

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

*Tesis previa a la obtención del título
de Ingeniero Ambiental*

TEMA:

“ANÁLISIS DE LAS EMISIONES PRODUCIDAS EN LA QUEMA
DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS OBTENIDOS EN EL PROCESO
DE PIRÓLISIS DE CAUCHO VULCANIZADO”

AUTORES:

Damian Antonio Matute Sánchez
Ricardo Fernando Ramos Jaramillo

DIRECTOR/A:

Dra. Myriam Mancheno C. Mgst.

Cuenca, Febrero del 2015

RESUMEN

La generación de residuos de neumáticos, constituyen un problema cada vez mayor. En la ciudad de Cuenca, un caso preocupante son los neumáticos que están siendo acumulados en forma creciente en el relleno sanitario de Pichacay, ya que estos ocupan grandes volúmenes y reducen la vida útil del relleno.

Con el objetivo de responder a esta problemática, en la presente investigación se propuso y se probó de manera experimental, el aprovechamiento energético de los residuos de neumáticos generados en la ciudad, mediante el proceso de pirólisis, el mismo que se basa en la descomposición térmica del caucho a altas temperaturas y en ausencia de oxígeno, obteniendo como resultado tres productos principales: líquido, gaseoso y sólido.

El trabajo experimental de pirólisis se llevó a cabo en un reactor tipo Batch de acero inoxidable y en ausencia completa de oxígeno. Las variables de operación que se estudiaron fueron: presión (15 psi y 55 psi), tiempo de residencia (10 min y 20 min) y temperatura (340 °C y 440 °C), dando como resultado que ésta última, es la variable que tiene mayor influencia sobre las características de los productos obtenidos. Estudiando la variación de la temperatura se determinó la temperatura óptima para la mayor producción del producto líquido (373 °C a 377 °C).

A partir de los análisis fisicoquímicos de la fracción líquida, la investigación demuestra que esta posee características propias de: diésel, gasolina y queroseno; dado las circunstancias de la investigación, para las pruebas de combustión se consideró a éste combustible como un diésel No. 2, debido a que el número de Cetano es de 46,7.

Para el análisis de las emisiones (CO, NO, NO_x, Partículas y Opacidad), se realizó una comparativa con el proceso de combustión de un diésel ecuatoriano comercial, obteniéndose que en las pruebas de 800 rpm el combustible líquido del proceso de pirólisis emite un 96 % menos de NO_x y un 109 % menos de NO que el diésel, mientras que en lo referente a CO, Partículas y Opacidad existe una mayor cantidad de emisiones que el diésel. En las pruebas a 2500 rpm el combustible del proceso emite un 98 % más de NO y NO_x, mientras que CO, Partículas y Opacidad emite 2498 %

más que el diésel, debido a una combustión anticipada en la cámara y un deficiente suministro de oxígeno a la carga.

También se realizaron pruebas para determinar los fallos en el proceso de combustión mediante el análisis de ruido y vibraciones del motor; en las pruebas de 800 rpm y 2500 rpm el motor presentó mayor cantidad de vibraciones y ruido comprobándose así el efecto del combustible obtenido del proceso de pirólisis, lo que significa que el motor presentará un mayor desgaste de los rodillos, cavitación y los dientes de engrane, que con el uso del diésel.

Finalmente se demostró que el uso del combustible líquido obtenido del proceso de pirólisis, no es sustentable ambientalmente por la cantidad de emisiones que éste produce en la combustión en un motor diésel y por lo tanto se determina que no puede ser un reemplazante directo del diésel comercial.

CERTIFICACIÓN

Certifico, que el presente trabajo intitulado “ANÁLISIS DE LAS EMISIONES PRODUCIDAS EN LA QUEMA DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS OBTENIDOS EN EL PROCESO DE PIRÓLISIS DE CAUCHO VULCANIZADO” fue desarrollado por Damian Antonio Matute Sánchez y Ricardo Fernando Ramos Jaramillo



Dra. Myriam Mancheno C. Mgst.

DIRECTORA DE TESIS

Cuenca, Febrero de 2015

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Los conceptos, análisis y conclusiones desarrolladas en el presente trabajo, para la obtención del título de ingeniero ambiental, son de exclusiva responsabilidad de los autores.

A través de la presente declaración cedemos los derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Universidad Politécnica Salesiana, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la Normativa Institucional Vigente.



Damian Antonio Matute Sánchez



Ricardo Fernando Ramos Jaramillo.

Cuenca, Febrero del 2015

DEDICATORIAS

Damian Antonio Matute Sánchez

Este trabajo lo dedico a mis padres Antonio y Nelly por su incondicional apoyo para la culminación de mis estudios y de este trabajo.

A mi esposa e hija Diana y Fabiola por su amor y ser el más grande apoyo en mi vida

A todas las personas que hicieron posible la culminación de este trabajo.

Ricardo Fernando Ramos Jaramillo

Este trabajo lo dedico de manera absoluta a mis padres Gorver y Lourdes y por haberme enseñado a cumplir mis metas y objetivos sin importar nada. Además por su apoyo incondicional en las decisiones tomadas en mi vida diaria y profesional.

A mis hermanos Casen y Sandra, por haber sido mi inspiración y un ejemplo de lucha diaria y siempre perseverar en la vida a pesar de cualquier adversidad.

A todos mis compañeros y profesores los cuales en mi vida universitaria me enseñaron y compartimos muchas experiencias agradables.

AGRADECIMIENTOS

El mas sincero agradecimiento a nuestra directora de tesis Dra. Myriam Mancheno, por su dirección, valiosos consejos y apoyo brindado durante el desarrollo de este proyecto.

Al Ing. Servio Astudillo, Dra. Inés Malo y al PhD. Pablo Arévalo por su constante colaboración y apoyo en nuestro trabajo de tesis.

A nuestros maestros y amigos, Ing. Estefanía Avilés, Ing. Myriam Loayza y el Ing. José Ulloa por su apoyo incondicional.

A nuestros compañeros de la Universidad, con quienes hemos compartido grandes y gratos momentos durante nuestra vida universitaria.

A todos ustedes, GRACIAS TOTALES....

ÍNDICE

RESUMEN	I
CERTIFICACIÓN	III
DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD	IV
DEDICATORIAS	V
AGRADECIMIENTOS	VI
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE TABLAS	XII
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	XIII
ÍNDICE DE ANEXOS	XIV
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3 HIPÓTESIS	3
1.3.1 HIPÓTESIS NULA:	3
1.3.2 HIPÓTESIS ALTERNATIVA:	3
1.4 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	3
1.4.1 ALCANCE.....	4
CAPÍTULO 2	5
MARCO TEÓRICO	5
2.1 GESTIÓN DE NEUMÁTICOS USADOS	5
2.1.1 NORMATIVA DE GESTIÓN DE NEUMÁTICOS USADOS EN EL ECUADOR.....	5
2.1.2 DISPOSICIÓN FINAL DE NEUMÁTICOS USADOS EN LA CIUDAD DE CUENCA.....	10
2.1.2.1 Relleno Sanitario de Pichacay.....	10
2.2 APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE NEUMÁTICOS USADOS	11
2.2.1 VENTAJAS DEL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO.....	12

2.2.1.1 Pirólisis	12
2.2.1.2 Termólisis	12
2.2.1.3 Gasificación	13
2.3 PROCESO DE PIRÓLISIS	13
2.3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE PIRÓLISIS	13
2.3.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS PRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS	15
2.3.3 FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE PIRÓLISIS	15
2.3.3.1 Temperatura y Tiempo de Residencia.	15
2.3.3.2 Presión.....	16
2.3.3.3 Tamaño de la Partícula.....	16
2.3.3.4 Velocidad de Calentamiento	16
2.3.4 REACTORES DE PIRÓLISIS.....	16
2.3.4.1 Tipos de Reactores de Pirólisis	17
2.4 CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES.....	18
2.4.1 OLOR Y ASPECTO	18
2.4.2 DENSIDAD RELATIVA	19
2.4.3 DENSIDAD API	19
2.4.4 VISCOSIDAD	19
2.4.5 PUNTO DE INFLAMACIÓN	19
2.4.6 PUNTO DE CONGELACIÓN	20
2.4.7 NÚMERO DE CETANO	20
2.4.8 PUNTO FINAL DE DESTILACIÓN	20
2.4.9 PORCENTAJE DE QUEROSENO.....	20
2.4.10 COMPOSICIÓN QUÍMICA	20
2.4.10.1 Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs)	21
2.4.10.1.1 Los HAPs y la Pirólisis	21
2.4.10.1.2 Toxicidad de los HAPs	21
2.5 PRUEBA DE COMBUSTIÓN EN MOTORES DIÉSEL.....	22
2.5.1 EMISIÓN DE GASES CONTAMINANTES EN MOTORES DIÉSEL.....	22
2.5.1.1 Contaminación Atmosférica	22
2.5.1.1.1 Contaminantes Atmosféricos	23
2.5.1.1.2 Efectos de la Contaminación Sobre la Salud.	24
2.5.2 OPACIDAD DE LOS HUMOS DE ESCAPE	25
2.5.3 FALLOS EN EL PROCESO DE COMBUSTIÓN	26
2.5.3.1 Ruido de Combustión	26
2.5.3.2 Vibraciones del Motor	26
2.5.3.3 Medición y Análisis de Ruido y Vibraciones	27

CAPÍTULO 3	28
METODOLOGÍA	28
3.1 DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL DE LOS RESIDUOS DE NEUMÁTICOS USADOS EN LA CIUDAD DE CUENCA.....	28
3.2 DESARROLLO DE DISEÑOS EXPERIMENTALES	29
3.2.1 DISEÑOS FACTORIALES 2 ^k	29
3.2.2 ANÁLISIS DE VARIANZA.....	29
3.3 CARACTERÍSTICAS DE LA MATERIA PRIMA	29
3.3.1 OBTENCIÓN DE MATERIA PRIMA.	31
3.3.2 PREPARACIÓN DE LA MATERIA PRIMA	31
3.4 EQUIPOS	31
3.4.1 PROTOTIPO DE PIRÓLISIS EXPERIMENTAL DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.....	31
3.4.2 MOLINO DE PLÁSTICOS BREBENDER CWB MODELO GRANO-GRINDER.....	32
3.4.3 ANALIZADOR DE LA CALIDAD DE PETRÓLEO SHATOX MODELO SX-300	33
3.4.4 VASO ABIERTO DE CLEVELAND MODELO K13900	34
3.4.5 CROMATÓGRAFO DE GASES THERMO SCIENTIFIC MODELO TRACE GC ULTRA ...	35
3.4.7 MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA DIÉSEL ENGINE MODELO G-130301	35
3.4.8 MICRÓFONO PIEZOELÉCTRICO UNIDIRECCIONAL PCB MODELO HT378B02.....	36
3.4.9 ANALIZADOR DE VIBRACIONES MODELO A3716.....	37
3.4.10 ACELERÓMETRO SUMERGIBLE MODELO 8042	38
3.4.11 COMPROBADOR DE GASES DE ESCAPE DIÉSEL MAHA MODELO MET 6.2	39
3.4.12 MEDIDOR DE GASES DE COMBUSTIÓN EUOTRON MODELO GREENLINE 4000...	40
3.5 PROCEDIMIENTO Y EJECUCIÓN DE EXPERIMENTOS.....	40
3.5.1 DEFINICIÓN DE LA RESPUESTA, LOS FACTORES Y SUS NIVELES.....	40
3.5.2 DEFINICIÓN DE LAS PRUEBAS A REALIZAR	41
3.5.3 REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS	41
3.5.3.1 Formulación del Proceso.....	42
3.5.3.1.1 Volumen del Combustible	42
3.5.3.1.2 Residuos de Caucho del Proceso	43
3.5.3.1.3 Volumen de Gases del Proceso	43
3.6 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA, CUANTIFICACIÓN Y USOS DEL COMBUSTIBLE	43
3.6.1 PRUEBA DE COLOR Y OLOR	44
3.6.2 PRUEBA DE DENSIDAD	44
3.6.3 PRUEBA DE DENSIDAD API.....	46
3.6.4 PRUEBA DE PUNTO DE INFLAMACIÓN	47

