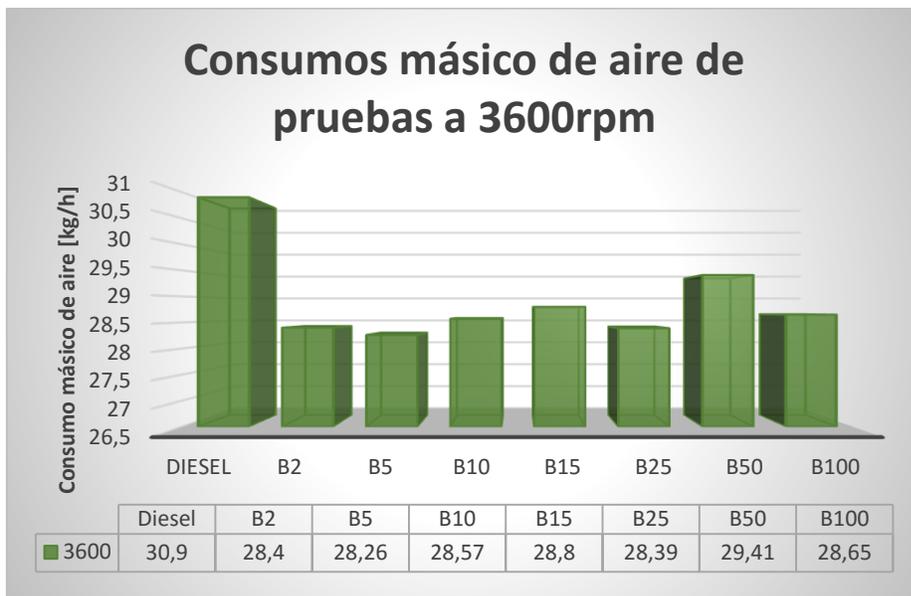


Figura 73: Comparativo de consumo másico de aire a 3600 rpm entre las muestras.

La Figura 73 demuestra el diesel es quien más aire en masa consume a 3600 rpm con 30,9 kg/h seguido por B50 con 29,41 kg/h, mientras quien menos consumo tiene es la muestra B5 con 28,26 kg/h.

Tabla 32
Temperaturas de gases de escape.

<i>N</i> (rpm)	<i>T_e</i> (°C)							
	Diesel	B2	B5	B10	B15	B25	B50	B100
3600	125	116	120	125	122	115	117	118
3400	128	122	122	129	125	123	122	118
3200	128	124	125	130	127	123	125	119
3000	128	124	128	131	127	130	125	123
2800	128	124	126	134	129	132	127	123
2600	128	130	128	134	131	133	128	128
2400	137	132	133	134	134	133	131	130
2200	138	137	139	135	135	134	133	132
2000	140	138	140	138	135	140	133	135
1800	140	138	142	140	130	141	133	135
1600	144	142	145	140	128	140	134	137
1400	142	141	145	141	128	142	134	137
1200	137	139	140	136	132	140	133	138

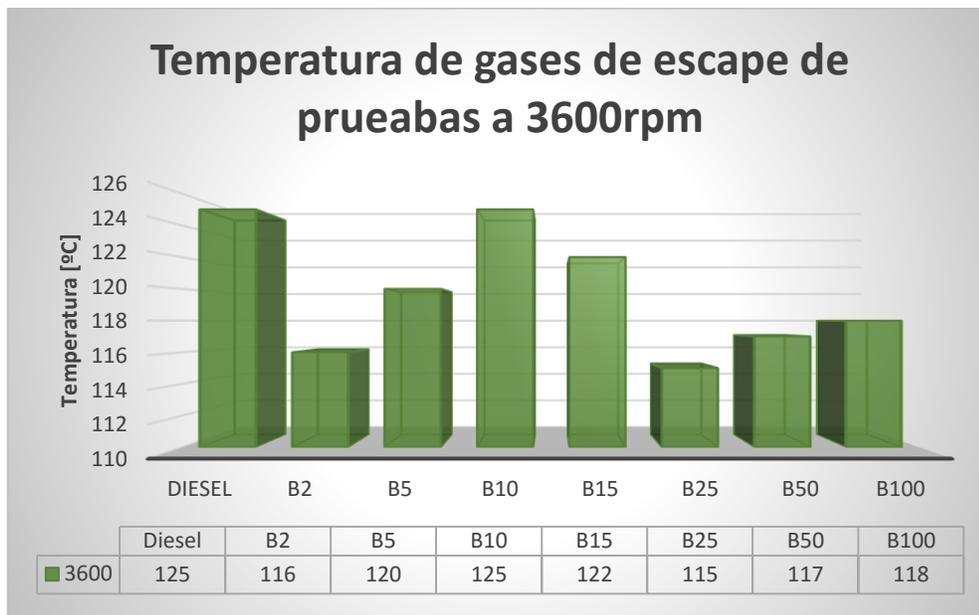


Figura 74: Comparativo de temperatura de gases de escape a 3600 rpm entre las muestras.

La Figura 74 muestra que tanto el diesel como B10 son los picos más altos de temperatura de gases de escape mientras que los más bajos son B5 y B2, los valores crean una curva de comportamiento senoidal.

4.3 Pruebas de opacidad de gases.

4.3.1 Opacómetro.

Se midió la opacidad haciendo uso de un opacómetro marca NEXTECH NDO-6000, las características principales de la máquina se pueden ver en la Tabla 33.

Tabla 33
Características del opacómetro.

Modelo/Producto	NDO-6000/ Medidor de humo de opacidad automotriz
Ítem de medición/Método	Opacidad (%), $k (m^{-1})$, RPM(Opción)
Fuente de luz	LED verde (565nm)
Detector	Fotodiodo
Temperatura de carcasa	Mantener constantemente alrededor de 80°C

CONTINÚA 

Rangos de medida	smoke	0.0~100%	K	0.0~21.42m ⁻¹	RPM	0~8000rp,
Resolución		0.1%		0.01m ⁻¹		↑ 0rpm
Tolerancia				Dentro de ±1%		
Precisión				Dentro de ±1% (RPM: ±80rpm)		
Tiempo de respuesta				0.5 segundos (más 90%)		
Fuente de electricidad		220V/110V AC		50/60 Hz		
Consumo		Cerca de 100 W				
Temperatura de operación		0~40°C(Manguera de la sonda: menos de 300°C)				
Tamaño/peso		450x200x245 mm/Cerca de 7kg				
Longitud de sonda		1m				
Diámetro interno de sonda		10mm				

Fuente: Manual de operación NEXTECH NDO-6000.



Figura 75: Opacómetro NEXTECH NDO-6000.

4.3.2 Protocolo de uso del opacómetro.

- Calibrar el opacómetro poniendo la manguera de la sonda por diez segundos a la altura del suelo como se ve en la Figura 76, la calibración es automática.



Figura 76: Calibración del opacómetro.

- Preparar el aparato para medir porcentaje de humo presionando el botón display hasta que el LED encienda sobre el elemento.
- Acelerar a fondo el motor por tres veces seguidas, esperar por 6 segundos en ralentí para introducir la sonda en el tubo de escape.



Figura 77: Sonda dentro del tubo de escape.

- Presionar la tecla HOLD para evitar picos de valores variables y obtener solamente un valor promedio.
- Presionar la tecla PRINT como muestra la Figura 78 para obtener un informe del valor promedio obtenido.



Figura 78: Impresión de informe.

4.3.3 Opacidad.

La opacidad se mide por el porcentaje de humo en los gases, según la norma NTE INEN 2 207:2002 el humo es “Residuo resultante de la combustión incompleta, que se compone en su mayoría de carbón, cenizas, y de partículas sólidas visibles en el medio ambiente” (p, 2). Mientras mayor sea el porcentaje de humo mayor cantidad de NO_x, CO₂ o partículas de plomo hay en el combustible. Según la norma técnica INEN 2 207:2002 toda fuente móvil con motor de diesel, en condición de aceleración libre, no podrá descargar al aire humos en cantidades superiores a las indicadas en la Tabla 34.

Tabla 34
Límites de opacidad para móviles
con motor de diesel.

Año modelo	% Opacidad
2000 y posteriores	50
1999 y anteriores	60

Fuente: (NTE INEN 2 207, 2002)

El motor Petter AA1 es un motor hecho especialmente para pruebas de desempeño y tiene 25 años de uso, por lo que su índice de opacidad según la norma no debería sobrepasar el 60%. En la Tabla 35 se muestra las medidas de opacidad que se obtuvo para cada uno de los combustibles, estos valores también están representados e en la Figura 79 para saber la tendencia que tomaron los datos obtenidos.

Tabla 35
Porcentajes de opacidad.

Combustible	% Opacidad
Diesel	64,3
B2	59,6
B5	59,2
B10	55,8
B15	53,2
B25	52,1
B50	51,8
B100	29,7

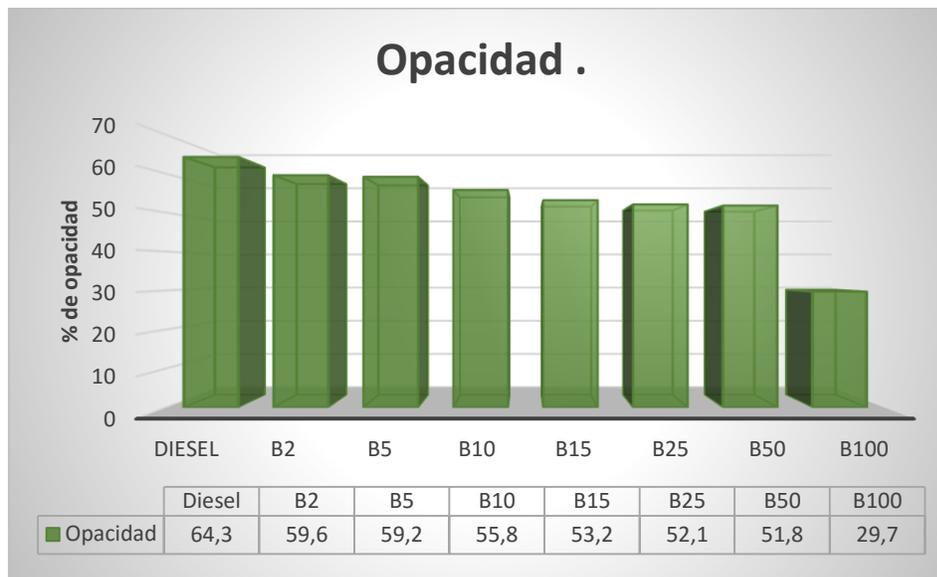


Figura 79: Comparativo de opacidad entre muestras.

La Figura 79 muestra como el porcentaje de opacidad disminuye a medida que aumenta el porcentaje de biodiesel en la muestra, el diesel supera el límite establecido por la norma mientras que todas las mezclas no lo hicieron, el menor porcentaje de opacidad lo tuvo B100 con 29,7% pero no es parte la investigación por lo que el siguiente valor más bajo es de B50 con 51,8% seguido muy cerca de B25 con 52,1%.

4.4 Cálculo de parámetros mecánicos y térmicos.

Para el desarrollo de los cálculos se utilizaron las ecuaciones presentadas en la Figura 80 en el orden establecido.

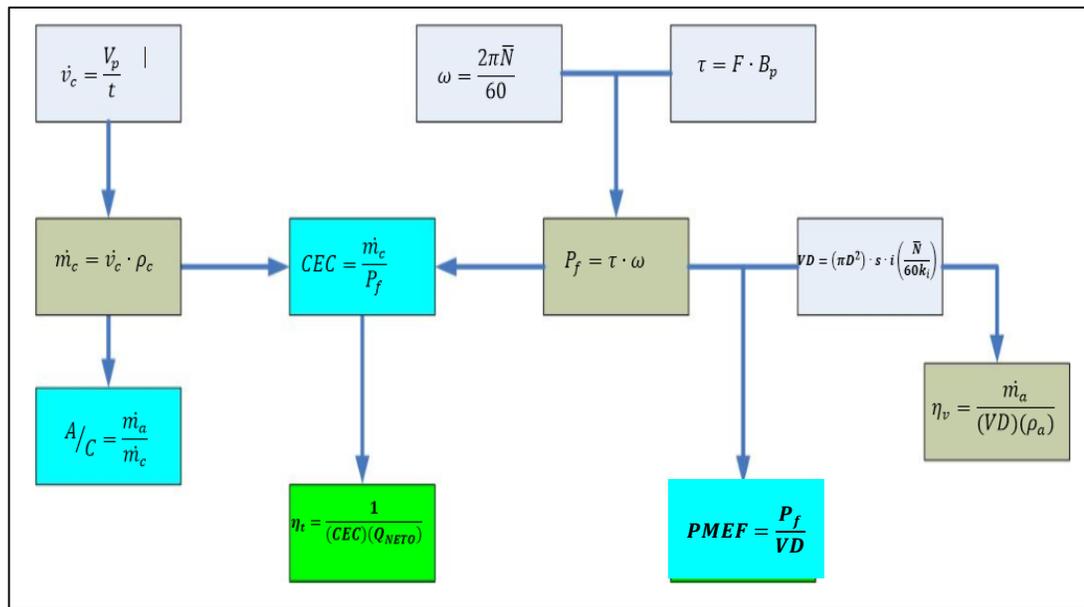


Figura 80: Diagrama de fórmulas

El diagrama consta de cuatro niveles por los cuales los datos obtenidos deben pasar antes de encontrar todos los valores requeridos:

El primer nivel consta de las ecuaciones de: caudal de combustible, velocidad, torque y consumo volumétrico de aire teórico, estos valores se pueden calcular usando los datos obtenidos de las pruebas.

El segundo nivel consta de las ecuaciones de: consumo másico de combustible, potencia el freno y eficiencia volumétrica, para realizarlas es necesario los cálculos del primer nivel además de las densidades de los combustibles y la densidad del aire.

El tercer nivel consta de las ecuaciones de: relación aire combustible, consumo específico, presión media efectiva, para realizarlas es necesario los cálculos del primer y segundo nivel además del consumo másico de aire. El cuarto y último nivel lo conforma la ecuación de la eficiencia térmica, para encontrar este valor es necesario el consumo específico de combustible calculado en el tercer nivel y el valor del poder calorífico neto.

4.4.1 Ejemplo de cálculo para obtención de valores requeridos.

Se tomó los valores obtenidos durante la prueba para B2 a 3600 RPM aplicando las ecuaciones de primer nivel, los datos están en la Tabla 36.

Tabla 36
Datos para ejemplo de cálculo, ecuaciones de primer nivel.

DATOS	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD	UBICACIÓN
Brazo de palanca	B_p	0,285	M	
Diámetro	D	0,07	M	
Carrera	s	0,087	M	Tabla 25
# De cilindros	i	1	-	
Tiempo de consumo	t	40,9	S	Tabla 27
Velocidad real	\bar{N}	3589,731	rpm	Tabla 29
Fuerza	F	52,6	N	Tabla 30
Volumen de prueba	V_p	25	cc	Prueba.
Constante del dinamómetro	k_i	2	-	Para motores 4 tiempos

La velocidad angular en rad/seg se calculó utilizando la Ecuación 1:

$$\omega = \frac{2\pi\bar{N}}{60}$$

$$\omega = \frac{2\pi(3589,731 \text{ rpm})}{60}$$

$$\omega = 375,916 \text{ rad/seg}$$

Los valores calculados de velocidad angular están en la Tabla 38. El torque se calculó utilizando la Ecuación 2.

$$\tau = F \cdot B_p$$

$$\tau = 52,6 \text{ N} \cdot 0,285 \text{ m}$$

$$\tau = 14,99 \text{ Nm}$$

Los valores calculados de torque están en la Tabla 39. El caudal de combustible fue calculado utilizando la Ecuación 4.

$$\dot{v}_c = \frac{V_p}{t}$$

$$\dot{v}_c = \frac{25cc}{40,9s} * 3,6 \times 10^{-3}$$

$$\dot{v}_c = 0,0022 \text{ m}^3/h$$

Los valores calculados de caudal de combustible están en la Tabla 40. El consumo volumétrico de aire teórico es calculado con la Ecuación 11.

$$V_D = \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right) (s)(i) \left(\frac{\bar{N}}{60k_i} \right)$$

$$V_D = \left(\frac{\pi \cdot (0,07m)^2}{4} \right) (0,087m)(1) \left(\frac{3589,731rpm}{60 \cdot 2} \right)$$

$$V_D = (0,0038 \text{ m}^2)(0,087m)(29,91rpm)$$

$$V_D = 0,01002 \text{ m}^3/min$$

Los valores de consumo volumétrico de aire teórico están en la Tabla 41.

Las ecuaciones de segundo nivel desarrollaron con los valores calculados en el primer nivel y los siguientes datos mostrados en la Tabla 37:

Tabla 37

Datos para ejemplo de cálculo, ecuaciones de segundo nivel.

DATOS	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD	UBICACIÓN
Densidad del combustible	ρ	831	kg/m^3	Tabla13
Densidad del aire	ρ_a	0,867	kg/m^3	Condiciones ambientales Quito
Consumo másico de aire	\dot{m}_a	28,4	kg/h	Tabla 31

La Potencia al freno se calculó utilizando la Ecuación 3.

$$P_f = \tau \cdot \omega$$

$$P_f = 14,99Nm \cdot 375,916 \frac{rad}{s}$$

$$P_f = 5634,98W * \frac{1kW}{1000W}$$

$$P_f = 5,63kW$$

Los valores calculados de potencia el freno están en la Tabla 42. El consumo másico de combustible es calculado utilizando la Ecuación 6.

$$\begin{aligned} \dot{m}_c &= (\dot{v}_c)(\rho) \\ \dot{m}_c &= \left(0,0022 \frac{m^3}{h}\right) \left(831 \frac{kg}{m^3}\right) \\ \dot{m}_c &= 1,82 \frac{kg}{h} \end{aligned}$$

Los valores calculados de consumo másico de aire están en la Tabla .La eficiencia volumétrica es calculada utilizando la Ecuación 14.

$$\begin{aligned} n_v &= \frac{\dot{m}_a}{(VD)(\rho_a)} \\ n_v &= \frac{28,4 \frac{kg}{h}}{\left(0,01002 \frac{m^3}{min}\right) \left(0,867 \frac{kg}{m^3}\right)} \\ n_v &= \frac{28,4 \frac{kg}{h} * \frac{1h}{60min}}{0,0086 \frac{kg}{min}} \\ n_v &= 54,508 \% \end{aligned}$$

Los valores calculados de eficiencia volumétrica se muestran en la Tabla 43.

Las ecuaciones de tercer nivel se desarrollaron con los valores calculados en el primer y segundo nivel junto con el consumo másico de combustible.