3.6.5 PRUEBA DE VISCOSIDAD	48
3.6.6 PRUEBA DE NÚMERO DE CETANO, PUNTO DE CONGELACIÓN Y PORCENTAJE DE QUEROSENO	51
3.6.7 PRUEBA DE TEMPERATURA DE DESTILACIÓN.....	52
3.6.8 DETERMINACIÓN DE HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS.....	53
3.6.8.1 Preparación de los Viales de Extracción	53
3.6.8.2 Procedimiento de la Cromatografía de Gases	53
3.6.9 DETERMINACIÓN DE POSIBLES USOS DEL COMBUSTIBLE	54
3.6.10 METODOLOGÍA GENERAL DE CÁLCULO DEL POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO	54
3.7 PRUEBAS DE COMBUSTIÓN.....	55
3.7.1 DETERMINACIÓN DE LAS PRUEBAS DE COMBUSTIÓN A REALIZAR.....	55
3.7.2 ADQUISICIÓN DE DATOS DE RUIDO Y VIBRACIONES	56
3.7.3 ADQUISICIÓN DE DATOS DE OPACIDAD Y PARTÍCULAS TOTALES.....	56
3.7.4 ADQUISICIÓN DE DATOS DE GASES DE COMBUSTIÓN.....	56
<u>CAPÍTULO 4</u>	<u>57</u>
<u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	<u>57</u>
4.1 DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL DE LOS RESIDUOS DE NEUMÁTICOS USADOS EN LA CIUDAD DE CUENCA.	57
4.2 ANÁLISIS DE LA VARIANZA (ANOVA) DEL PROCESO DE PIRÓLISIS.	58
4.2.1 PRUEBA PARA DETERMINAR LA TEMPERATURA ÓPTIMA DEL PROCESO	59
4.3 CARACTERIZACIÓN, CUANTIFICACIÓN Y USOS DEL COMBUSTIBLE	61
4.5 COMPARATIVA DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN	63
4.5.1 EMISIÓN DE GASES NO _x , NO Y CO EN 800 RPM	63
4.5.2 EMISIÓN DE GASES NO _x , NO Y CO EN 2500 RPM	64
4.5.3 EMISIÓN DE PARTÍCULAS EN 800 RPM	65
4.5.4 EMISIÓN DE PARTÍCULAS EN 2500 RPM	66
4.5.5 OPACIDAD EN 800 RPM.....	67
4.5.6 OPACIDAD EN 2500 RPM.....	68
4.5.7 ANÁLISIS DE FALLOS EN EL PROCESO DE COMBUSTIÓN	68
4.5.7.1 Ruido de combustión a 800 rpm	69
4.5.7.2 Ruido de combustión a 2500 rpm	69
4.5.7.3 Vibraciones del motor a 800 rpm.....	70
4.5.7.4 Vibraciones del motor a 2500 rpm.....	70
4.6 CONCLUSIONES	72

4.7 RECOMENDACIONES	73
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	<u>75</u>
<u>ANEXOS</u>	<u>81</u>

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Peso de neumáticos usados registrados en el relleno sanitario desde el año 2007 a 2014.....	11
Tabla 2. Comparación de los procesos de pirólisis.....	17
Tabla 3. Composición de sustancias en los neumáticos fuera de uso.....	30
Tabla 4. Composición química de los neumáticos fuera de uso.....	30
Tabla 5. Poder calorífico de los materiales.....	31
Tabla 6. Especificaciones del motor de la prueba.....	36
Tabla 7. Características del Micrófono Piezoeléctrico Unidireccional.....	37
Tabla 8. Características del comprobador de gases de escape diésel.....	39
Tabla 9. Factores y niveles de las variables del experimento.....	41
Tabla 10. Matriz de diseño experimental.....	41
Tabla 11. Factor de corrección de temperatura.....	47
Tabla 12. Pruebas de combustión a realizar.....	56
Tabla 13. Pruebas de pirólisis realizadas.....	58
Tabla 14. Pruebas para determinar mayor rendimiento de combustible líquido.....	60
Tabla 15. Características fisicoquímicas del combustible.....	61
Tabla 16. Concentración de HAPs en el combustible.....	62
Tabla 17. Señales de ruido a 800 rpm.....	69
Tabla 18. Señales de ruido a 2500 rpm.....	70
Tabla 19. Vibraciones a 800 rpm.....	70
Tabla 20. Vibraciones a 2500 rpm.....	71

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Esquema del proceso de pirólisis	14
Ilustración 2. Equipo de trituración.....	33
Ilustración 3. Analizador de la calidad de petróleo.....	34
Ilustración 4. Vaso abierto de Cleveland	35
Ilustración 5. Cromatógrafo de gases.....	35
Ilustración 6. Motor de Combustión Interna Diésel.....	36
Ilustración 7. Micrófono Piezoeléctrico Unidireccional	37
Ilustración 8. Analizador de Vibraciones.....	38
Ilustración 9. Acelerómetro.....	38
Ilustración 10. Comprobador de Gases de Escape Diésel.....	39
Ilustración 11. Medidor de Gases de Combustión	40
Ilustración 12. Densidad del combustible	45
Ilustración 13. Determinación del punto de inflamación	48
Ilustración 14. Determinación de la viscosidad	50
Ilustración 15. Determinación número de Cetano, punto de congelación, porcentaje de queroseno.	52
Ilustración 16. Destilación del combustible	53
Ilustración 17. Cantidad de neumáticos que ingresa al relleno sanitario por sectores desde el año 2007 a 2014	57
Ilustración 18. Gráfica normal de los efectos.....	59
Ilustración 19. Curva de calibración de la temperatura óptima	60
Ilustración 20. Concentración de gases en 800 rpm.....	63
Ilustración 21. Concentración de gases en 2500 rpm.....	64
Ilustración 22. Concentración de partículas en 800 rpm.....	65
Ilustración 23. Concentración de partículas en 2500 rpm.....	66
Ilustración 24. Opacidad en 800 rpm	67
Ilustración 25. Opacidad en 2500 rpm	68

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Proceso general del proceso de pirólisis y prueba de combustión	82
Anexo 2. Esquema del prototipo de pirólisis experimental	83
Anexo 3. Esquema del proceso de cromatografía de gases	84
Anexo 4. Esquema del proceso de la prueba de combustión	85
Anexo 5. Análisis de la varianza del proceso de pirólisis.....	86
Anexo 6. Diagrama de Pareto de los efectos en el proceso de pirólisis.....	86
Anexo 7. Resultados de los análisis de HAPs.....	87
Anexo 8. Límites máximos permisibles para fuentes fijas de combustión	87
Anexo 9. Caracterización de señales del espectro de ruido a 800 rpm	88
Anexo 10. Caracterización de señales del espectro de ruido a 2500 rpm	88
Anexo 11. Caracterización de señales del espectro de vibraciones a 800 rpm	89
Anexo 12. Caracterización del señales del espectro de vibraciones a 2500 rpm.....	89

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El impacto ambiental ocasionado por los neumáticos fuera de uso, radica en que sus residuos no se pueden reciclar fácilmente, convirtiéndose en un desecho inservible. Adicionalmente la mala disposición final de los neumáticos usados, influye negativamente en la calidad ambiental y en la salud humana, (Cano Serrano, Cerezo García, & Urbina Fraile, 2007).

En Ecuador, se tiene un grave problema con la disposición final y el incorrecto uso que se da a los neumáticos usados por considerarlos que son basura. Se estima que alrededor de un 30% de los municipios del país tienen rellenos sanitarios, de los cuales pocos cuentan con un lugar de disposición adecuado para estos desperdicios¹.

En general la problemática nacional es muy diversa tanto en los centros poblacionales grandes como en los pequeños; en respuesta, el Ministerio del Ambiente (MAE), expidió con Acuerdo Ministerial No. 20², el Plan de Gestión Integral de los Neumáticos Usados, estableciéndose como una oportunidad la valorización energética para obtener combustibles, aplicando tecnología como la pirólisis, disminuyendo por tanto la cantidad de residuos que ingresaría a un relleno sanitario aumentando así su vida útil.

En el Ecuador, se desecha anualmente millones de neumáticos, de los cuales una parte es reutilizada para el reencauchado, no obstante, la gran mayoría es incinerada o depositada en basureros al aire libre, lo que representa una amenaza contra el ambiente, (El Telégrafo, 2013).

¹ Xavier Bustamante, http://www.lahora.com.ec/index.php/noticias/show/987713/-1/Llantas_usadas%2C_un_problema_en_Ecuador.html#.U6mpc17cZow

² Acuerdo Ministerial No. 20, <http://www.ambiente.gob.ec/la-gestion-integral-de-neumaticos-usados-optimiza-recursos-para-el-manejo-seguro-de-desechos/>

De manera particular en la ciudad de Cuenca en el año 2013, se receptaron 292,92 toneladas de residuos de neumáticos en el relleno sanitario de Pichacay.

El uso de los neumáticos usados para la recuperación de la energía, representa una oportunidad en el corto plazo para consumir grandes cantidades en un modo seguro y respetuoso con el medio ambiente. Los combustibles derivados de neumáticos, también han ganado méritos para aumentar la eficiencia térmica, reducir las emisiones y proporcionar a los usuarios combustibles con alta disminución de costos, (Astafan, 1995).

Frente a este escenario, se plantea la presente investigación, con la finalidad de determinar si el proceso de pirólisis de residuos de neumáticos es una alternativa sustentable de gestión.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Obtener el combustible líquido mediante el proceso de pirólisis de caucho vulcanizado y analizar las emisiones producidas en su combustión.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Diagnosticar la situación actual de los residuos de neumáticos usados en la ciudad de Cuenca.
- Identificar y contrastar que factores influyen en la variable respuesta o dependiente-fracción líquida del proceso de pirólisis en el prototipo experimental de la Universidad Politécnica Salesiana.
- Determinar las características físico-químicas, cuantificación y usos del combustible líquido obtenido.

- Establecer una comparativa entre las emisiones producidas por el combustible obtenido, con un diésel comercial ecuatoriano en base a la normativa ecuatoriana vigente para fuentes fijas de combustión.

1.3 Hipótesis

1.3.1 Hipótesis Nula:

A través del proceso de pirólisis se desarrolla una metodología sustentable de gestión de residuos de caucho vulcanizado.

1.3.2 Hipótesis Alternativa:

A través del proceso de pirólisis se desarrolla una metodología no sustentable de gestión de residuos de caucho vulcanizado.

1.4 Descripción del problema

Los neumáticos, constituyen unos de los principales residuos de las sociedades modernas, que aunque se trata de un residuo no peligroso, es no biodegradable. Su característica se basa en que posee una alta capacidad calorífica por lo que puede ser plenamente aprovechado como combustible.

El impacto ocasionado por los neumáticos fuera de uso al ambiente y a la salud humana, han generado preocupación a nivel mundial, lo cual ha conllevado a la creación de leyes para la gestión adecuada de los mismos.

Las empresas que se dedican a la fabricación de neumáticos, muestran poco interés en las actividades de recuperación ya que por los costos asociados, para la industria es más factible recurrir a la materia prima virgen que a la reciclada.

Además la quema de neumáticos, produce la emanación de partículas y gases que afectan al aire, generando un residuo aceitoso que contamina el agua y los suelos, situación que afecta la calidad de los ecosistemas.

El volumen y forma de los neumáticos, ayudan al almacenamiento del agua, lo que favorece la proliferación de vectores transmisores de enfermedades, por lo que se ve la necesidad de una gestión adecuada.

1.4.1 Alcance

En la presente investigación, se lleva a cabo el levantamiento de información de la cantidad de residuos de neumáticos que llegan al relleno sanitario de la ciudad de Cuenca, la identificación de las características fisicoquímicas del combustible líquido obtenido del proceso de pirólisis; así como los factores que influyen en este proceso, tales como: presión, temperatura y tiempo de retención.

En el desarrollo de esta investigación, se contemplarán dos líneas de investigación: la primera línea de investigación se centrará en identificar y contrastar los factores que influyen en la *variable respuesta o dependiente*³ - fracción líquida del proceso de pirólisis. La segunda línea de investigación, establecerá una comparativa entre las emisiones del combustible líquido obtenido y un diésel ecuatoriano comercial en base a la normativa ecuatoriana vigente para fuentes fijas de combustión.

Esta investigación, se desarrolla en el “*Laboratorio de Ciencias de la Vida*” de la Universidad Politécnica Salesiana, en el campus El Vecino de la ciudad de Cuenca, mediante la cual se desea transferir el conocimiento a los estudiantes de las carreras de Ingeniería Ambiental, Biotecnología de los Recursos Naturales y demás carreras afines. Se prevé que los resultados, sirvan de base para futuras investigaciones en lo referente al proceso de pirólisis.

³ Variable dependiente: Es aquella cuyos valores dependen de los que tomen otra variable. Son las variables de respuesta que se observan en el estudio y que podrían estar influidas por los valores de las variables independientes.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Gestión de Neumáticos Usados

La gestión integral de neumáticos usados en el Ecuador, surge como un mecanismo de control que establece las especificaciones ambientales, con el fin de fomentar la valorización y aprovechamiento de estos residuos.

2.1.1 Normativa de Gestión de Neumáticos Usados en el Ecuador

Constitución de la República del Ecuador

En su art. 14, art. 66 numeral 17, art. 73, art. 83 numeral 6, y el art. 395 numeral 1, reza que toda persona tiene el derecho de vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, además el estado aplicará medidas de precaución y restricción de toda actividad que pueda ocasionar impacto ambiental, garantizando un uso sostenible de los recursos.

En base al Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (COOTAD)

En su art. 136 señala que “Corresponde a los GADs provinciales gobernar, dirigir, ordenar, disponer, u organizar la gestión ambiental, la defensoría del ambiente y la naturaleza, en el ámbito de su territorio; estas acciones se realizarán en el marco del Sistema Nacional Descentralizado de Gestión Ambiental y en concordancia con las políticas emitidas por la autoridad ambiental nacional”.