La relación aire/combustible se calculó utilizando la Ecuación 7.

$$A/C = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_c}$$

$$A/C = \frac{28,4 \frac{kg}{h}}{1,82 \frac{kg}{h}}$$

$$A/C = 15,6$$

Los valores calculados de relación aire/combustible están en la Tabla 44. El consumo específico de combustible se calcula utilizando la Ecuación 8.

$$CEC = \frac{\dot{m}_c}{P_f}$$

$$CEC = \frac{1,82 \frac{kg}{h}}{5,63kW}$$

$$CEC = 0,32 \frac{kg}{kW \cdot h}$$

Los valores calculados de consumo específico de combustible están en la Tabla 45. La presión media efectiva se calcula utilizando la Ecuación 12.

$$PME = \frac{P_f}{V_D}$$

$$PME = \frac{5,63kW}{0,01002 \frac{m^3}{s}}$$

$$PME = 562,64KPa$$

Los valores calculados de presión media efectiva se muestran en la Tabla 46.

La ecuación del cuarto nivel se desarrolló con los valores calculados en el primer, segundo y tercer nivel y el calor específico neto que se encuentra en la Tabla 20.

La eficiencia térmica se calcula utilizando la Ecuación 13.

$$n_T = \frac{1}{(CEC)(Q_{NETO})}$$

$$n_T = \frac{1}{\left(0,32 \frac{kg}{kW \cdot h}\right) \left(43,44 \frac{MJ}{kg}\right)}$$

$$n_T = \frac{1}{\left(\frac{0,32kg}{3600KNm}\right)\left(43,44\frac{1000KNm}{kg}\right)}$$

$$n_T = \frac{1}{(0,000088)(43440)}$$

$$n_T = 0,255 * 100\% = 25,5\%$$

Los valores calculados de eficiencia térmica están en la Tabla 47.

4.4.2 Velocidad angular.

Tabla 38
Datos de velocidad angular calculados.

<i>N</i> (rpm)	ω (rad/seg)							
	Diesel	B2	B5	B10	B15	B25	B50	B100
3600	377,535	375,916	377,496	375,286	376,065	375,397	373,397	373,215
3400	356,214	356,096	355,926	355,585	354,785	354,533	354,688	354,705
3200	334,416	334,051	333,839	330,164	334,070	333,787	334,140	333,440
3000	310,601	312,657	312,476	313,171	316,754	314,608	311,518	310,905
2800	293,114	291,819	291,339	291,111	292,433	291,904	290,330	292,787
2600	272,399	271,135	271,319	271,341	272,208	271,144	271,764	269,996
2400	249,759	249,571	251,327	250,292	249,780	251,764	250,201	269,782
2200	229,393	229,386	230,569	229,239	229,699	230,009	229,799	228,740
2000	209,414	208,226	208,203	207,907	209,810	208,830	208,398	207,470
1800	187,662	188,019	188,701	188,976	188,221	187,206	187,815	188,189
1600	166,615	167,408	166,838	166,973	166,697	169,083	167,381	167,024
1400	146,001	144,093	145,411	146,068	147,591	141,714	141,526	146,152
1200	125,829	124,699	109,407	125,819	123,112	125,715	125,408	124,947

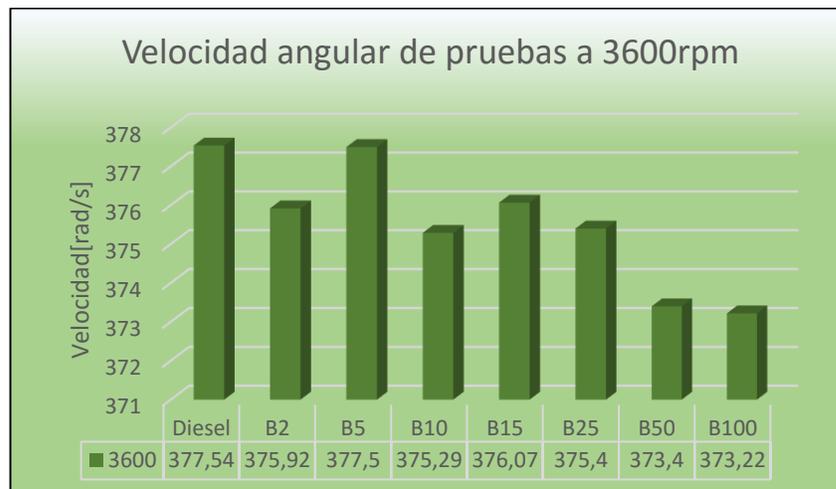


Figura 81: Comparativo de velocidad angular entre muestras.

La Figura 81 demuestra que el comportamiento de la velocidad angular de B5 es similar a la del diesel, mientras que B50 y B100 son las que generaron una velocidad más baja apenas superando los 373 rad/seg.

4.4.3 Torque

Tabla 39
Datos de torque calculados.

<i>N</i> (rpm)	τ (N.m)							
	Diesel	B2	B5	B10	B15	B25	B50	B100
3600	15,789	14,991	14,336	14,478	14,222	14,036	14,193	14,401
3400	15,732	14,934	14,364	14,478	14,535	14,036	14,222	14,122
3200	15,675	14,991	14,792	14,678	14,663	14,336	14,207	14,236
3000	15,704	15,062	14,478	14,364	14,663	14,307	14,364	13,994
2800	15,803	15,191	14,991	14,421	14,350	14,093	14,022	13,452
2600	15,504	15,248	15,048	14,934	15,105	15,191	15,105	14,051
2400	15,732	15,647	13,951	15,077	15,419	14,293	15,390	14,193
2200	15,561	15,191	13,908	14,179	14,150	14,193	14,136	15,504
2000	15,590	15,048	14,279	14,008	14,179	14,122	14,022	14,065
1800	15,590	14,564	13,623	13,908	15,390	13,766	13,880	13,566
1600	15,971	14,763	13,709	13,509	13,737	14,279	14,307	14,093
1400	14,678	14,193	13,737	13,509	13,737	13,652	13,509	13,367
1200	14,706	14,393	13,865	13,367	13,338	13,509	13,509	13,110



Figura 82: Comparativo de torque entre muestras.

La Figura 82 demuestra que el comportamiento del torque en las muestras es menor que en el diesel, la muestra que tiene el valor más cercano es B2 con 14,99 Nm mientras que las demás mantienen valores bajos no muy alejados.

4.4.4 Potencia al freno.

Tabla 40

Datos de potencia al freno.

<i>N</i> (rpm)	<i>P_f</i> (Kw)							
	diesel	B2	B5	B10	B15	B25	B50	B100
3600	5,961	5,635	5,412	5,433	5,348	5,269	5,300	5,375
3400	5,604	5,318	5,113	5,148	5,157	4,976	5,044	5,009
3200	5,242	5,008	4,938	4,846	4,899	4,785	4,747	4,747
3000	4,878	4,709	4,524	4,498	4,645	4,501	4,475	4,351
2800	4,632	4,433	4,367	4,198	4,196	4,114	4,071	3,939
2600	4,223	4,134	4,083	4,052	4,112	4,119	4,105	3,794
2400	3,929	3,905	3,506	3,774	3,851	3,598	3,851	3,829
2200	3,570	3,484	3,207	3,250	3,250	3,265	3,248	3,546
2000	3,265	3,133	2,973	2,912	2,975	2,949	2,922	2,918
1800	2,926	2,738	2,571	2,628	2,897	2,577	2,607	2,553
1600	2,661	2,471	2,287	2,256	2,290	2,414	2,395	2,354
1400	2,143	2,045	1,998	1,973	2,027	1,935	1,912	1,954
1200	1,850	1,795	1,660	1,682	1,642	1,698	1,694	1,638



Figura 83: Comparativo de torque entre muestras.

La Figura 83 demuestra que el comportamiento de la potencia al freno en las muestras es menores a la del diesel al igual que el torque porque ambas están relacionadas, al igual que con el torque el valor más cercano al diesel es de B2 con 5,63 kW mientras las demás muestras se mantienen bajas pero estables.

4.4.5 Caudal de combustible.

Tabla 41

Datos calculados de caudal de combustible.

<i>N</i> (rpm)	Q_c (m^3/h)							
	Diesel	B2	B5	B10	B15	B25	B50	B100
1200	0,00079	0,00077	0,00064	0,00074	0,00072	0,00074	0,00073	0,00073
1400	0,00087	0,00089	0,00083	0,00083	0,00083	0,00082	0,00081	0,00085
1600	0,00094	0,00103	0,00090	0,00092	0,00092	0,00093	0,00092	0,00099
1800	0,00100	0,00114	0,00098	0,00098	0,00098	0,00097	0,00098	0,00110
2000	0,00108	0,00121	0,00104	0,00105	0,00106	0,00105	0,00104	0,00119
2200	0,00115	0,00130	0,00114	0,00112	0,00113	0,00115	0,00114	0,00128
2400	0,00125	0,00140	0,00124	0,00124	0,00123	0,00125	0,00124	0,00153
2600	0,00137	0,00153	0,00136	0,00133	0,00136	0,00135	0,00136	0,00153
2800	0,00145	0,00167	0,00147	0,00144	0,00146	0,00148	0,00146	0,00167
3000	0,00159	0,00179	0,00161	0,00157	0,00162	0,00161	0,00158	0,00179
3200	0,00174	0,00197	0,00170	0,00170	0,00171	0,00171	0,00172	0,00193
3400	0,00179	0,00209	0,00173	0,00180	0,00181	0,00181	0,00183	0,00206
3600	0,00195	0,00220	0,00181	0,00188	0,00189	0,00190	0,00191	0,00216



Figura 84: Comparativo de torque entre muestras.

La Figura 84 demuestra que el comportamiento del caudal de combustible se mantiene para la mayoría de las muestras a excepción de B2 y B100, un mayor caudal demuestra que el combustible transcurre más rápido en el sistema de alimentación lo que puede contribuir a un mejor llenado.

4.4.6 Consumo másico de combustible.

Tabla 42

Datos calculados de consumo másico de combustible.

N (rpm)	\dot{m}_c (kg/h)							
	Diesel	B2	B5	B10	B15	B25	B50	B100
1200	0,656	0,638	0,534	0,618	0,599	0,620	0,618	0,631
1400	0,723	0,736	0,691	0,689	0,693	0,685	0,681	0,732
1600	0,778	0,857	0,751	0,766	0,768	0,776	0,775	0,848
1800	0,828	0,946	0,817	0,817	0,821	0,814	0,824	0,946
2000	0,899	1,008	0,868	0,870	0,887	0,877	0,879	1,026
2200	0,957	1,079	0,949	0,930	0,946	0,961	0,965	1,105
2400	1,038	1,161	1,030	1,028	1,030	1,048	1,049	1,315
2600	1,141	1,268	1,136	1,109	1,137	1,127	1,151	1,315
2800	1,205	1,385	1,221	1,194	1,222	1,242	1,233	1,439
3000	1,325	1,490	1,339	1,309	1,351	1,346	1,332	1,543
3200	1,445	1,633	1,415	1,413	1,428	1,436	1,457	1,662
3400	1,491	1,739	1,445	1,500	1,512	1,513	1,543	1,772
3600	1,620	1,829	1,506	1,563	1,585	1,593	1,612	1,862



Figura 85: Comparativo de consumo másico de combustible entre muestras.

La Figura 81 demuestra que el B2 y B100 son las muestras que más consumo tienen, esto depende del caudal por lo que el comportamiento de esta gráfica tiene relación con ella, también depende de la densidad del combustible por lo que un combustible más denso como B100 consume más que uno como B5.

4.4.7 Relación aire-combustible.

Tabla 43

Datos calculados de relación aire-combustible.

<i>N</i> (rpm)	<i>A/c</i>							
	Diesel	B2	B5	B10	B15	B25	B50	B100
1200	19,076	15,531	18,768	18,278	18,173	17,818	18,249	15,390
1400	20,258	17,156	20,251	20,094	18,319	19,823	19,540	16,928
1600	21,181	18,280	21,203	21,767	21,423	21,100	20,793	18,226
1800	19,819	17,022	18,222	20,131	20,415	18,754	19,141	16,607
2000	18,455	16,368	19,012	19,002	18,461	18,089	18,656	15,617
2200	19,408	17,781	19,574	20,510	19,919	20,026	19,804	17,150
2400	20,628	18,195	20,601	20,925	20,704	20,645	20,997	16,519
2600	19,656	17,652	19,901	20,310	19,922	19,796	19,672	17,325
2800	20,012	17,987	20,889	21,010	20,955	20,915	20,867	17,850
3000	21,212	18,646	21,411	21,202	21,477	21,244	21,246	18,433
3200	21,596	19,470	22,279	22,010	21,715	21,709	21,456	19,876
3400	22,544	22,428	23,990	23,374	23,646	23,294	24,156	23,033
3600	24,105	24,916	27,454	25,410	26,446	25,472	25,775	24,990



Figura 86: Comparativo de relación aire/combustible entre muestras.

La Figura 86 demuestra que la relación A/C en B5 es la más parecida al diesel, mientras que las muestras B2 y B100 son las de menor relación entre ellas, los motores diesel trabajan con mezcla pobre que su relación debe ser mayor por lo que una relación alta es la más indicada para este motor.

4.4.8 Consumo específico de combustible.

Tabla 44

Datos calculados de consumo específico de combustible.

<i>N</i> (rpm)	<i>CEC</i> ($kg/kW.h$)							
	Diesel	B2	B5	B10	B15	B25	B50	B100
3600	0,272	0,324	0,278	0,288	0,296	0,302	0,304	0,346
3400	0,266	0,327	0,283	0,291	0,293	0,304	0,306	0,354
3200	0,276	0,326	0,287	0,292	0,292	0,300	0,307	0,350
3000	0,272	0,316	0,296	0,291	0,291	0,299	0,298	0,355
2800	0,260	0,312	0,280	0,284	0,291	0,302	0,303	0,365
2600	0,270	0,307	0,278	0,274	0,277	0,274	0,280	0,347
2400	0,264	0,297	0,294	0,273	0,267	0,291	0,272	0,343
2200	0,268	0,310	0,296	0,286	0,291	0,294	0,297	0,312
2000	0,276	0,322	0,292	0,299	0,298	0,298	0,301	0,352
1800	0,283	0,345	0,318	0,311	0,283	0,316	0,316	0,370
1600	0,292	0,347	0,329	0,339	0,335	0,321	0,323	0,360
1400	0,337	0,360	0,346	0,349	0,342	0,354	0,356	0,375
1200	0,354	0,356	0,347	0,368	0,365	0,365	0,365	0,385

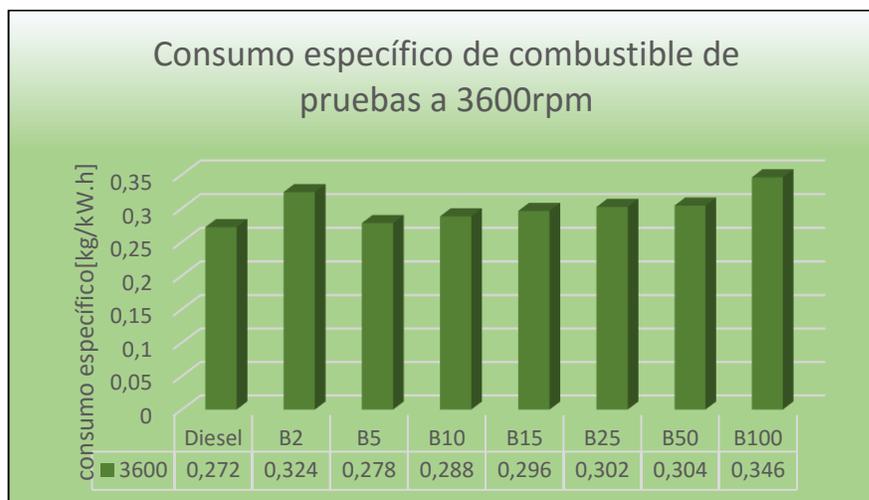


Figura 87: Comparativo de consumo específico de combustible entre muestras.

La Figura 87 demuestra que el consumo específico aumenta en todas las muestras con relación al diesel, se debe a que es proporcional al consumo másico de combustible y su densidad, la muestra con menor valor es B5.

4.4.9 Presión media efectiva.

Tabla 45

Datos de presión media efectiva.

<i>N</i> (rpm)	<i>PME (KPas)</i>							
	Diesel	B2	B5	B10	B15	B25	B50	B100
3600	592,597	562,646	538,044	543,392	533,765	526,812	532,695	540,504
3400	590,457	560,507	539,113	543,392	545,531	526,812	533,765	530,021
3200	588,318	562,646	555,158	550,880	550,345	538,044	533,230	534,300
3000	589,388	565,320	543,392	539,113	550,345	536,974	539,113	525,208
2800	593,132	570,134	562,646	541,253	538,578	528,951	526,277	504,884
2600	581,900	572,273	564,785	560,507	566,925	570,134	566,925	527,347
2400	590,457	587,248	523,603	565,855	578,691	536,439	577,621	532,695
2200	584,039	570,134	521,999	532,160	531,091	532,695	530,556	581,900
2000	585,109	564,785	535,904	525,742	532,160	530,021	526,277	527,882
1800	585,109	546,601	511,302	521,999	577,621	516,650	520,929	509,163
1600	599,443	554,089	514,511	507,023	515,581	535,904	536,974	528,951
1400	550,880	532,695	515,581	507,023	515,581	512,372	507,023	501,675
1200	551,949	540,183	520,394	501,675	500,605	507,023	507,023	492,048



Figura 88: Comparativo de presión media efectiva entre muestras.

La Figura 88 muestra que la mayor presión media efectiva pertenece al diesel al igual que la potencia al freno debido a que ambas están relacionadas, el valor más cercano de entre las muestras es B2, mientras mayor sea la presión mayor será el trabajo ejercido por la combustión al pistón dentro de la cámara.

4.4.10 Eficiencia térmica

Tabla 46

Datos calculados de eficiencia térmica.

<i>N</i> (rpm)	η_t (%)							
	Diesel	B2	B5	B10	B15	B25	B50	B100
3600	29,863	25,539	30,720	30,167	29,452	29,775	31,086	27,626
3400	30,506	25,338	30,246	29,777	29,773	29,606	30,904	27,046
3200	29,445	25,414	29,833	29,771	29,929	30,011	30,795	27,331
3000	29,883	26,195	28,879	29,825	29,993	30,113	31,752	26,985
2800	31,193	26,524	30,568	30,511	29,968	29,832	31,215	26,181
2600	30,042	27,027	30,716	31,705	31,556	32,919	33,720	27,608
2400	30,720	27,865	29,096	31,843	32,638	30,909	34,693	27,866
2200	30,269	26,757	28,878	30,329	29,995	30,576	31,811	30,717
2000	29,454	25,762	29,279	29,065	29,281	30,263	31,412	27,221
1800	28,679	24,000	26,900	27,906	30,795	28,508	29,901	25,834
1600	27,760	23,907	26,019	25,571	26,017	28,006	29,224	26,554
1400	24,051	23,024	24,705	24,862	25,526	25,423	26,539	25,538
1200	22,895	23,307	24,658	23,607	23,911	24,651	25,896	24,854



Figura 89: Comparativo de eficiencia térmica entre muestras.

La Figura 89 muestra que B5, B10 y B50 superan el valor de eficiencia térmica del diesel siendo B50 quien mayor eficiencia tenga, mientras mayor calor desprenda el motor menor será su rendimiento por lo que una eficiencia mayor es lo más conveniente.

4.4.11 Eficiencia volumétrica.

Tabla 47

Datos de eficiencia volumétrica.