Ley de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental

En su art.11 “Prohíbe expeler hacia la atmósfera o descargar en ella, sin sujetarse a las correspondientes normas técnicas y regulaciones, contaminantes que, a juicio de los ministerios de Salud y del Ambiente, en sus respectivas áreas de competencia, puedan

perjudicar la salud y vida humana, la flora, la fauna y los recursos o bienes del estado o de particulares o constituir una molestia”.

En base a lo expuesto se establece el **Registro Oficial No. 937 del 19 de abril de 2013; en donde:**

Instructivo para la Gestión Integral de Neumáticos Usados

Este instructivo tiene por objeto “Establecer los requisitos, procedimientos y especificaciones ambientales para la elaboración, aplicación y el control del plan de gestión integral de los neumáticos usados, a fin de fomentar la reducción, reutilización, reciclaje y otras formas de valorización con la finalidad de proteger el ambiente”

Art. 3.- Los neumáticos usados son considerados desechos especiales según el Acuerdo Ministerial No. 042 de octubre de 2012.

Sección II

Plan de Gestión Integral

Desde el art. 5 hasta el art. 13, establece que: toda persona natural o jurídica que fabrique o importe neumáticos deberá presentar un plan de gestión integral de neumáticos usados, que deberá asegurar que se realice de forma técnica y con el menor riesgo posible para el ambiente.

El plan deberá contener los procedimientos, actividades y acciones necesarias, las mismas que deberán ser de carácter técnico, administrativo y económico, además definirá las estrategias de incentivos para lograr la mayor devolución por parte del usuario final.

Sección III

De las Responsabilidades y Obligaciones

Título I

Del Fabricante-Importador de Neumáticos

Presentar el Plan de Gestión Integral de Neumáticos Usados ante la autoridad ambiental nacional, el cual contemplará las fases de recolección, almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final de los neumáticos usados.

Título II y III

Del Comercializador-Distribuidor y de los Centros de Servicio

Deberán participar en el Plan de Gestión Ambiental aprobado por la autoridad ambiental nacional, deberán contar con un centro de acopio que cumpla con los requisitos establecidos en la Norma Técnica Ecuatoriana para la recepción de neumáticos usados los cuales deben ser entregados a gestores o prestadores de servicio para el manejo de desechos especiales.

Título IV

Del Usuario Final Especial

Participar en el Plan de Gestión Ambiental aprobado por la autoridad ambiental nacional.

Título V

De las Empresas Públicas y Privadas

Retornar los neumáticos usados al centro de servicio, distribuidor, y/o centro de acopio, además de cumplir con las instrucciones de manejo seguro de neumáticos establecidos por los fabricantes e importadores.

Título VI

Del Usuario Final de Neumáticos

Retornar los neumáticos usados al centro de servicio, distribuidor, y/o centro de acopio, además de cumplir con las instrucciones de manejo seguro de neumáticos establecidos por los fabricantes e importadores.

Título VII

De los Gestores de Neumáticos Usados

Toda persona natural o jurídica que realice actividades de gestión de neumáticos usados deberá estar autorizada por la Autoridad Ambiental competente y realizará la declaración anual de desechos especiales generados.

Título VIII

Del Estado

Promover la utilización de materiales, reutilizables, reciclables, biodegradables y valorizables así como productos fabricados de material reciclado que cumplan las especificaciones técnicas exigidas por la normativa ambiental aplicable y la Normativa Técnica Ecuatoriana. Asimismo deberá generar políticas de calidad que disminuyan la generación de neumáticos usados.

Título IX

De la Autoridad Ambiental Nacional

Controlar y vigilar el cumplimiento de medidas establecidas en el acuerdo, así como registrar e inspeccionar las instalaciones dedicadas al tratamiento y disposición final de neumáticos usados.

Sección IV

Del Sistema de Eliminación y Disposición Final

Toda persona natural o jurídica que realice procesos de eliminación de neumáticos usados deberá contar con la autorización ambiental otorgada por la Autoridad Ambiental competente.

Los procesos de tratamiento de neumáticos usados se realizarán conforme a la Normativa Técnica Ecuatoriana y a la Normativa Ambiental aplicable en este orden:

- Reúso
- Reciclaje
- Coprocesamiento

Sección V

De las Prohibiciones

Se prohíbe:

- a. Almacenar neumáticos cerca de los cuerpos de agua
- b. Acumular neumáticos a cielo abierto
- c. Disponer de neumáticos usados en escombreras y botaderos
- d. Enterrar neumáticos usados
- e. Abandonar neumáticos usados en espacio público

- f. Quemar neumáticos a cielo abierto
- g. Depositar neumáticos usados junto a residuos sólidos
- h. Disponer neumáticos usados de manera inadecuada como desecho sólido en los rellenos sanitarios.

2.1.2 Disposición Final de Neumáticos Usados en la Ciudad de Cuenca

El Ministerio del Ambiente del Ecuador define la disposición final, como la acción de depósito permanente de los neumáticos usados en sitios y condiciones adecuadas para evitar daños a la salud y al ambiente.

En la ciudad de Cuenca la disposición final de los neumáticos se realiza directamente al relleno sanitario de Pichacay.

2.1.2.1 Relleno Sanitario de Pichacay

El relleno sanitario de Pichacay está localizado a 21 km al sur de la ciudad de Cuenca en la parroquia rural de Santa Ana, el sitio ocupa una área de cuatro hectáreas que está rodeado por tierra agrícola, a la municipalidad le pertenecen 12 hectáreas más de tierra agrícola para el desarrollo y ampliación del relleno, (EMAC, 2014).

El sitio le pertenece a la Municipalidad de Cuenca y es operado por la Empresa Municipal de Aseo de Cuenca, EMAC. En base a tasas de disposición de desechos, se espera que el sitio alcance su capacidad para el año 2021, (EMAC, 2014).

- **Disposición Final de Neumáticos en el Relleno Sanitario**

Según datos entregados por la Empresa Municipal de Aseo de Cuenca, EMAC, desde el año 2007 hasta el año 2014 se han receiptado 1634,95 toneladas de residuos de neumáticos.

Tabla 1. Peso de neumáticos usados registrados en el relleno sanitario desde el año 2007 a 2014

Mes	2007 (Ton)	2008 (Ton)	2009 (Ton)	2010 (Ton)	2011 (Ton)	2012 (Ton)	2013 (Ton)	2014 (Ton)
Enero		9,21	20,15	21,96	24,88	22,94	20,23	19,3
Febrero	2,84	7,95	16,02	15,92	51,64	18,35	12,08	8,58
Marzo	12,58	9,9	21,18	15,68	7,48	15,06	7,61	15,04
Abril	11,95	6,17	21,88	24,67	28,57	9,28	30,05	12,16
Mayo	1,54	14,22	7,12	26,08	7,95	15,18	29,62	3,22
Junio	9,88	14,58	12,51	20,61	29,42	10,09	33,94	0,69
Julio	15,47	9,88	20,83	23,95	21,66	24,09	17,36	20,18
Agosto	6,47	8,01	23,94	27,97	5,88	13,69	9,86	14,55
Septiembre	8,07	3,34	20,53	19,18	13,31	36,47	14,04	32,31
Octubre	1,23	21,84	5,69	23,74	24,3	17,96	51,15	12,12
Noviembre	6,52	4,19	7,95	31,23	10,25	28,6	48,79	
Diciembre	10,93	10,7	37,81	40,52	13,08	39,3	18,19	
Total	87,48	119,9	215,61	291,51	238,42	251,01	292,92	138,1
Promedio Mensual	7,95	10	17,97	24,29	19,87	20,92	24,41	13,82

Fuente: EMAC, Registro de llantas receptadas en el relleno sanitario de Pichacay, 2014.

2.2 Aprovechamiento Energético de Neumáticos Usados

El aprovechamiento energético o la valoración energética tiene por objetivo extraer el poder calorífico de los neumáticos usados, a fin de sustituir parte de los combustibles convencionales. El poder calorífico de los neumáticos es de 35 MJ/Kg, por lo que se trata de un excelente combustible que permite ahorrar entre 10-12 Kg de carbón, o 7,52 Kg de petróleo por cada neumático usado como combustible, (Aguado Alonso, 2010).

2.2.1 Ventajas del Aprovechamiento Energético.

- Disminución de la cantidad de residuos.
- Reducción del consumo de combustibles fósiles.

Las tecnologías de valoración energética para neumáticos usados, pueden agruparse de manera muy general en las siguientes tecnologías:

2.2.1.1 Pirólisis

Se considera como un tratamiento termoquímico de residuos sólidos, el cual se basa en la descomposición térmica de la materia orgánica, o compuestos basados en carbono, en concentraciones de oxígeno suficientemente bajas como para no producir combustión. Los productos obtenidos son de gran valor como combustible, (Aguado Alonso, 2010).

El objetivo principal de la pirólisis, es la reducción de residuos para ser transformados en materiales, que pueden ser aprovechados energéticamente o usados como materia prima en algunos procesos industriales, (SEDESOL, 2010).

2.2.1.2 Termólisis

En ésta tecnología de valorización energética de neumáticos usados, se somete a un calentamiento a altas temperaturas en el que no existe oxígeno. Las altas temperaturas y la ausencia de oxígeno, tienen el efecto de destruir los enlaces químicos, entonces aparecen cadenas de hidrocarburos, (Aguado Alonso, 2010).

Mediante el proceso, se obtienen de nuevo los compuestos originales del neumático, que pueden volver como materia prima a las industrias, (Jornadas Ambientales, Ramos Castellanos, Álvarez Oquina, & Ramos Criado, 2002).

2.2.1.3 Gasificación

Es un proceso termoquímico de descomposición de materia orgánica en un ambiente caracterizado por un déficit de aire, respecto al estequiométrico necesario para realizar la combustión completa de la misma, generando un producto gaseoso combustible compuesto principalmente por hidrógeno, monóxido de carbono, metano, dióxido de carbono, vapor de agua, nitrógeno y trazas de hidrocarburos pesados, (Pérez Bayer, 2009).

El gas obtenido en el proceso, se puede utilizar de una forma mucho más flexible como materia prima de procesos químicos, combustible en calderas, motores y turbinas. Las cenizas pueden ser utilizadas en la construcción o como fertilizante, (Elías Castells, 2005).

2.3 Proceso de Pirólisis

El aceite pirolítico y los gases obtenidos en este proceso, están teniendo un nuevo interés, ya que son fáciles de manipular, almacenar, transportar y pueden ser usados directamente como combustibles, (Williams, Besler, & Taylor, 1990).

El carbón tiene potencial para ser usado como combustible sólido, carbón activado o negro de carbón, (M. Joan Comstock, 1980).

Las temperaturas óptimas del proceso oscilan entre 250 a 350 °C y la distribución de los productos depende de la materia inicial y las condiciones de operación. A mayor temperatura y tiempo de residencia, mayor es el rendimiento del gas, (Murillo, 1999).

2.3.1 Descripción del Proceso de Pirólisis

Durante el proceso de pirólisis, la materia orgánica de poco valor se transforma en productos de alto contenido energético como: carbón y alquitrán. Los gases como el hidrógeno, nitrógeno, metano, etano, propano, butano, pentano, amoníaco, oxígeno, monóxido y bióxido de carbono obtenido en el proceso, pueden ser utilizados como combustibles. De igual manera los aceites (mezclas de benceno, tolueno, xileno y

otros), sales y metales reducidos pueden ser utilizados como materia prima en otros procesos, (SEDESOL, 2010).

Ilustración 1. Esquema del proceso de pirólisis



Fuente: Los Autores

La aportación del calor divide al proceso de pirólisis en dos grandes grupos:

- **Sistemas alotérmicos:** En este sistema la transmisión del calor se lleva a cabo por conducción y radiación de las paredes del reactor, la fuente de energía suele ser la combustión de parte de los gases producidos por el propio proceso. A la temperatura que se realizan los procesos convencionales (500 a 600 °C), los productos de la pirólisis obtenidos son, un residuo sólido y otra fracción gaseosa que están en función de la naturaleza del material pirolizado y de las condiciones del proceso, (Castells, Velo, & E-libro, 2012).
- **Sistemas autotérmicos:** En este sistema las reacciones de termorreducción deben realizarse en un medio químicamente inactivo, o con una ligera inyección de oxígeno, lo cual facilita el aumento de la temperatura al interior del reactor y mayor eficiencia térmica, (Castells et al., 2012).

2.3.2 Características de los Productos de la Pirólisis

Las características de las principales fracciones obtenidas durante el proceso de pirólisis son las siguientes, (Castells et al., 2012):

1. La fracción gaseosa contiene básicamente hidrógeno, metano, monóxido de carbono, dióxido de carbono y otros gases, dependiendo básicamente de las características del material a pirolizar y de las condiciones de la operación.
2. Una fracción condensable o fracción líquida integrada por un conjunto heterogéneo de vapores, la cual consiste en alquitranes y aceites que contienen agentes químicos tales como ácido acético, acetona y metanol.
3. Una fracción sólida conocida como coque o char residual, el cual consiste en un carbón casi puro mezclado con el material inerte que entra en el proceso.

2.3.3 Factores que Intervienen en el Proceso de Pirólisis

El rendimiento de los productos obtenidos en el proceso, depende de las características específicas del sistema tales como; temperatura, presión, velocidad de calentamiento, tamaño de partícula, masa inicial y sistema intercambiador de calor, (Berrueco, Esperanza, Mastral, Ceamanos, & García-Bacaicoa, 2005).

2.3.3.1 Temperatura y Tiempo de Residencia.

La temperatura y el tiempo de residencia son los factores que tienen mayor influencia en el proceso de pirólisis, estas variables determinan la velocidad de descomposición térmica, así como la estabilidad de la materia prima que ingresa, y de igual manera influye directamente en los productos obtenidos, (Scheirs & Honoraryessor, 2006).

A altas temperaturas y largos tiempos de residencia, aumenta el rendimiento de gases y disminuye el rendimiento de los líquidos, un aumento en la generación de CH₄, H₂, C₂H₄ y CO y menor producción de hidrocarburos gaseosos pesados (C_mH_n) para un

rango de estudio entre 360 a 810 °C, (González, Encinar, Canito, & Rodríguez, 2001), (Dai, Yin, Wu, Zhang, & Chen, 2001).

2.3.3.2 Presión

Este factor tiene un efecto considerable tanto en el proceso de pirólisis como en la obtención de productos, se ha determinado que al trabajar con presiones elevadas el rendimiento de los gases no condensables se incrementa, y existe una disminución del producto líquido, (Gao, 2010).

2.3.3.3 Tamaño de la Partícula

Influye sobre los mecanismos de transferencia de calor. A mayor tamaño de la partícula, menor velocidad de reacción y menor rendimiento en gases y líquidos. De acuerdo con Murillo (1999), para partículas de tamaño superiores a 10 mm se observan limitaciones en cuanto a la transferencia de calor. Así mismo González (2001), manifiesta que para tamaños menores a 5 mm las anteriores limitaciones cesan y no hay influencia de sobre la velocidad del proceso.

2.3.3.4 Velocidad de Calentamiento

Al igual que la temperatura, la velocidad de calentamiento es una de las variables más importantes del proceso de pirólisis, y marca la diferencia entre una pirólisis suave y una pirólisis flash. En la pirólisis suave el proceso que controla la descomposición es generalmente la reacción química y el rendimiento de residuo sólido carbonoso es mayor; mientras que en la pirólisis flash la descomposición está controlada por la transmisión de calor y el rendimiento de gases y líquidos es mayor, (Aracil Sáez, 2011).

2.3.4 Reactores de Pirólisis

Desde el punto de vista operativo, los procesos de pirólisis pueden encuadrarse en tres grandes bloques: pirólisis convencional, rápida e instantánea. En la tabla 2, se presentan las principales características de los diferentes tipos de pirólisis.

Tabla 2. Comparación de los procesos de pirólisis

Proceso	Temperatura °C	Velocidad de calentamiento, °C/s	Producción de gases, s	Producto mayoritario
Convencional	500	2	5	Char y condensables
Rápido	400 a 800	>2	< 2	A temperaturas moderadas 500 °C, condensables
Instantáneo	> 600	> 200	< 0,5	Gases e hidrocarburos ligeros

Fuente: Castells, Tratamiento y valorización energética de residuos, 2005

Sistemas Convencionales: En este caso se utilizan equipos rotatorios o de lecho móvil. Dependiendo como se suministre la energía necesaria para la descomposición térmica del residuo, estos reactores pueden ser autotérmicos o alotérmicos, (Elías Castells, 2005).

Sistemas Avanzados: En la pirólisis instantánea y rápida la alternativa más prometedora es la de lecho fluidizado. La producción de carbón activo pudiera construir la salida más interesante para este tipo de pirólisis, (Elías Castells, 2005).

2.3.4.1 Tipos de Reactores de Pirólisis

Los reactores se clasifican según el proceso de alimentación y retirada del producto o respondiendo a alguna necesidad en particular, en los siguientes tipos, (Gao, 2010), (Alvaro Franco, 2005):

Por la forma de obtener la producción:

- Reactores BATCH (por lotes).
- Reactores semicontinuos.
- Reactores continuos.

- Reactores continuos de mezcla completa (CSTR).
- Reactores tubulares.
- Reactores de lecho móvil
- Reactores continuos con recirculación

Por la forma de efectuar la reacción química:

- Reactores homogéneos
- Reactores heterogéneos.
- Reactores no catalíticos.
- Reactores catalíticos.
 - Reactores catalíticos de lecho fijo.
 - Reactores catalíticos de lecho fluidizado.
 - Reactores enzimáticos o biorreactores.

2.4 Caracterización de Combustibles

La caracterización de un combustible consiste en identificar sus propiedades físicas y químicas a través de diversas pruebas de laboratorio. Es importante conocer estos parámetros debido a que el diseño de los depósitos de combustible en los automóviles, bombas y conductos se basan en las propiedades físicas y químicas del combustible a utilizar, para evitar desgastes, pérdidas por evaporación, así como caídas de presión, (Camarillo Montero, 2011).

Dentro de los parámetros más comunes, se encuentran: olor, aspecto, densidad relativa, densidad API, viscosidad, punto de inflamación, punto de congelación, número de Cetano, temperatura de destilación y porcentaje de queroseno.

2.4.1 Olor y Aspecto

El olor y aspecto físico es una prueba importante de realizar, ya que se debe reconocer un combustible, solamente por su olor y apariencia, para que en caso de fuga o derrame, se pueda identificar de que tipo de combustible se trata y así realizar el

procedimiento adecuado para evitar un accidente. Los olores característicos de los combustibles líquidos son muy penetrantes y el estar en contacto directo durante un tiempo prolongado, puede causar náuseas, cefaleas e incluso vómito, (Camarillo Montero, 2011).

2.4.2 Densidad Relativa

Es la relación entre la masa (peso en el vacío) de un volumen dado de material, a una temperatura T_1 , y la masa de un volumen igual de agua, a una temperatura de referencia T_2 , (COVENIN, 1993).

2.4.3 Densidad API

La densidad API es una escala arbitraria relacionada con la densidad relativa del petróleo y determinada a $15,6/15,6$ °C ($60/60$ °F), (INEN, 2001).

2.4.4 Viscosidad

Viscosidad cinemática. Es la relación entre la viscosidad y la densidad de la muestra; es una medida de la resistencia al flujo de un líquido bajo la acción de la gravedad, (INEN, 1986).

Viscosidad dinámica (coeficiente de). Es la relación entre el esfuerzo cortante aplicado y el coeficiente de corte; es una medida de la resistencia al flujo de un líquido, (INEN, 1986).

2.4.5 Punto de Inflamación

La temperatura de inflamación es aquella en la que un combustible emite gases inflamables suficientes para alcanzar en su entorno el límite inferior de inflamabilidad, a partir del cual, con una fuente de calor externa puede producirse una combustión no automantenida, (PEMEX, 2010), (INEN, 1986).

2.4.6 Punto de Congelación

Es la temperatura del combustible en el que los cristales de hidrocarburos sólidos, formados en el enfriamiento, desaparecen cuando se deja subir la temperatura del combustible bajo condiciones específicas de la prueba, (ASTM, 2012).

2.4.7 Número de Cetano

El número de Cetano en el combustible diésel define la calidad del mismo, indicando el tiempo que tarda desde que es inyectado hasta que entra en ignición. Esta medida es equivalente también a la homogeneidad de la combustión, cuanto más homogéneo es el quemado, más completo y de mayor calidad es el combustible, (INVENTARIA, 2008).

2.4.8 Punto Final de Destilación

Es la temperatura más alta observada, durante toda la destilación, en el termómetro ubicado en el cuello del matraz de destilación, (INEN, 1982).

2.4.9 Porcentaje de Queroseno

El queroseno es el resultado durante la destilación de una fracción de combustible, con un punto inicial (P_i) de destilación situado entre 150 y 180°C, y un punto final (P_f) de destilación situado entre 225 y 250 °C, (TOTAL, 2012).

2.4.10 Composición Química

Los derivados del petróleo diésel se compone de aproximadamente 75 % de hidrocarburos saturados (principalmente parafinas y cicloparafinas) y 25 % de hidrocarburos aromáticos, (PETROSUD, 2014).

2.4.10.1 Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs)

Los HAPs son un grupo de sustancias químicas que contienen más de un anillo bencénico condensado en su estructura, pero algunos de ellos contienen también anillos de cinco carbonos. Los HAPs constituyen una fuente importante de contaminación a la atmósfera, se encuentran generalmente como mezclas complejas o como parte de productos de combustión como por ejemplo el hollín, (ATSDR, 1995).

2.4.10.1.1 Los HAPs y la Pirólisis

Los HAPs pueden aparecer en el medio ambiente mediante la pirólisis a alta temperatura de la materia orgánica que contiene carbono e hidrógeno, que pueden liberarse al medio en forma de partículas en el aire o en subproductos líquidos o sólidos resultantes del proceso pirólitico, (García-Martínez, 2005).

La completa combustión de la materia orgánica daría como resultado la obtención de dióxido de carbono y agua, sin embargo en el proceso de pirólisis al no existir oxígeno, las elevadas temperaturas de los compuestos orgánicos producen algunos fragmentos orgánicos (moléculas y radicales) que reaccionan con otros cercanos formando una gran variedad de HAPs. La formación de HAPs es favorecida cuanto menos sea la disponibilidad de oxígeno en el ambiente para completar la combustión. La cantidad de HAPs también depende de la temperatura y de la naturaleza del material orgánico en la reacción, (García-Martínez, 2005) (Mastandrea et al., 2005).

3.4.10.1.2 Toxicidad de los HAPs

La principal característica que presentan estos compuestos para la salud es su capacidad para inducir la formación de cáncer en los organismos expuestos. Ciertos HAPs tienen una fuerte actividad carcinogénica como es el caso del benzo (a) antraceno en animales y benzo (a) pireno en humanos, (Mastandrea et al., 2005).

2.5 Prueba de Combustión en Motores Diésel

Una de las principales pruebas de combustión a las que se somete a un motor son la emisión de gases de combustión, fallos de combustión, rendimiento de combustible, temperatura de los gases de combustión y potencia-par que entrega el motor a la carga, (Camarillo Montero, 2011).

2.5.1 Emisión de Gases Contaminantes en Motores Diésel

El análisis de los gases de combustión consiste en medir la cantidad de gases contaminantes que el motor emite a la atmósfera. Por lo regular se analizan los siguientes gases: Dióxido de carbono (CO_2), Oxígeno (O_2), Monóxido de Carbono (CO), Óxidos de Nitrógeno (NO_x), Dióxido de Azufre (SO_2), e Hidrocarburos no Quemados (HC), (Serrano & Carranza, 2005).

En nuestro país se cuenta con varias normas, destacando la Norma de Emisiones al Aire desde Fuentes Fijas de Combustión en el libro VI Anexo III del Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA), la cual establece los niveles máximos permisibles de emisión de gases provenientes del escape de motores de combustión interna.

2.5.1.1 Contaminación Atmosférica

“Se define como la acumulación en el aire de sustancias en concentraciones tales que provoquen daños provisionales o permanentes a los hombres, los animales, las plantas y los bienes”, (Caselli, 1992).

“La contaminación atmosférica se define como la impurificación de la atmósfera por la inyección y permanencia temporal en ella de materias gaseosas, líquidas o sólidas ajenas a su composición normal o en proporción claramente superior a la de ésta”, (Zanón & Triola, 2008).

2.5.1.1.1 Contaminantes Atmosféricos

La concentración a la cual una sustancia provoca contaminación varía mucho, según la sustancia de que se trate, si fijamos la cantidad global de todos los contaminantes solo cinco de ellos aportan el 95% del total. Estos contaminantes son: monóxido de carbono (CO), el bióxido de azufre (SO₂), los óxidos de nitrógeno (NO_x), los hidrocarburos y el material particulado, (Caselli, 1992). Algunos de los gases que a veces se los trata como contaminantes son componentes naturales de la atmósfera, como el dióxido de carbono (CO₂) y el ozono (O₃), (Zanón & Triola, 2008).

- **Dióxido de Azufre**

Se produce en la combustión de carbón e hidrocarburos, puesto que su concentración está relacionada con el grado de impureza del combustible. La producción de la lluvia ácida y el aumento de los niveles de partículas (PM₁₀) y (PM_{2,5}) se ven incrementadas cuando el SO₂ y los oxidantes fotoquímicos reaccionan en la atmósfera formando el trióxido de azufre y posteriormente al combinarse con el agua forman el ácido sulfúrico y partículas sulfatadas, (Sbarato, Sbarato, & E-libro, 2009).

- **Monóxido de Carbono**

Se produce en la combustión incompleta especialmente en los automóviles con motores de ciclo Otto, además de las chimeneas industriales, las calderas, los termotanques o calefones, las estufas, cocinas y calentadores de queroseno, (Sbarato et al., 2009).