<i>N</i> (rpm)	η_v (%)							
	Diesel	B2	B5	B10	B15	B25	B50	B100
3600	59,052	54,508	54,013	54,927	55,254	54,564	56,828	55,386
3400	61,169	60,460	59,313	61,176	56,311	61,052	61,330	61,022
3200	66,019	64,471	64,836	67,197	66,087	65,473	65,426	65,541
3000	60,976	58,521	56,339	60,706	62,844	57,883	59,060	59,455
2800	54,743	56,050	57,504	56,235	55,660	55,514	57,157	55,396
2600	58,642	59,979	59,141	60,492	60,035	60,031	60,504	60,259
2400	61,849	61,086	60,917	62,034	61,583	62,015	63,527	58,087
2200	59,162	59,919	59,111	59,454	59,177	59,694	59,623	60,372
2000	62,016	62,820	62,827	63,402	63,893	63,398	63,530	63,675
1800	67,512	67,653	66,873	66,165	67,580	66,636	67,265	66,825
1600	72,749	71,888	72,393	72,809	72,194	71,901	71,641	72,830
1400	80,550	82,668	82,266	79,525	80,122	81,256	83,862	83,231
1200	90,654	91,996	95,209	90,087	92,888	90,678	91,706	91,005



Figura 90: Comparativo de eficiencia volumétrica entre muestras.

La Figura 90 muestra que el diesel es quien mayor eficiencia volumétrica tiene con 59,05% mientras que de entre las mezclas quien mayor rendimiento tiene es B50 con 56,82%, la eficiencia volumétrica calcula el rendimiento que tiene el aire absorbido por el motor durante el ciclo, a mayor rendimiento mayor aprovechamiento del aire y se tendría una mejor mezcla estequiometria.

CAPÍTULO V.

5. MARCO ADMINISTRATIVO.

5.1 Generalidades

En este capítulo se presenta los recursos necesarios que permitieron ejecutar el manejo de los recursos, tiempo y presupuestos para el desarrollo de las distintas actividades del proyecto.

5.2 Factibilidad del proyecto.

Si bien la implementación de un sistema para reemplazar o disminuir el consumo de combustibles fósiles por biocombustible suena como una gran solución a mediano plazo para la reducción de gases de invernadero la realidad es que aún existen inconvenientes que causan debates y polémica.

El tema más debatido trata sobre el material orgánico base para los biocombustibles, por lo general suelen usarse semillas, frutas o verduras fáciles de sembrar y cultivar sin excesivos gastos de dinero, el problema se genera cuando los agricultores vean que sus cultivos generan más ganancias en la industria de los biocombustibles que en la alimentaria generando un desabastecimiento de alimentos hacia la población, la implementación de monocultivos para biocombustibles causaría problemas como los que menciona Bravo E. (2010) en su obra:

- Se incrementan recursos primarios inorgánicos, para producir fertilizantes en un 100 %.
- Se incrementan desechos no radiactivos, principalmente gipsium, un producto generado por la producción de fertilizantes de fosfato en 98 %.
- Se incrementan desechos radiactivos por el suministro de electricidad generada de las plantas nucleares en un 90 %.

- Se incrementan oxidantes fotoquímicos, especialmente hexano, en soluciones basadas en extracción de aceites, en casi un 70 %.
- Se incrementa el uso de agua en un 30 %.
- Se incrementa la acidificación de los óxidos de nitrógeno y sulfato y amonio, expulsados durante el crecimiento de cultivos de colza y también durante la combustión de biodiesel en un 15 %. “ (pág. 35)

Existen estudios realizados por la Universidad de Michigan que demuestran que el uso de biocombustibles aumenta las cantidades de CO_2 , los gases emanados son mayores a los absorbidos por las plantas de cosechas, no se nota una real reducción de gases de invernadero que justifique a los biocombustibles como alternativas.

El biodiesel de semillas de girasol se encuentra dentro del grupo de los biocombustibles de primera generación que son los más utilizados por sobre los de segunda generación compuestos por celulosa, con el aumento de la tecnología ya se encuentran en plan piloto biocombustibles de tercera generación a base de cultivos energéticos mientras que los de cuarta generación aún se encuentran en fase teórica.

Obtener un biocombustible de primera generación como el de aceite de girasol es fácil, barato y rentable hasta que las demás generaciones mejoren sus métodos lo cual está planeado para 5 años más.

La ONU ha abogado para la producción y uso de biocombustibles en países en vía de desarrollo desmintiendo que su producción ponga en peligro la producción de alimentos, pero existen organizaciones como la APPA (Asociación de empresas de energía renovables) que culpa a los biocombustibles del alza de precios de su materia prima incluso productos que no son usados para biocarburantes como el arroz.

Este acalorado debate ha hecho que países en Sur América y África con potencial para ser productores de biocombustibles se sientan atemorizados de entrar al mercado, por otro lado los países miembros de la Unión Europea realizan estudios cada vez más incisivos sobre el impacto en la agricultura tradicional, medioambiente y alimentación.

El aceite de girasol por el momento consta como uno de los más costosos por su grandes beneficios nutricionales así que no es una buena alternativa como base de biocombustibles a diferencia de la soya o la palma, lo que lo hace especial es la cantidad de aceite que se obtiene de sus semillas cuando son tratadas y alterado su PH.

Uno de los objetivos de las investigaciones de biodiesel de girasol es medir sus capacidades ante el diesel mientras la biotecnología se encarga de crear una semilla que reduzca sus cualidades alimenticias a favor de que pueda ser plantada en cultivos energéticos únicamente para biocombustibles, de esa manera se evitaría malgastar un gran producto alimenticio en la industria de los biocombustibles.

En el Ecuador la materia prima más usada para el biodiesel es la palma africana pero las regiones del litoral presentan condiciones para que las plantaciones de girasol se desarrollen sin problemas, por el momento las plantaciones de girasol existentes son parte de los cultivos de empresas alimenticias como Pronaca o Danec mientras que los pequeños agricultores solo venden el girasol como planta ornamental.

El ingreso de un plan de cultivos energéticos de girasol al Ecuador se convertiría en una alternativa para nuevos y experimentados productores, llegando con el tiempo a solventar los problemas con los monocultivos de palma africana y dando la oportunidad que la norma INEN aumente los límites de

porcentaje de biodiesel con mezcla de diesel de 10% a 15% o 25% como lo hacen en la Unión Europea.

5.2.1 Recursos humanos.

Son el talento humano que intervino con su conocimiento del tema para la realización de la investigación y experimentación del proyecto.

Tabla 48
Recursos humanos

Descripción	Función
Joel R. Asas Chicaiza	Investigador y experimentador del proyecto.
Ing. Germán Erazo	Investigador, Tutor académico y director del proyecto, especialista en el manejo de las variables propuestas.
Ing. Alberto Naranjo	Tutor de pruebas en el laboratorio, especialista en el manejo de la bomba calorimétrica, banco de pruebas PLINT TE-46 y opacímetro NEXTECH NDO-6000.

5.2.2 Recursos materiales.

Son los elementos utilizados durante la investigación, implementación y experimentación del proyecto, estos elementos se detallan en la Tabla 49.

Tabla 49
Recursos materiales

Ítem	Función
Aceite	Aceite de girasol base del biocombustible, conseguido de bodegas y tiendas.
Sello Rojo	Material utilizado como parte del catalizador debido a su contenido de Hidróxido de Sodio (NaOH).
Metanol	Alcohol utilizado para para la elaboración del catalizador durante la transesterificación.
Bomba de acuario	Utilizado para el proceso de lavado del biodiesel.
Envases plásticos	Recipientes usados durante la transesterificación, almacenamiento y transporte del biodiesel.
Equipo de	Elementos usados para evitar accidentes al tener

Continua 

seguridad	contacto con químicos corrosivos.
Tubo de acero	Tubo de 1,5 pulgadas de diámetro y tres metros de largo adaptado para la salida de los gases de escape.

5.2.3 Recursos técnicos.

Tabla 50
Recursos técnicos.

Ítem	Función
Balanza de precisión	Usada para pesar los materiales para la transesterificación, cálculo de densidad y poder calorífico.
Termómetro de líquidos	Sirvió para medir en grados Fahrenheit la temperatura del aceite y del biodiesel obtenido.
Vasos medidores	Jarras graduadas que midieron los líquidos del proyecto.
Bomba calorimétrica	Usado para encontrar el poder calorífico de las muestras en el laboratorio.
Motor de pruebas PLINT TE-46	Dinamómetro utilizado para las pruebas de: fuerza, consumo de combustible, consumo de aire y temperatura de los gases de escape en el laboratorio.
Opacímetro	Usado para medir en porcentaje el grado de opacidad de los gases de escape.
Computador personal	Sirvió para la elaboración del documento escrito mediante el uso de sus paquetes informáticos y su conexión a Internet.

5.3 Costos de operación.

El proyecto conllevó una serie de costos de bienes materiales y servicios otorgados por los laboratorios especializados, se trató siempre de cumplir con los costos previstos en el presupuesto mostrado en el perfil del proyecto.

5.3.1 Costos directos.

Son los gastos asignados al mismo proyecto y fueron realizados sin mayor dificultad, estos gastos son respaldados por documentos para su ejecución.

Tabla 51
Costos directos del proyecto.