- **Dióxido de Nitrógeno**

Se produce directa e indirectamente por la combustión a altas temperaturas, el Nitrógeno presente en el combustible y en el aire se oxidan en el proceso de combustión, formando el Óxido Nítrico (NO) y en menor proporción el Dióxido de Nitrógeno (NO₂). En presencia de la radiación solar, el NO se convierte mediante reacciones fotoquímicas en NO₂ y esta su vez en ozono (O₃), al combinarse con compuestos orgánicos volátiles (COV_s). El NO₂ también puede combinarse con el

agua para formar ácido nítrico y nitratos que contribuyen en la producción de lluvia ácida y el aumento en los niveles de PM₁₀ y PM_{2,5}, (Sbarato et al., 2009).

- **Material Particulado**

Está constituido por partículas sólidas o líquidas en suspensión en el aire, su composición química es diversa y su tamaño varía de 0,005 a 100 µm de diámetro aerodinámico. El material particulado se produce en los motores a diésel y en la combustión incompleta de combustibles fósiles, (Sbarato et al., 2009).

2.5.1.1.2 Efectos de la Contaminación Sobre la Salud.

Según la Organización Mundial de la Salud, los seres humanos necesitamos de 10 a 20 m³ de aire al día para que no se produzcan efectos adversos sobre la salud.

Al hablar sobre efectos sobre la salud humana es preciso especificar el tipo de contaminante o contaminantes a los que está expuesta la población. Estos contaminantes pueden ser diferentes en función de la localización geográfica, meses de verano o de invierno, pues los procesos atmosféricos favorecen la concentración de unos u otros contaminantes, (Gallego Picó, González Fernández, & Sánchez Gimeno, 2012).

A continuación se resumen algunos efectos de los gases sobre la salud:

- **Dióxido de Azufre**

La exposición a SO₂ en valores por encima de los establecidos disminuye la función pulmonar, agrava enfermedades respiratorias preexistentes, reduciendo la capacidad pulmonar para liberarse de las partículas que ingresan al tracto respiratorio. La exposición a altas concentraciones y corto plazo pueden irritar el tracto respiratorio y congestionar los conductos bronquiales, (Sbarato et al., 2009).

- **Monóxido de Carbono**

La exposición a CO puede contribuir a la disminución del suministro de oxígeno en los tejidos, esto se debe a que la hemoglobina de la sangre tiene mayor afinidad con el CO que con O₂ lo que da lugar a la formación de carboxihemoglobina, (Sbarato et al., 2009).

Los efectos a corto plazo dan lugar a la sensación de fatiga que se experimenta en las alturas, malestar estomacal, la exposición prolongada puede exacerbar las enfermedades del corazón y pulmón especialmente en neonatos, embarazadas, ancianos y personas que sufren de enfermedades crónicas, (Sbarato et al., 2009).

- **Dióxido de Nitrógeno**

El NO₂ puede causar problemas respiratorios especialmente en asmáticos y niños, en animales se ha reportado que la exposición a corto plazo puede debilitar los mecanismos de defensa e incrementar la susceptibilidad a infecciones respiratorias, mientras que a largo plazo se ha reportado cambios estructurales en los pulmones, (Sbarato et al., 2009).

- **Material Particulado**

El material particulado agrava enfermedades pulmonares y cardíacas preexistentes causando daños pulmonares especialmente en niños y ancianos. No todas las partículas suspendidas afectan a la salud en la misma forma, las partículas que más afectan son aquellas que constituyen la fracción respirable; partículas menores a PM₁₀ y en mayor grado las partículas menores a PM_{2,5}, (Sbarato et al., 2009).

2.5.2 Opacidad de los Humos de Escape

La opacidad está referida a la evaluación de emisión de gases a la atmósfera generados por la combustión de diésel. El Hollín es la principal emisión contaminante de los motores Diésel, el nivel de emisión de este particulado se mide a través de la opacidad, se trata de minúsculas partículas en suspensión las cuales no pueden ser tratadas como

un gas, que están en forma de humo durante el proceso de combustión y cuanto más sea la presencia de humo mayor será el contenido de las partículas, (Rojas, 2004), (Agudelo, Bedoya, & Agudelo, 2011).

2.5.3 Fallos en el Proceso de Combustión

La prevención de posibles fallas en maquinarias, es necesaria para una operación confiable y segura de las mismas, el riesgo de fallas y el tiempo en que un motor queda fuera de servicio pueden disminuirse solo si los problemas potenciales son anticipados y evitados. Por lo tanto una de las herramientas con las que se cuenta para el análisis de los fallos en el proceso de combustión es la medición y análisis del ruido y vibraciones en los motores de combustión interna, (Tapia, 2006).

2.5.3.1 Ruido de Combustión

Se caracteriza por ser la principal fuente de ruido en los motores, depende de varios parámetros entre ellos la velocidad, carga, estrategia de inyección, etc., (Muñoz & Fernanda, 2013). El ruido de combustión es producido por el aumento brusco de la presión en el cilindro, que se origina después del periodo del tiempo de retraso, resultando en la vibración estructural del bloque y la excitación de la resonancia del gas en el interior de la cámara de combustión, radiándose de esta manera ruido, (Guarango Pillco & Lazo Naula, 2014).

2.5.3.2 Vibraciones del Motor

La vibración se produce por dos mecanismos relacionados con el proceso de combustión: las fuerzas de presión y las fuerzas mecánicas, (Ramírez & Christian, 2013):

- **Fuerzas de Presión:** Actúan directamente sobre las superficies que conforman la cámara de combustión y dependen principalmente de la estrategia de inyección y de distintos parámetros de diseño del motor, como la geometría de la cámara de combustión y la relación de compresión; estos influyen en la

velocidad de quemado del combustible y por lo tanto, afectan la variación temporal de la presión de los gases en el interior del cilindro.

- **Fuerzas Mecánicas:** Son provocadas por el cabeceo del pistón, holguras en los cojinetes, deformación de los elementos y fricción, entre otras.

Las vibraciones en una máquina no son buenas pueden causar: desgaste, fisuras, pérdida de efectividad de sellos, rotura de aislantes, ruido, etc. Pero al mismo tiempo las vibraciones nos indican la condición mecánica de una maquinaria y es una herramienta de predicción muy sensible de la evolución de un defecto, (Tapia, 2006).

2.5.3.3 Medición y Análisis de Ruido y Vibraciones

Los parámetros descriptores de la amplitud de vibración y ruido más usados en máquinas son:

Valor RMS: El Valor Medio representa un estimado del contenido energético en la vibración o ruido de una máquina, en el análisis de vibraciones este valor es utilizado para cuantificar la severidad de la vibración, (Díaz, 2011).

Factor de Cresta: Es igual a la amplitud del pico de la forma de onda dividida por el Valor de RMS, en el análisis de vibraciones permite una rápida idea de que tanto impacto está ocurriendo en la forma de la onda y está asociado al desgaste del balero de los rodillos, cavitación y desgaste de los dientes de engrane, (Friedman, 2004).

La Curtosis: La curtosis y el factor de cresta representan parámetros estadísticos de gran valor en la detección de fallas, ya que para el caso normal la señal que se observa mediante un acelerómetro posee una distribución normal y cuando algunos de sus elementos empieza a fallar tiende a alejarse de la misma, en estos casos el factor de cresta tiene a aumentar tomando valores superiores, (Bendat, 1986).

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1 Diagnóstico de la Situación Actual de los Residuos de Neumáticos Usados en la Ciudad de Cuenca.

Para realizar el diagnóstico se utiliza información primaria obtenida de los registros de residuos de neumáticos que ingresan al relleno sanitario de Pichacay, desde el año 2007 hasta Noviembre del 2014, los mismos que fueron proporcionados por la Empresa Municipal de Aseo de Cuenca EMAC.

Se realiza cuadros estadísticos de la cantidad de residuos de neumáticos y se determina las principales fuentes de producción de los mismos clasificándolos en tres sectores:

- Particulares
- Industrias
- Sector Público

El sector particular engloba los centros de cambio de neumáticos (vulcanizadoras, tecnicentros) y los dueños de vehículos. El sector industrial abarca todas las industrias que se encuentran en funcionamiento en la ciudad. El sector público comprende las empresas públicas de la ciudad.

Se determina la tasa de crecimiento anual de estos residuos por sectores y en general desde el año 2007 al año 2014, en base a la siguiente fórmula:

$$\text{Porcentaje de crecimiento} = \left(\frac{\text{valor final} - \text{valor anterior}}{\text{valor anterior}} \right)$$

En donde:

Porcentaje de crecimiento = crecimiento anual, %

Valor final = producción de residuos del último año

Valor anterior = producción de residuos del año anterior, al último año.

3.2 Desarrollo de Diseños Experimentales

En esta fase se describe el proceso que se llevó a cabo para el análisis de los factores que influyen en la variable respuesta o dependiente-fracción líquida del proceso de pirólisis en el prototipo experimental de la Universidad Politecnica Salesiana.

3.2.1 Diseños Factoriales 2^k

Este diseño permite explorar una zona escogida del dominio experimental y encontrar una dirección para la optimización del proceso, (Massart, 1997). En los diseños factoriales 2^k se tiene k factores de interés que contiene dos niveles cada uno, son útiles para determinar de un gran número de factores, cuales son los que realmente influyen sobre la variable respuesta, (Calidad, 2008). Se utiliza para comprobar como un cambio en la temperatura o tiempo de retención afectan en el rendimiento de una reacción, (Ferré, 2003).

3.2.2 Análisis de Varianza

La herramienta ANOVA, es decir el análisis de la varianza, es una herramienta útil para saber que variables son significativas en el experimento y cuales no. Esta prueba se realiza bajo el supuesto de que los datos están distribuidos normalmente, si la probabilidad de cometer error es menor a 0,05 con un nivel de confianza del 95% entonces los datos son significativos, si algún factor no es significativo según este análisis se descarta, (Garza, 2013).

3.3 Características de la Materia Prima

Los neumáticos usados, se componen principalmente de caucho sintético o natural, negro de carbono, óxido de zinc, acero, material textil y otros aditivos. Las tablas 3 y 4 proporcionan la composición de las sustancias contenidas, así como la composición química de los neumáticos fuera de uso, (Cano Serrano et al., 2007).

Tabla 3. Composición de sustancias en los neumáticos fuera de uso

Material	Porcentaje (%)
Caucho/elastómero	48
Negro de carbono	22
Metal	15
Textil	5
Óxido de Zinc	1
Azufre	1
Aditivos	8

Fuente: Etra, European Tyre Recycling Association, 2011

Tabla 4. Composición química de los neumáticos fuera de uso

Elemento	Contenido	Unidad
C	70	%
Fe	16	%
H	7	%
O	4	%
Oxido de Zn	1	%
S	1	%
N2	0,5	%
Acido esteárico	0,3	%
Halógenos	0,1	%
Cd	10	mg/Kg
Cr	90	mg/Kg
Ni	80	mg/Kg
Pb	50	mg/Kg

Fuente: Etra, European Tyre Recycling Association, 2011

Como combustible, los neumáticos desechados son una excelente fuente de energía. Los neumáticos tienen un poder calorífico que varía entre los 6,500 a 9,000 Kcal/Kg, dependiendo de la composición, y de si el metal ha sido removido. A modo de comparación el carbón presenta un valor calorífico de 7.400 Kcal/Kg, (Baumeister, Avallone, & Baumeister III, 1978).

Tabla 5. Poder calorífico de los materiales

Combustible	Poder calorífico (Kcal/Kg)
Estiércol de vacuno	4.054
Paja de trigo	4.657
Madera seca	4.793
Corteza de pino	5.204
Carbón	7.400
Neumáticos (promedio)	8.300
Petróleo	10.409

Fuente: Marks, Manual del Ingeniero Mecánico, 1978

3.3.1 Obtención de Materia Prima.

Se procede a tomar la materia prima destinada para realizar los análisis, los mismos que son procedentes de los artesanos del caucho de la ciudad de Cuenca. Los principales neumáticos fuera de uso utilizados por los artesanos son: General Tyre, Micheline, Good Year y Maxxis.

3.3.2 Preparación de la Materia Prima

Los residuos de caucho son ingresados al Molino de Plásticos BREBENDER CWB modelo Grano-Grinder del Laboratorio de Transformación de Polímeros de la carrera de Ingeniería Mecánica con el fin de alcanzar un tamaño de partícula de aproximadamente 0,5 mm.

3.4 Equipos

3.4.1 Prototipo de Pirólisis Experimental de la Universidad Politécnica Salesiana

El equipo de pirólisis experimental es tipo semi Batch y posee las siguientes especificaciones, (véase anexo 2. Esquema del prototipo de pirólisis experimental):

- Materiales en acero inoxidable 304 de espesor 4 mm
- Medidas: diámetro 20 cm y alto 25 cm.
- Tapa desmontable
- Manómetro de baja presión
- Válvula de seguridad de ¼"
- Niples para entrada y salida de gases de diámetro ½"
- Medidor de temperatura (digital) marca DELTA
- Alarma acústica para límite de temperatura calibrada.
- Sonda tipo J-K (900 °C)
- Módulos de calentamiento desmontables:
 - Potencia de consumo +- 1500 W
 - Voltaje 220 V/3 F
- Sistema de extracción de oxígeno.
 - Bomba de vacío
- Sistema de temperatura.
 - Programa de temperatura
- Sistema de enfriamiento.
 - Serpentín inoxidable tubo de diámetro ½" con cámara de enfriamiento
 - Torre de enfriamiento
- Sistema de recolección de gases.
 - Matraz de 500 mL
 - Tanque de 10 galones
- Sistema de recolección de líquidos.
 - Matraz de 200 mL

3.4.2 Molino de Plásticos BREBENDER CWB modelo Grano-Grinder

El equipo es utilizado en el Laboratorio de Transformación de Polímeros de la carrera de Ingeniería Mecánica para la granulación de polímeros, elastómeros, cerámicas y otros compuestos.

Especificaciones

Es de uso general para termoplásticos. El diseño del rotor y la configuración baja de la velocidad de rotación garantizan un excelente granulado con un constante tamaño sin polvo.

Cuenta con varios tamaños de pantalla (5 mm estándar) para proporcionar una amplia gama de proporciones granulares.

Está equipado con:

- Dos cortadores estacionarios
- Tres cortadores giratorios de 150 mm
- Motor 1,8 kW

Ilustración 2. Equipo de trituración



Fuente: Los Autores

3.4.3 Analizador de la Calidad de Petróleo SHATOX modelo SX-300

Cumple con la norma ASTM D 4737-03 “Método de prueba estándar para el Cálculo del índice de Cetano a través de las cuatro ecuaciones de la Variable”, la norma ASTM D 613 “Método de prueba estándar para número de Cetano en combustible diésel”, la

norma ISO 516-5, “Productos de petróleo - Determinación de la calidad de ignición de los combustibles diésel - método del motor de Cetano”

Ilustración 3. Analizador de la calidad de petróleo



Fuente: Los Autores

3.4.4 Vaso Abierto de Cleveland modelo K13900

El equipo cumple con las normas ASTM D92, D6074, D6158; AASHTO T48; ANS Z-11.6; IP 36; ISO 2592; DIN 51376; FTM 791-1103 y FTM 141-4294.

Especificaciones

El equipo consta con un aplicador de llama de ensayo, una taza de prueba, apoyo del termómetro, placa de calefacción y un calentador eléctrico. El aplicador está alineado con precisión según las especificaciones y los pivotes de aplicación de la llama de ensayo a intervalos de temperatura especificados. El equipo cuenta con un calentador de 1000 W de níquel-cromo con un control de calor variable para la configuración exacta de la tasa de aumento de temperatura.

Ilustración 4. Vaso abierto de Cleveland



Fuente: Los Autores

3.4.5 Cromatógrafo de Gases THERMO SCIENTIFIC modelo Trace GC ULTRA

El equipo está compuesto con una columna tipo TG-5MS de 30 metros de largo. Cuenta con un rango de temperatura de $-450\text{ }^{\circ}\text{C}$, se calienta de $50\text{ a }450\text{ }^{\circ}\text{C}$ en 420 segundos y se enfría de $450\text{ a }50\text{ }^{\circ}\text{C}$ en 250 segundos.

Ilustración 5. Cromatógrafo de gases



Fuente: Los Autores

3.4.7 Motor de Combustión Interna Diésel ENGINE modelo G-130301

Para realizar las pruebas de combustión se utiliza un motor de la Universidad Politécnica Salesiana, del Laboratorio de Combustión de la Carrera de Ingeniería Automotriz, el cual es un banco de pruebas que se utiliza para fines educativos y de investigación.

Tabla 6. Especificaciones del motor de la prueba

Nombre del Equipo	Montaje y desmontaje de motor a diésel
Modelo	G 130403
Dimensiones	70x65x76 cm (LxWxH)
Peso	200 kg
Alimentación	-----
Tipo de vehículo y sistema	HYUNDAI MOTORS PORTER 2,500 CC

Fuente: Los Autores

Ilustración 6. Motor de Combustión Interna Diésel



Fuente: Los Autores

3.4.8 Micrófono Piezoeléctrico Unidireccional PCB modelo HT378B02

Micrófono para determinar el ruido y las vibraciones del motor en el momento de la combustión que posee las siguientes características:

Tabla 7. Características del Micrófono Piezoeléctrico Unidireccional

Diámetro nominal del micrófono	1/2''
Sensibilidad	50 mV/Pa
Rango de frecuencia	6 – 10000 Hz
Rango de temperatura de operación	- 40 a +120 °C
Rango de frecuencia (+/- 1 dB)	6 – 10000 Hz
Rango de frecuencia (+/- 2 dB)	3.5 – 20000 Hz
Límite de frecuencia más baja	1 – 2.5 Hz

Fuente: www.pcb.com, 2014

Una de las características más relevantes que presenta este tipo de micrófono es que cuenta con un acondicionador de señal ICP (Integrated Circuit Piezoelectric), lo que significa que dentro de su encapsulado cuenta con un circuito preamplificador interno, el cual recibe la energía de excitación por el mismo conductor por el que envía la señal. La ventaja más importante que presenta los sensores de tecnología ICP es que directamente desde la salida del micrófono se pueden observar los datos en tiempo real.

Ilustración 7. Micrófono Piezoeléctrico Unidireccional



Fuente: Los Autores

3.4.9 Analizador de Vibraciones modelo A3716

El analizador de vibraciones o sistema de adquisición de datos es una interfaz que actúa entre una PC y las señales acústicas que pueda ofrecer el motor, la función de

este dispositivo es básicamente digitalizar las señales analógicas entrantes para su posterior análisis, para lo cual cuenta con un circuito convertidor analógico-digital.

Ilustración 8. Analizador de Vibraciones



Fuente: www.adash.com

3.4.10 Acelerómetro Sumergible modelo 8042

Es útil para medir vibraciones en elementos sumergidos tales como bombas, elementos mecánicos rotativos, cajas de cambio, etc.

Características Principales

Rangos: Desde 10 a 500 g, con rangos intermedios.

Ancho de banda: Hasta 15 kHz.

Señal de salida: IEPE estándar, conocida comercialmente como ICP.

Temperatura de trabajo: -20 a +80 °C.

Formato: Acelerómetro aislado fabricado en titanio soldado.

Ilustración 9. Acelerómetro



Fuente: www.sensores-de-medida.es

3.4.11 Comprobador de Gases de Escape Diésel MAHA modelo MET 6.2

Es un analizador de gases de escape de motores diésel que mide la opacidad y la concentración de partículas.

Tabla 8. Características del comprobador de gases de escape diésel

Rango de medición opacidad	100%
Tiempo de calentamiento aprox. de la célula de medición	180 s
Dimensiones Ancho	225 mm
Dimensiones Alto	160 mm
Dimensiones Largo	406 mm
Frecuencia de red mín.	50 Hz
Frecuencia de red máx.	60 Hz
Tensión de red mín.	110 V
Tensión de red máx.	230 V
Concentración de Partículas	0,1-1000 mg/m ³

Fuente: www.maha.de, 2014

Ilustración 10. Comprobador de Gases de Escape Diésel



Fuente: Los Autores

3.4.12 Medidor de Gases de Combustión EUROTTRON modelo GREENLINE 4000

Cuenta con dos sensores internos electroquímicos que determinan la concentración de Oxígeno y Dióxido de Carbono, tercer sensor que permite la medición de Óxidos de Nitrógeno y Dióxido de Azufre.

- **Especificaciones**

Cuenta con una impresora interna, memoria interna para almacenamiento de datos, interfaz RS-232 para la configuración del equipo, transferencia de datos y una electroválvula para enserar o reiniciar el equipo.

Ilustración 11. Medidor de Gases de Combustión



Fuente: Los Autores

3.5 Procedimiento y Ejecución de Experimentos

Los pasos a seguir para realizar los experimentos en el Prototipo de Pirólisis Experimental, son:

3.5.1 Definición de la Respuesta, los Factores y sus Niveles

Las variables respuestas serán la fracción líquida del combustible obtenido en mL, fracción sólida en gramos y el volumen de gases en cm^3 . Los factores elegidos se reflejan en la tabla 9.

Tabla 9. Factores y niveles de las variables del experimento

FACTORES	NIVELES	
	inferior	superior
Presión (P)	15 psi	55 psi
Temperatura (T)	340 °C	440 °C
Tiempo de residencia (Tr)	10 min	20 min

Fuente: Los Autores

3.5.2 Definición de las Pruebas a realizar

Se refleja las pruebas a realizar, definiendo las condiciones en las que hay que realizar cada prueba de acuerdo al diseño experimental.

Tabla 10. Matriz de diseño experimental

Prueba No	Presión (P)	Temperatura (T)	Tiempo de residencia (Tr)	Fracción líquida (mL)	Fracción sólida (gr)	Volumen de gases (cm ³)
1	15	340	10	Variables a obtener		
2	55	340	10			
3	15	440	10			
4	55	440	10			
5	15	340	20			
6	55	340	20			
7	15	440	20			
8	5	440	20			

Fuente: Los Autores

3.5.3 Realización de las Pruebas

Se procede a realizar las pruebas, en las condiciones indicadas en la matriz de diseño, el orden no influirá en el resultado.

Materiales y equipos

- Equipo Prototipo de Pirólisis Experimental
- Balanza
- Cápsula de porcelana
- Erlenmeyer de 250 cc
- Bomba de vacío

Procedimiento

Para el proceso se coloca 15 gramos de caucho, se procede a eliminar el oxígeno de la cámara del reactor y se ajusta la temperatura de trabajo. En el transcurso de la prueba se controla la presión de los gases condensables y no condensables. Al terminar con la prueba se procede a recoger los productos obtenidos y a pesarlos, (véase anexo 1. Proceso general del proceso de pirólisis y prueba de combustión.)

3.5.3.1 Formulación del Proceso

A continuación se describe el proceso formulado, llevado para la tabulación de los datos obtenidos en el proceso de pirólisis.

3.5.3.1.1 Volumen del Combustible

Para determinar el volumen del combustible líquido obtenido en el proceso se utiliza la siguiente formula:

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

En donde:

v = volumen del combustible, cm³

m = masa del combustible, g

d = densidad del combustible, g/cm³

La masa del combustible se obtiene de la diferencia de peso entre el erlenmeyer vacío y el erlenmeyer con el combustible obtenido en el proceso de pirólisis.

$$m = P_{ev} - P_{ecc}$$

En donde:

m = masa del combustible, g

P_{ev} = peso del erlenmeyer vacío, g

P_{ecc} = peso del erlenmeyer con el combustible, g

3.5.3.1.2 Residuos de Caucho del Proceso

Es la fracción sólida que queda en el interior del reactor cuando ya ha culminado el proceso de reacción de pirólisis. Se utiliza la siguiente formula:

$$R_c = P_{cv} - P_{cc}$$

En donde:

R_c = peso del residuo de caucho del proceso, g

P_{cv} = peso de la capsula vacía, g

P_{cc} = peso de la capsula con los residuos del caucho del proceso, g

3.5.3.1.3 Volumen de Gases del Proceso

El volumen de gases del proceso es proporcional al volumen de agua desplazado del tanque en el sistema de recolección de gases. La lectura se realiza en cm³.

3.6 Caracterización Físicoquímica, Cuantificación y Usos del Combustible

De la fracción líquida obtenida del proceso, se procede a realizar las siguientes pruebas: color, olor, densidad relativa, densidad API, viscosidad, punto de

inflamación, punto de congelación, número de Cetano, temperatura de destilación y porcentaje de queroseno.

3.6.1 Prueba de Color y Olor

Estas pruebas se basan en la percepción, es decir a través de los sentidos del observador.

3.6.2 Prueba de Densidad

Para determinar la densidad de la fracción líquida obtenida, se toma como base la normativa Venezolana COVENIN 2052-93 “Productos Derivados del Petróleo. Determinación de la Densidad y la Densidad Relativa de Líquidos por Medio del Picnómetro Bingham”

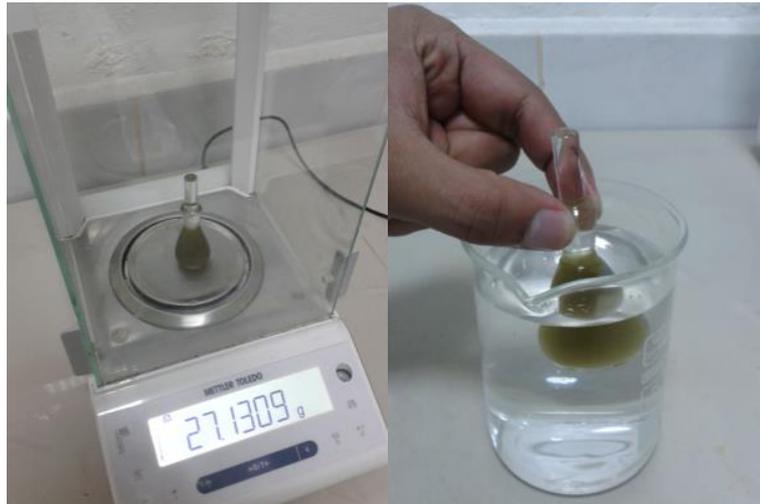
Equipos y Materiales

- Picnómetro de 10 mL
- Termómetro
- Balanza analítica con sensibilidad de 0,1 mg
- Vaso de Precipitación de 500 mL
- Mechero

Procedimiento

Se procede a pesar el picnómetro, entonces se coloca la fracción líquida del combustible y se introduce en un baño a temperatura constante de 30 °C, se espera aproximadamente unos 5 minutos para que se estabilice la muestra a la temperatura deseada e inmediatamente después se pesa. Se repite este procedimiento por tres veces para obtener mejores resultados.