Ítem	Cantidad	Unidad	Costo unitario (dólares)	Total parcial (dólares)
Aceite de girasol	10	Litros	0,56	5,60
Diesel premium	24	Litros	0,27	6,48
Metanol	4	Litros	1,80	7,20
Sello rojo	1	Unidades	2,00	2,00
Balanza	1	Unidades	25,00	25,00
Termómetro	1	Unidades	15,00	15,00
Jarrón 3 litros	2	Unidades	1,70	3,40
Balde	1	Unidades	12,00	12,00
Balde con dispensador	1	Unidades	14,00	14,00
Bomba de acuario	1	Unidades	12,00	12,00
Piedras dosificadoras de aire	2	Unidades	4,00	8,00
Envases de un galón	8	Unidades	0,35	2,80
Envases de un litro	4	Unidades	0,15	0,60
Papel tornasol	1	Unidades	2,00	2,00
Vaso medidor 500 cc	1	Unidades	3,50	3,50
Vaso medidor 50cc	1	Unidades	2,00	2,00
Embudo	2	Unidades	1,50	3,00
Gotero	2	Unidades	0,75	1,50
Tubo de acero 1,5 in de diámetro	1	Unidades	6,00	6,00
Electrodos 6011	1	Empaque	2,50	2,50
Bomba calorimétrica	15	Horas	20,00	600,00
Banco de pruebas	35	Horas	20,00	700,00
Opacímetro	10	Horas	20,00	200,00
Índice de saponificación	1	Unidades	13,00	13,00
Índice de acidez	1	Unidades	16,00	16,00
Densidad API	4	Unidades	20,00	80,00
Punto de inflamación	4	Unidades	25,00	100,00

CONTINÚA 

Sedimentos y agua (BSW)	4	Unidades	35,00	140,00
Viscosidad cinemática	4	Unidades	40,00	160,00
Corrosión a la lámina de cobre	4	Unidades	20,00	80,00
Índice de Cetano calculado	4	Unidades	60,00	240,00
IVA pruebas de laboratorio	1	Unidades	115,48	115,48
COSTOS DIRECTOS TOTALES				2579,06

5.3.2 Costos indirectos.

Se trata de los gastos derivados de la planeación, ejecución o terminación del proyecto, su asignación no es muy clara debido a que su asignación no fue inmediata y no pudo ser cuantificado por lo que sus valores son aproximados a los gastos hechos.

Tabla 52
Costos indirectos del proyecto.

Ítem	Cantidad	Unidad	Costo Unitario (dólares)	Total parcial (dólares)
Internet	350	Horas	0,60	210,00
Copias	700	Unidades	0,02	14,00
Impresiones	800	Unidades	0,15	120,00
Transporte	1	Global	200,00	200,00
COSTOS INDIRECTOS TOTALES				544,00

Sumando los 2579,06 dólares del total de costos directos más los 544 dólares del total de costos indirectos se tiene como resultado **3123,06 dólares** que es el valor total estimado con el que se llevó a cabo el proyecto.

5.4 Financiamiento.

Se trata de los recursos monetarios y de crédito que fueron destinados al gasto de los costos directos e indirectos del proyecto. La investigación fue

autofinanciada y todos los gastos corrieron a cargo del investigador y experimentador el Sr. Joel R. Asas.

5.5 Costos de producción de las mezclas de biodiesel.

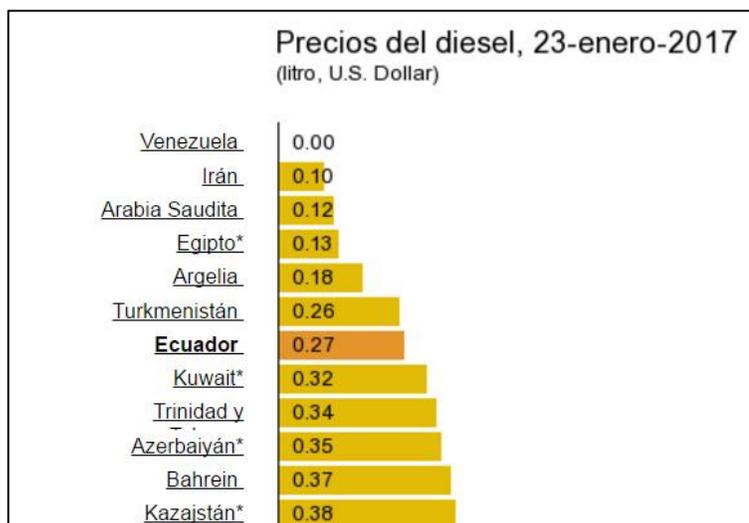


Figura 91: Precios de diesel a nivel mundial.

Fuente: (Global petrol prices, 2016)

La Figura 91 demuestra como el precio del diesel en Ecuador se encuentra entre los menos costoso del mundo a 0,27 dólares cada litro mientras que para obtener un litro de biodiesel se gastó 0,76 dólares, aproximadamente 0,56 dólares por litro de aceite obtenido con 0,18 dólares por metanol y 0,02 dólares sello rojo.

La Tabla 55 muestra cuales fueron los costos de obtención por galón de cada una de las mezclas puestas a pruebas, mientras que la Figura 92 muestra cual es la diferencia porcentual de cada una con respecto al precio oficial del diesel.

Tabla 53
Precios de obtención de muestras por galón.

Combustible	Precio (dólares)	% respecto al diesel
Diesel	1.08	0
B2	1,12	3,6
B5	1,18	9,1
B10	1,28	18,1
B15	1,37	27,2
B25	1,57	45,4
B50	2,06	90,7

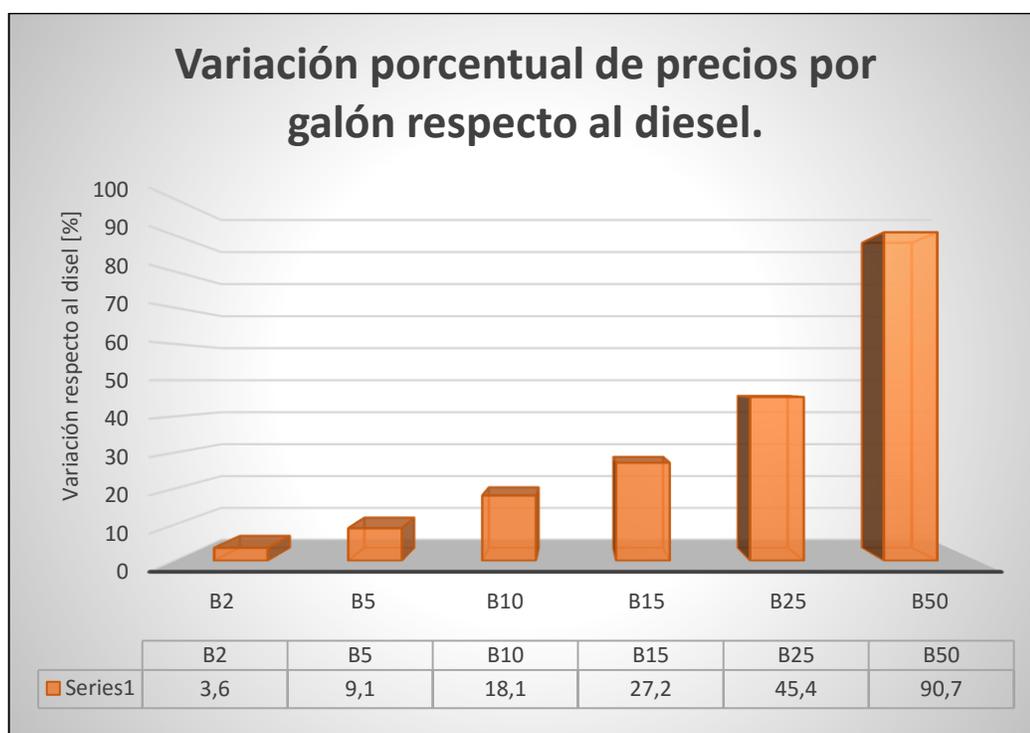


Figura 92: Porcentajes de variación de precios de biocombustibles.

Mientras mayor sea el porcentaje de biocombustible en la mezcla mayor será su precio, las que menor coste tienen son B2 con 3,6% respecto al precio del diesel premium. Serían necesarios más diez litros de uso de biocombustible B2 para notar una pérdida en costos.

5.6 Elección de la muestra óptima como combustible alternativo.

La tabla 54 muestra un cuadro comparativo que toma en cuenta las propiedades y características puestas a prueba para poder concluir bajo un sistema de calificación de 1 a 4 cual de todas las mezclas combustibles establecidas en el proyecto es la más óptima para funcionar como combustible alternativo al diesel premium.

Tabla 54
Comparativo de elección de muestra óptima.

	B2	B5	B10	B15	B25	B50
Potencia	6	4	5	3	1	2
Relación A/C	1	4	5	6	2	3
Consumo específico de combustible	1	6	5	4	3	2
Rendimiento térmico	1	5	4	2	3	6
Rendimiento volumétrico	2	1	4	5	3	6
Opacidad de gases de escape	1	2	3	4	5	6
Características químicas	6	4	1	6	3	3
Costos de producción	6	5	4	3	2	1
Total	24	31	31	33	22	29

Todas las mezclas funcionan como alternativa porque cumplen con los parámetros químicos que establece la norma para combustibles diesel y sus parámetros mecánicos y térmicos no se diferencian mucho al momento de probarlo en un motor, pero la tabla comparativa demuestra que es el biodiesel **B15** la mejor opción entre todas tomando especial énfasis en la diferencia que existe con la opacidad de gases y los costos de producción. B5 y B10 funcionarían de no ser porque no cumplen con la meta propuesta de reducir la opacidad mínimo 15% al diesel, B25 y B50 en cambio tiene el inconveniente de que su costo de producción son muy elevados a pesar de que sus índices de opacidad son menores al de B15.

5.7 Cronograma.

Es la descripción de las actividades llevadas a cabo en relación con el tiempo con el que se desarrollaron, se tomó en cuenta los recursos y el tiempo total con el que se contaba con una tolerancia debido a efectos imprevistos.