Ilustración 12. Densidad del combustible



Fuente: Los Autores

Entonces tenemos:

- Peso del picnómetro vacío
- Peso del picnómetro más el volumen de la muestra

Para determinar la densidad se aplica la siguiente fórmula general:

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

En donde:

d = densidad de la muestra

m = masa de la muestra, g

v = volumen conocido del picnómetro, cm³

La masa de la muestra es:

$$m = (Ppv - Ppm)$$

En donde:

m = masa de la muestra, g

Ppv = peso del picnómetro vacío, g

Ppm = peso del picnómetro más el volumen de la muestra, g

La densidad es el indicador de la calidad del crudo, ya que nos proporciona información acerca el rendimiento de productos ligeros que se pueda obtener en su fraccionamiento, (Rojas Gutiérrez, 2009).

3.6.3 Prueba de Densidad API

La densidad API es una escala arbitraria relaciona con la densidad relativa definida por la siguiente ecuación:

$$^{\circ}API = \left(\frac{141,5}{GE(15^{\circ}C)} \right) - 131,5$$

Se procede a corregir la temperatura a la cual se realizó el ensayo de densidad, 30°C a la temperatura de referencia 15°C, (Chiaravalotti, Ravera, & Leidi, 2008)

$$D(15^{\circ}C) = D(Te) + b(Te + 15^{\circ}C)$$

En donde:

$D(15^{\circ}C)$ = Densidad de la muestra a la temperatura de referencia, g/mL

$D(Te)$ = Densidad de la muestra a la temperatura de ensayo, g/mL

b = Factor de corrección

Te = Temperatura de ensayo, °C

El factor de corrección se obtiene en base a la tabla 11.

Tabla 11. Factor de corrección de temperatura

Rangos de D (te)	b	Rangos de D (te)	b
0,680 – 0,689	0,00088	0,800 – 0,809	0,0007
0,690 – 0,699	0,00086	0,810 – 0,819	0,00069
0,700 – 0,709	0,00085	0,820 – 0,829	0,00068
0,710 – 0,719	0,00084	0,830 – 0,839	0,00067
0,720 – 0,729	0,00083	0,840 – 0,849	0,00066
0,730 – 0,739	0,00081	0,850 – 0,859	0,00066
0,740 – 0,749	0,0008	0,860 – 0,869	0,00066
0,750 – 0,759	0,00078	0,870 – 0,879	0,00065
0,760 – 0,769	0,00076	0,880 – 0,889	0,00065
0,770 – 0,779	0,00075	0,890 – 0,899	0,00064
0,780 – 0,789	0,00073	0,900 – 0,909	0,00063
0,790 – 0,799	0,00072	0,910 – 0,919	0,000625

Fuente: Chiaravalotti, Ravera, & Leidi, 2008

Para determinar la densidad API necesitamos determinar la densidad relativa de la muestra, con la siguiente ecuación, (Chiaravalotti et al., 2008):

$$GE = \frac{D(15^{\circ}C)}{Dw(15^{\circ}C)}$$

En donde:

$D(15^{\circ}C)$ = Densidad de la muestra a 15°C, g/mL

$Dw(15^{\circ}C)$ = Densidad del agua a 15°C, g/mL

3.6.4 Prueba de Punto de Inflamación

Para determinar el punto de inflamación, se usa como base la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 808:1986 “Productos de Petróleo. Determinación de los Puntos de Inflamación y Combustión en Vaso Abierto de Cleveland”.

Equipos y Materiales

- Vaso abierto de Cleveland modelo K13900
- Termómetro

Procedimiento

Se enfría la muestra hasta 10 °C, luego se coloca la muestra del combustible hasta la marca en la copa, se procede a encender el equipo y la mecha, y se flamea muy lentamente por encima de la copa, hasta que los vapores emitidos por el combustible se enciendan, se anota la temperatura a la cual aparece la primera llama, para mejores resultados se repite el proceso por tres veces.

Se obtiene la temperatura a la cual los gases se encienden con la mezcla de aire ambiente.

Ilustración 13. Determinación del punto de inflamación



Fuente: Los Autores

3.6.5 Prueba de Viscosidad

Para la determinación de la viscosidad se basa en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 810:1986 “Productos de Petróleo. Determinación de la Viscosidad Cinemática y Dinámica en Líquidos Transparentes y Opacos”

Equipos y Materiales

- Viscosímetro de Ostwald
- Termómetro
- Erlenmeyer de 500 mL
- Mechero
- Soporte Universal
- Pipeta de 10 mL
- Malla de asbesto
- Pera
- Cronómetro

Procedimiento

Se coloca la muestra de agua destilada en el viscosímetro, se somete a un baño a temperatura constante de 30 °C y se espera aproximadamente unos 5 minutos hasta que se estabilice la temperatura de la muestra, después de estabilizarse la temperatura de prueba, se saca mediante succión el líquido a través del bulbo y se deja ligeramente por encima de la marca de regulación superior. Se retira la succión y se permite al líquido fluir bajo la acción de la gravedad, finalmente se determina el tiempo que demora la muestra en fluir a través del capilar del viscosímetro hasta llegar a la segunda marca de regulación inferior. Se registra el tiempo requerido para que la muestra pase de la marca superior a la inferior. Se hacen 3 repeticiones, estas pruebas se realizan para la calibración del equipo.

Se realizan tres pruebas siguiendo la misma técnica con la muestra de combustible, la viscosidad cinemática de la muestra de combustible se calcula multiplicando el tiempo del flujo por la constante de calibración obtenida, (Mott & Pedraza, 1996)

Ilustración 14. Determinación de la viscosidad



Fuente: Los Autores

Se obtiene el tiempo que tarda el agua en fluir por el capilar del viscosímetro, que nos servirá para determinar la constante de calibración. La ecuación de calibración se obtiene, (Chiaravalotti et al., 2008):

$$C = \frac{V_{cw}}{t_w}$$

En donde:

C = Constante de calibración del viscosímetro, cP/s

V_{cw} = Viscosidad cinemática del agua, cP

t_w = Tiempo que tarda el agua en fluir a través del capilar del viscosímetro, s

- **Viscosidad cinemática del agua a 30°C**

Se calcula dividiendo la viscosidad dinámica del agua para su densidad, (Chiaravalotti et al., 2008):

$$V_{cw} = \frac{Vd}{d}$$

En donde:

V_{cw} = viscosidad cinemática del agua, m^2/s

V_d = Viscosidad dinámica del agua, $N.s/m^2$

d = densidad del agua, kg/m^3

Entonces la viscosidad cinemática de la muestra es:

$$V_{cm} = C * T_m$$

En donde:

V_c = Viscosidad cinemática, cP

C = constante de calibración, cP/s

T_m = tiempo que tarda la muestra en fluir a través del viscosímetro, s

3.6.6 Prueba de Número de Cetano, Punto de Congelación y Porcentaje de Queroseno

Para esta prueba se utiliza un medidor de calidad de petróleo SHATOX modelo SX-300 que cumple con la norma ASTM D 4737-03, ASTM D 613, ISO 5165, para la determinación del número de Cetano, temperatura de solidificación y contenido de queroseno en el combustible diésel.

Materiales y Equipos

- Medidor de calidad de petróleo SHATOX modelo SX-300

Procedimiento

Se coloca la muestra en la copa, hasta la marca de regulación superior, se procede a encender el equipo y se determina el número de Cetano, punto de congelación y porcentaje de queroseno.

Ilustración 15. Determinación número de Cetano, punto de congelación, porcentaje de queroseno.



Fuente: Los Autores

3.6.7 Prueba de Temperatura de Destilación

Para la determinación de la viscosidad se basa en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 926:1982 “Productos de Petróleo. Ensayos de Destilación”

Equipos y Materiales

Matraz de destilación de 500 mL

Probeta graduada de 100 mL

Tubo condensador

Soporte de matraz de destilación

Placa de amianto

Termómetro

Procedimiento

Se procede a colocar 200 cm³ de la muestra en el matraz de destilación, se empieza a calentar lentamente, se anota la temperatura en la que la primera gota cae en la probeta, en el intervalo entre el punto inicial de ebullición y el punto final de destilación se anota las temperaturas correspondientes a los volúmenes de destilado.

Ilustración 16. Destilación del combustible



Fuente: Los Autores

3.6.8 Determinación de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos

La determinación de HAPs se realiza en un cromatógrafo de gases THERMO SCIENTIFIC, modelo Trace GC ULTRA, perteneciente al Laboratorio de Ciencias de la Vida.

3.6.8.1 Preparación de los Viales de Extracción

Se procede a diluir la muestra para disminuir su concentración con acetonitrilo en proporción de 1:149.

Se preparan 3 viales de extracción: un vial de acetonitrilo cuya función es limpiar la columna y dos de la muestra del combustible.

3.6.8.2 Procedimiento de la Cromatografía de Gases

Se utiliza un estándar que contiene los siguientes componentes: fluoranteno, benzo (b) fluoranteno, benzo (k) fluoranteno, benzo (a) pireno, indeno (g,h,i) pireno, benzo (ghi) perileno. Un detector tipo GC/ FID, una columna DB-5,30 m, un diámetro interior de 0,25 mm, un volumen de inyección de 1 ul a 320 °C y flujo de 1 mL/min.

El ensayo inicia con una temperatura de 250 °C por 18 min y finaliza con una temperatura de 290 °C, (véase anexo 3. Esquema del proceso de cromatografía de gases).

3.6.9 Determinación de Posibles Usos del Combustible

La determinación de los posibles usos del combustible se basa en un análisis de los resultados fisicoquímicos, tomando como referencia la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 14489:2011 “Productos Derivados del Petróleo. Diésel. Requisitos”.

3.6.10 Metodología General de Cálculo del Potencial de Producción de Combustible Líquido

Para el cálculo de producción de combustible líquido, se ha determinado potenciales medios estimados de la materia prima de residuos de neumáticos (cm³/g). Los datos se han obtenido de forma experimental (ensayos batch del proceso de pirólisis). Para el cálculo del potencial no se multiplica directamente los potenciales medios estimados ya que estos suponen el potencial máximo. Se ha aplicado potenciales medios minorados, considerando que en una operación en continuo la tasa de conversión de materia prima a combustible es menor.

Potencial Medio Estimado: Consiste en la división del volumen de combustible líquido obtenido para la masa inicial de materia prima, cm³/g.

Cuantificación de Materia Prima: Para la cuantificación de la materia prima se realiza una proyección polinómica de tercer grado de la cantidad de residuos de neumáticos que ingresan al relleno sanitario desde el año 2007 hasta el 2014, para el año 2015, mediante la siguiente formula:

$$y = 1,7688x^3 - 20,417x^2 + 94,18x + 80,899$$

Con un R² = 0,95172, de nivel de confianza

Finalmente se multiplica el potencial medio estimado del combustible por la cantidad de residuos de neumáticos, obteniendo así el volumen de producción de combustible.

3.7 Pruebas de Combustión

Se realizan en el Motor de Combustión Interna Diésel ENGINE modelo G-130301, el mismo que esta adecuado para la combustión de un diésel convencional, en base a estas características se procede a ejecutar las pruebas, estableciendo la comparativa entre el diésel y el combustible líquido obtenido del proceso de pirólisis.

Estas pruebas se realizan en el Laboratorio de Combustión de la Carrera de Ingeniería Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana, el cual cuenta con infraestructura de vanguardia para el estudio de los procesos de combustión en sistemas diésel y gasolina, así como el uso de combustibles alternos.

Procedimiento

Se procede a instalar el micrófono piezoeléctrico unidireccional sobre el motor, el acelerómetro, y estos a su vez al analizador de vibraciones que se instala en el computador con el software de medición de ruido y vibraciones, el comprobador de gases de escape diésel que se instala con la sonda contra corriente en el tubo de escape y el medidor de gases de combustión para el cual se realiza una perforación en la parte superior del tubo de escape para introducir la sonda, (véase el anexo 4. Esquema del proceso de la prueba de combustión).

3.7.1 Determinación de las Pruebas de Combustión a realizar

Se realizan pruebas, del combustible líquido obtenido del proceso de pirólisis y del diésel ecuatoriano comercial, para establecer la comparativa de los fallos y emisiones en el proceso de combustión. Las pruebas se realizan en base a la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2 202:2000 (Gestión Ambiental. Aire. Vehículos Automotores. Determinación de la Opacidad de Emisiones de Escape de Motores Diésel Mediante la Prueba Estática. Método de Aceleración Libre), y a las recomendaciones de los técnicos del Laboratorio de Combustión de la Carrera de Ingeniería Automotriz.