Arias G. (2012) afirma, “Se expresa mediante un gráfico en el cual se especifican las actividades en función del tiempo de ejecución. Puede representarse mediante un diagrama de Gantt.” (pág. 112).

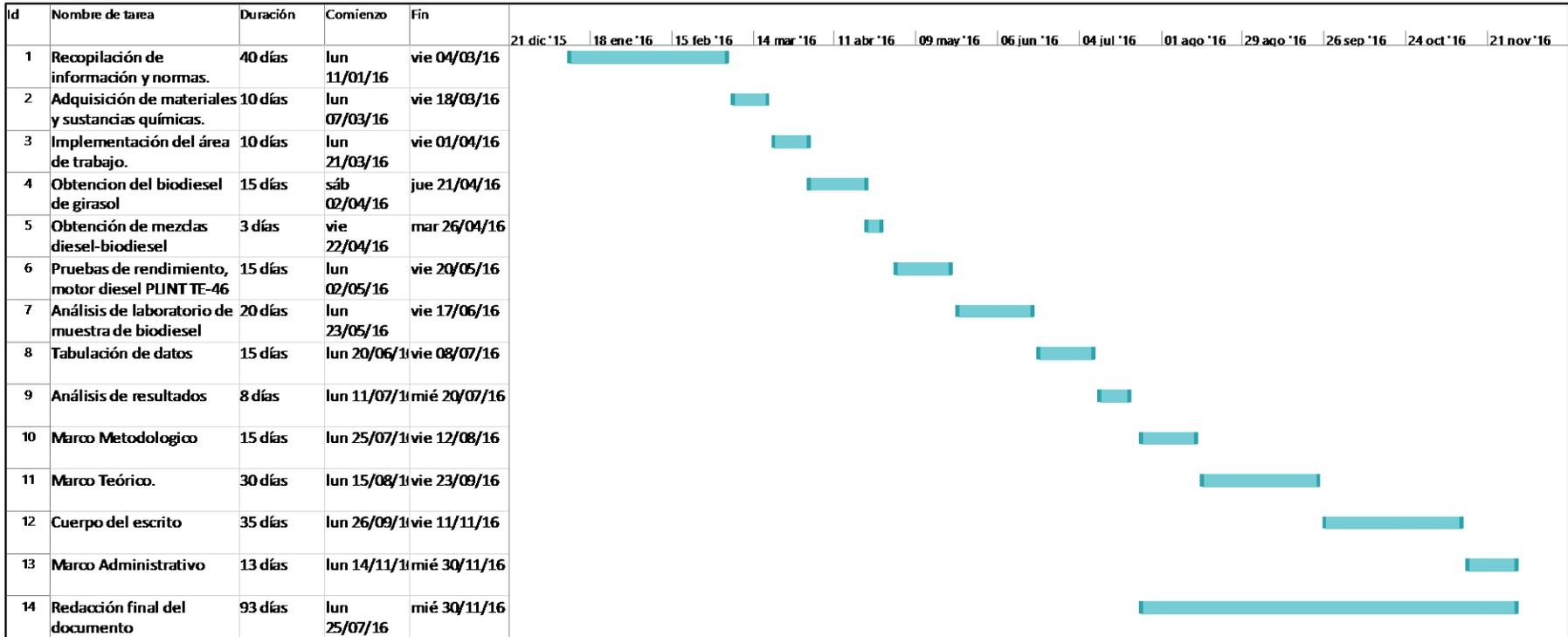


Figura 93: Cronograma de actividades.

CONCLUSIONES.

- Se obtuvo la información bibliográfica necesaria de fuentes confiables sobre el proceso de obtención de biodiesel para poder llevar a cabo la investigación y las pruebas correspondientes que se necesitaban en la investigación.
- Se demostró que se puede obtener biodiesel de aceite de girasol de manera casera por transesterificación con costos bajos, materiales fáciles de adquirir y con sustancias químicas fáciles de manipular y con poco riesgo para la salud del experimentador.
- Se realizaron pruebas en un banco de pruebas PLINT TE-46 que permitió la caracterización de mezclas de diesel con biodiesel de aceite de semillas de girasol en proporciones de: 2%, 5%, 10%, 15%, 25% y 50%.
- Se pudo establecer parámetros comparativos como el torque, la potencia y el consumo específico de combustible del motor ciclo diesel Petter AA1 cuando se trabajó con las mezclas de diesel y biodiesel de aceite de semillas de girasol en proporciones de: 2%, 5%, 10%, 15%, 25% y 50%.
- Se creó el comparativo de funcionamiento entre los parámetros químicos, mecánicos, térmico, índice de opacidad y costos de producción cuando se trabajó con el diesel premium y las mezclas biocombustibles establecidas.
- Se tabuló todos los datos obtenidos y calculados que se obtuvo durante los procesos de producción, pruebas de caracterización química, pruebas de rendimiento en el motor y la medición de opacidad de gases

de escape que se llevaron a cabo durante la investigación, para posteriormente poder compararlos por medio de gráficas estadísticas.

- Se demostró que el biodiesel de girasol puede ser una potencial fuente de ingresos y generadora de fuentes de trabajo digno como lo requiere el plan nacional del buen vivir en su objetivo nueve.
- Se analizó que entre las mezclas puestas a prueba la óptima es B15, obtener un galón de B15 costó 27,2% más que el galón de diesel premium mientras que su porcentaje de opacidad se redujo en 17,26% con respecto al diesel y cumpliendo con una de las metas del proyecto.
- Se pudo notar con las pruebas de índice de acides y saponificación que el lote total de aceite obtenido no alteró sus propiedades en relación al aceite nuevo, no fue necesario su estabilización con ácidos.
- El biodiesel fue usado en estado puro y con las mezclas establecidas en el banco de pruebas sin necesidad de adaptaciones al sistema de alimentación y sin que el motor sufra desperfectos durante las pruebas.
- Las pruebas de Opacidad demostraron que el porcentaje se reduce a medida que aumenta la cantidad de biodiesel de girasol en la mezcla.
- El análisis final cumplió con el objetivo de encontrar una mezcla combustible alternativa al diesel garantizando los derechos de la naturaleza dando prioridad a la alimentación y promoviendo la sostenibilidad ambiental reduciendo la contaminación atmosférica, de suelo o de fuentes de agua dulce.

- La muestra más efectiva en funcionamiento es B15 en: torque, potencia, relación aire-combustible, consumo específico de combustible y rendimiento volumétrico.
- La muestra menos efectiva en funcionamiento es B25 mostrando malos resultados en: torque, potencia, relación aire combustible e incluso costos de producción.

RECOMENDACIONES.

- Obtener un lote del aceite base mayor al volumen del biocombustible antes de la obtención del mismo evitando que otro tipo de aceite agregado al lote principal altere los índices de acides calculados con los que se trabaja.
- El área donde se lleven a cabo los procesos de obtención de biodiesel deben cumplir las condiciones de: orden, limpieza, luz, ventilación y seguridad para el manejo de elementos químicos.
- Los materiales que se usen para el agitado en la transesterificación y el lavado del biodiesel deben ser de plásticos aptos para el trabajo con productos químicos como el PET, PP o PEAD.
- Calentar el aceite en recipientes que no contengan elementos como el Aluminio o el Cinc que se desprenden a altas temperaturas para no alterar su composición química.
- Cualquier elemento que tenga contacto con metóxido o el biodiesel no debe ser usado nunca más para la preparación de alimentos.
- Realizar estudios para poder darle uso a la glicerina subproducto de la producción de biodiesel, para usarlo como: leña, abono o en la creación de jabones.
- Usar piedras dosificadoras de aire redondas para el lavado que generen un burbujeo suave evitando una inercia mecánica entre fluidos que genere una emulsión, evitar piedras largas y azules que desprenden partículas.

- El almacenamiento del biodiesel B100 no debe superar los tres meses y debe evitar la ventilación de aire lejos de los rayos del sol, su temperatura no deberá ser menor a del gelatinado del aceite base ni mayor a la de su punto de inflamación.
- Procurar realizar las pruebas de rendimiento en el dinamómetro bajo las mismas condiciones ambientales, evitándose dejar un lapso de tiempo mayor de dos días para las pruebas entre mezclas.
- Realizar las pruebas de rendimiento por lo menos para un rango de diez velocidades diferentes para cada una de las muestras y así poder obtener graficas más detalladas de los parámetros del motor.
- En caso de existir dudas durante la elección de la mezcla óptima se recomienda usar otros aspectos para su determinación como: contenido de azufre, temperatura de destilación, tipo de motor usado, mercado al que va dirigido, etc.
- Informarse sobre resultados de investigaciones previas, polémica generada en el mundo y los tipos de debates del tema de la implementación de un sistema de biocombustibles como alternativa para la reducción del impacto ambiental.
- De las muestras consideradas como óptimas: B5, B10 y B15, se recomienda hacer un estudio detallado de componentes en sus gases residuales.

BIBLIOGRAFÍA.

- Agencia Andaluza de la Energía. (2010). Guía de la eficiencia energética en automoción. *Nuevos combustibles y tecnologías alternativas*. Sevilla, España: Escandón Impresores.
- Aguirre, P. (23 de Mayo de 2011). *Mantenimiento motor diesel*. Recuperado el 5 de Noviembre de 2016, de <http://es.slideshare.net/>
- Álvarez Maciel, C. (2009). Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional. *Economía Informa*, 63-89.
- Arias, F. G. (2012). *El Proyecto de Investigación: Introducción a la metodología científica*. Caracas: Episteme.
- Arias, M. E., Teuta Ramirez, C. A., & Parra Plazas, J. (2011). Caracterización de las propiedades del biodiesel de girasol bajo la Norma NTC de 100/04 y medición de poder calorífico. *AVANCES Investigación en Ingeniería*, 73-80.
- Bravo, E. (2010). *Cultivos Energéticos y soberanía alimentaria en América Latina*. Quito: Génesis.
- Burgos, D., & Villacis, Y. (2016). *Caracterización de las mezclas combustibles diesel a partir de aceite de frituras, en concentraciones 5% - 10% - 15% - 20% - 30% para determinar los parámetros térmicos y mecánicos del motor (tesis de pregrado)*. Latacunga: ESPE.
- Camps Michelena, M. (2008). *Los biocombustibles*. México, D.F.: S.A. MUNDI-PRENSA .

- Capilla Valero, A., Díez Pinilla, L. I., Iranzo Navarro, I., & Noguéz, F. S. (2001). *Libro verde de la energía: El papel de los combustibles fósiles*. Obtenido de Centro de investigación de recursos y consumos: <http://www.fcirce.es/>
- Castellar, G., Angulo, E. R., & Cardozo, B. M. (2014). Transesterification vegetable oils using Heterogeneous catalysts. *Prospect. Vol. 12, No. 2*, 90-104.
- Castro, P. (2007). *Opciones para la producción de biodiesel en Perú*. Lima: Soluciones Prácticas-ITDG.
- Çengel, Y., & Boles, M. (2012). *Termodinámica*. México, D.F.: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA.
- Ciria, I. (Julio de 2007). *Propiedades y características de combustibles diesel y biodiesel*. Obtenido de <http://www.revistavirtualpro.com/>
- Damien, A. (2009). *Las biomásas*. Madrid: Ediciones Antonio Madrid Vicente.
- de Castro, V. M. (1992). *El motor diesel en el Automovil*. Barcelona: CEAC.
- Domingo, A. M. (2011). *Apuntes de mecanica de fluidos*. Obtenido de Archivo digital UPM: <http://oa.upm.es/>
- Dufey, A. (Septiembre de 2006). *producción y comercio de biocombustibles y desarrollo sustentable: los grandes temas*. Obtenido de <http://pubs.iied.org/>
- Dufour, J. (31 de Julio de 2009). *Energía y sustentibilidad*. Recuperado el 13 de Septiembre de 2016, de <http://www.madrimasd.org>
- Echavarria, N. (Miércoles de Enero de 2016). *Estructuras y fuerzas mecánicas*. Recuperado el 6 de Junio de 2016, de <http://tecnologia3esobnoelkyalexander.blogspot.com>

- Erazo, G. (2013). *Evaluación del potencial energético del aceite de piñón en el motor Isuzu serie DMax como fuente alternativa de energía en la ciudad de Latacunga. Utilización como biocombustible en motores diesel en proporción para reducir la polución*. Latacunga: ESPE.
- Fernandez, J., Lucas, H., & Ballesteros, M. (2006). *Energías renovables para todos: Biocarburantes*. Obtenido de Fundación de la energía de la comunidad de Madrid: <https://www.fenercom.com>
- Fygueroa, S., & Araque, J. (2003). *Problemas de Motores de Combustión Interna*. Mérida: Consejo de Estudios de Postgrado. Universidad de los Andes.
- Ganduglia, F. (Octubre de 2009). *Manual de biocombustibles ARPEL IICA*. Obtenido de <http://www.olade.org>
- García Camus, J. M., & García Laborda, J. Á. (2006). *biocarburantes líquidos: biodiésel y bioetanol*. Madrid: CEIM.
- Gil, H. (2002). *Manual del automóvil, reparación y mantenimiento*. Madrid: Cultural S.A.
- Gil, H. (2003). *Manual CEAC del automóvil*. Barcelona: Ediciones CEAC.
- Global petrol prices. (2016).
- Gracia, C. (2009). *Biocombustibles: ¿Energía o Alimento?* Obtenido de Capítulo 5, biodiesel: <http://docplayer.es/>
- Heywood, J. B. (1988). *Internal combustion engine fundamentals*. New York: McGraw-Hill.
- Hilbert, J. (2007). Bioenergía. *IDIA XXI*, 10-33.

- Howell, J. R., & Buckios, R. O. (1990). *Principios de Termodinámica para Ingenieros*. México, D.F.: McGraw-Hill.
- INEN 1 495. (1986). *Determinación del índice de cetano*. Quito: INEN.
- Laplace. (1 de Marzo de 2013). *Laplace, departamento de física aplicada III*. Recuperado el 3 de Mayo de 2016, de <http://laplace.us.es>
- Lede, S. (2014). *Los biocombustibles*. Obtenido de Argenbio, Consejo Argentino para la información y el desarrollo de la Biotecnología: <http://www.argenbio.org/>
- Lublearn. (1 de Septiembre de 2014). *Efectos de los aditivos EP*. Recuperado el 7 de Noviembre de 2016, de <http://noria.mx>
- Ludevid Olle, M. (2003). *El cambio global en el medio ambiente*. México, D.F. Alfaomega.
- Marcelmid. (14 de Febrero de 2012). *Calidad del combustible en Ecuador*. Recuperado el 21 de Abril de 2016, de <http://es.slideshare.net>
- Moreta, B. (21 de Septiembre de 2011). *Agricultores incursionan en el cultivo de girasol y sorgo* . Obtenido de El Norte, diario regional independiente: <http://www.elnorte.ec/>
- Nigro, R., Storti, M. A., & Ambroggi, L. (1999). Modelización numérica de un motor monocilindrico encendido por chispa. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 22-29.
- NTE INEN 2 162. (1999). *Solventes, alcohol metílico para uso industrial, requisistos*. Quito: INEN.

- NTE INEN 2 207. (2002). *Gestión Ambiental, aire, vehículos automotores, límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres de diesel*. Quito: INEN.
- NTE INEN 2 482. (2009). *Biodiesel, requisitos*. Quito: INEN.
- NTE INEN 26. (2012). *Aceite de girasol, requisitos*. Quito: INEN.
- NTE INEN1489. (2016). *Productos derivados de petróleo, diesel, requisitos*. Quito: INEN.
- Obert, E. F. (1999). *Motores de combustion interna análisis y aplicaciones*. México D.F.: Continental S.A.
- Ortiz, M. M. (2010). Reducción de las emisiones de CO2 en vehículos de transporte: combustibles alternativos. *Actualidad tecnológica*, 28-33.
- Pasquale, G., & Ruiz, D. (Junio de 2010). *Biodiesel casero: Todo lo que hay que saber para fabricar un buen biodiesel*. Obtenido de <http://docplayer.es>
- Pawlak, W. R. (1984). *Funcionamiento de Motores de combustión Interna*. Monterrey: Editorial de la Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Pelly, M. (2003). *Método sencillo para hacer biodiesel*. Obtenido de <http://journeytoforever.org/>
- Portillo, G. (31 de Agosto de 2016). *La gran polémica de los biocombustibles y el dióxido de carbono*. Obtenido de renovablesverdes: <http://www.renovablesverdes.com/>
- PRTE INEN 282. (2015). *Ropa de protección para soldadores y protección contra cortes*. Quito: INEN.

- Querini , C., & Molina, C. (30 de Mayo de 2007). *El aceite de girasol en el mercado de los biocombustibles*. Obtenido de Biodiesel Argentina : www.biodiesel.com.ar
- Querini, C. (2010). ¿Aceite de Girasol para biodiesel? *ASAGIR: Asociación Argentina del girasol*, 223-239.
- Renneberg, R. (2008). *Bioteología para principiantes*. Barcelona: Reverté.
- Rodriguez, F. (25 de Mayo de 2015). *Ciclo diesel*. Recuperado el 18 de Septiembre de 2016, de <https://fernandola80.wordpress.com>
- Rolle, K. C. (2006). *Termodinámica*. México, D.F.: Pearson Educación.
- RTE INEN 216. (2014). *Gafas protectoras y máscaras especiales para la protección de trabajadores*. Quito: INEN.
- RTE INEN 270. (2016). *Guantes de protección*. Quito: INEN.
- Ruiz, C. (22 de Abril de 2008). *La gran polémica de los biocombustibles*. Obtenido de Otro mundo es posible, la opinion independiente de ciudadanos críticos: <http://www.otromundoesposible.net/>
- Ruiz, R. (2007). *El Método Científico y sus Etapas*. Obtenido de www.Aulafacil.com
- SsangYong. (10 de Octubre de 2010). *Nuevo SsangYong Korando*. Recuperado el 3 de Marzo de 2016, de <https://www.motorpasion.com>
- Tamayo y Tamayo, M. (1999). *El proceso de la investigación científica*. Bogotá: Afro Editores Ltda.
- Toaza, F. (19 de Septiembre de 2012). *Ecuador usará biodiesel como combustible en 2013*. Recuperado el 20 de Diciembre de 2016, de <http://www.Pontecool.com>

Villareal , M. (2015). *Petroleo: clasificación y caracterización*. Recuperado el
Marzo de 3 de 2016, de Repositorio digital Universidad Tecnica del
Norte: <http://repositorio.utn.edu.ec/>

Whitman Direct Action. (Agosto de 2015). *Biodiesel: producción y aplicaciones*.
Obtenido de <https://es.scribd.com>

ANEXOS



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ
CERTIFICACIÓN**

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por el señor: **JOEL RUPERTO ASAS CHICAIZA.**

En la ciudad de Latacunga, a los **diecisiete días del mes de febrero del 2017.**

ING. GERMÁN ERAZO

DIRECTOR DEL PROYECTO

Aprobado por:



ING. DANILO ZAMBRANO

DIRECTOR DE CARRERA

DR. JUAN CARLOS DÍAZ

SECRETARIO ACADÉMICO