Tabla 12. Pruebas de combustión a realizar

Combustible	Prueba 1	Prueba 2
Diésel	800 rpm	2500 rpm
Combustible del proceso de pirólisis	800 rpm	2500 rpm

Fuente: Los Autores

3.7.2 Adquisición de Datos de Ruido y Vibraciones

Para recibir las señales acústicas que emite el motor se utilizan transductores los cuales convierten una característica física en una característica cuantitativa, es decir transforman una señal física en una eléctrica para ser analizado en el rango de interés.

Se utiliza un micrófono piezoeléctrico unidireccional de la marca PCB, modelo HT378B02, y un acelerómetro sumergible modelo 8042, las señales obtenidas son llevadas a un analizador de vibraciones A3716 de la marca ADASH, el cual tiene la función de acondicionar las señales y permitir la visualización de las magnitudes de presión sonora y vibraciones que emite el motor durante las etapas de funcionamiento, y luego es analizado en el interfaz gráfico en el software Matlab.

3.7.3 Adquisición de Datos de Opacidad y Partículas Totales

Para recibir las concentraciones de opacidad y de partículas que emiten los combustibles en el momento de la combustión se cuenta con un equipo comprobador de gases de escape diésel MAHA modelo MET 6.2, el cual permite en tiempo real realizar las lecturas.

3.7.4 Adquisición de Datos de Gases de Combustión

Para recibir las concentraciones de gases de combustión se cuenta con el medidor de gases de combustión EUROTRON modelo GREENLINE 4000, el cual permite la lectura de concentraciones de los gases: Monóxido de Carbono (CO), Óxido de Nitrógeno (NO), y Óxidos de Nitrógeno (NO_x); en tiempo real en el proceso de combustión.

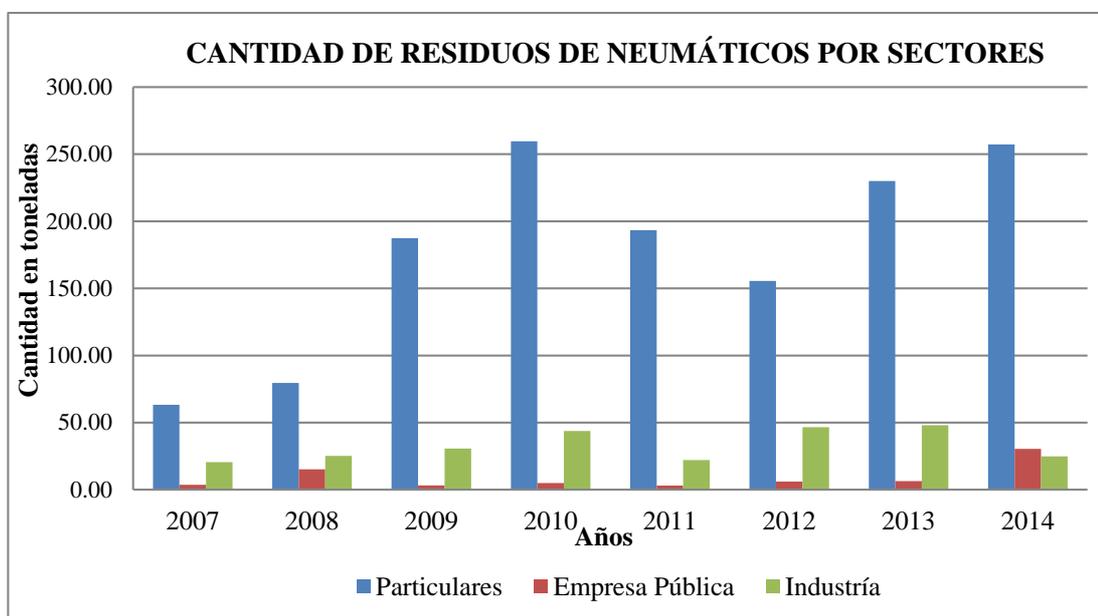
CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Diagnóstico de la situación actual de los residuos de neumáticos usados en la ciudad de Cuenca.

El Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de la ciudad de Cuenca mediante la Ordenanza que regula LA GESTIÓN INTEGRAL DE LOS DESECHOS Y RESIDUOS SÓLIDOS EN EL CANTÓN CUENCA se ha concentrado principalmente en la gestión de residuos domésticos, dejando parcialmente de lado los residuos especiales como son los neumáticos usados; en la actualidad se ha comenzado a trabajar en posibles soluciones para el manejo de estos residuos que llegan al relleno sanitario de Pichacay, debido principalmente al volumen que estos ocupan dentro de una celda.

Ilustración 17. Cantidad de neumáticos que ingresa al relleno sanitario por sectores desde el año 2007 a 2014



Fuente: EMAC, 2014

La principal generación de residuos de neumáticos que ingresan al relleno sanitario es del sector particular, con una tasa de crecimiento anual del 22 %, de la empresa pública en un 34 % y el sector de la industria en un 3 %, desde el año 2007 hasta el 2014.

La cantidad de residuos de neumáticos que ingresan al relleno sanitario aumenta en un 17,5 % anual, desde el año 2007 hasta el año 2014.

4.2 Análisis de la Varianza (anova) del Proceso de Pirólisis.

De las pruebas realizadas en la tabla 13, mediante el análisis de la varianza, se determina que las variables que tienen significancia estadísticamente y que influyen en el proceso de pirólisis es únicamente la temperatura.

Tabla 13. Pruebas de pirólisis realizadas

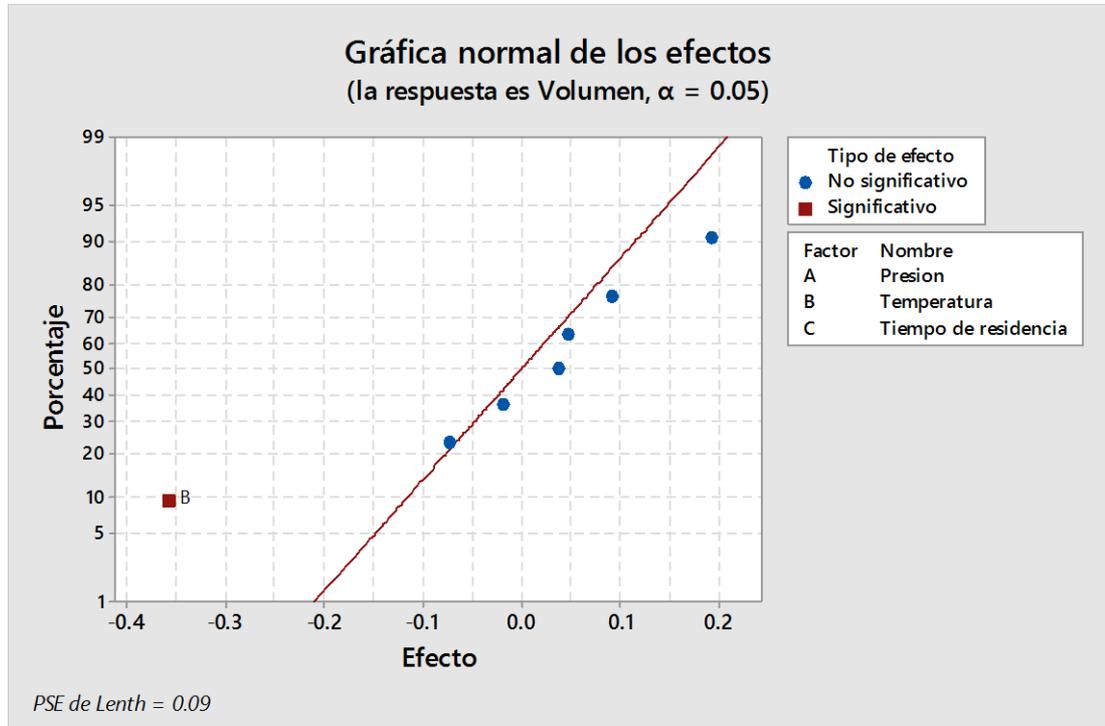
Temperatura (°C)	Presión (Psi)	Tiempo de Retención (min)	Volumen Líquido (cm ³)	Volumen Gas (cm ³)	Masa (g)
340	55	10	4,51	5600	6,57
340	15	10	4,72	4750	6,24
340	55	20	4,5	7300	6,52
340	15	20	4,82	6000	6,45
440	55	10	4,26	5150	7,36
440	15	10	4,16	5700	7,25
440	55	20	4,42	5800	7,43
440	15	20	4,28	6400	6,99

Fuente: Los Autores

Como resultado del análisis del ANOVA, para la variable de Presión y Tiempo de Residencia, el valor de p es mayor a 0,05 lo cual demuestra que no es significativo estadísticamente por lo cual se descartan en el experimento. Para la variable de Temperatura, el valor de p es menor a 0,05 con un nivel de confianza del 95 %, demostrando que esta variable es la única que influye significativamente en el

experimento, (véase anexo 5. Análisis de la varianza del proceso de pirólisis y anexo 6. Diagrama de Pareto de los efectos en el proceso de pirólisis).

Ilustración 18. Gráfica normal de los efectos



Fuente: Los Autores

Como se ve en la ilustración 18 de la gráfica normal de los efectos, la variable que influye estadísticamente en la variable respuesta del volumen del líquido es la Temperatura.

En base a estos resultados se procede a realizar las pruebas para establecer la temperatura óptima del proceso, con las condiciones de presión y tiempo de residencia constantes de 15 psi y minutos respectivamente; para obtener la mayor producción de combustible líquido en el proceso de pirólisis.

4.2.1 Prueba para determinar la Temperatura Óptima del Proceso

De las pruebas realizadas en la tabla 11, se puede apreciar que a 370 °C, hay un mayor rendimiento de combustible líquido, de 6,93 cm³, con una mayor eficiencia de

transformación de materia prima a combustible del 58 %, mientras que a mayor temperatura el rendimiento del volumen disminuye.

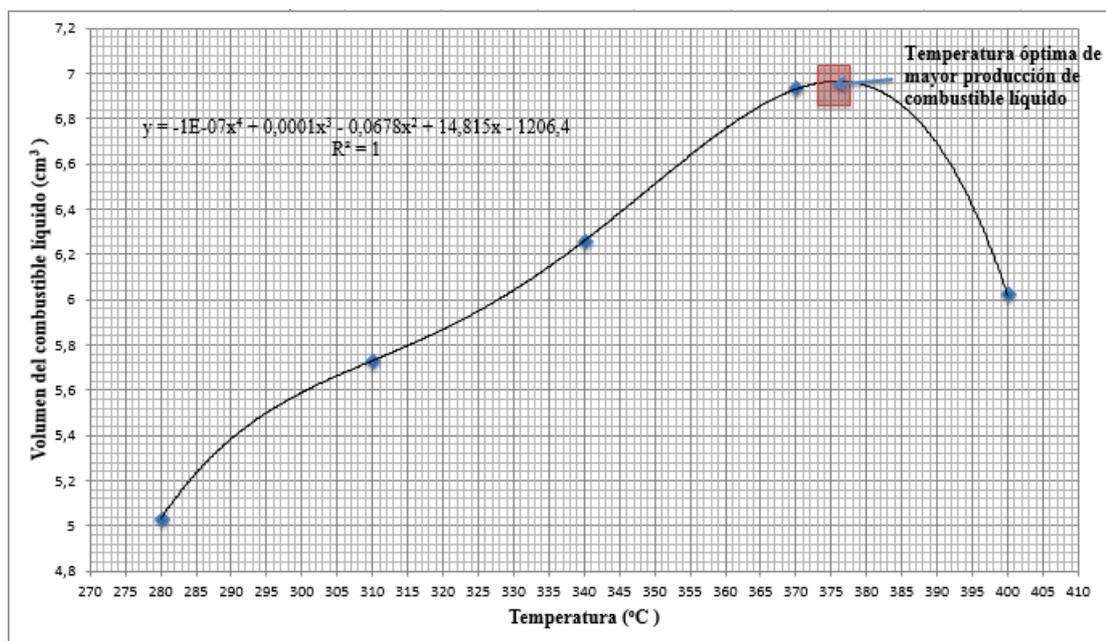
Tabla 14. Pruebas para determinar mayor rendimiento de combustible líquido

Temperatura (°C)	Volumen Líquido (cm ³)	Volumen Gas (cm ³)	Masa (g)	Eficiencia (%)
280	5,03	5500	7,09	52
310	5,73	5400	6,53	56
340	6,26	5200	6,39	57
370	6,93	6200	6,24	58
400	6,02	6350	6,86	54

Fuente: Los Autores

En base a una regresión polinómica de cuarto grado se determina el punto en la curva de la temperatura en donde es mayor la producción del combustible líquido.

Ilustración 19. Curva de calibración de la temperatura óptima



Fuente: Los Autores

Los resultados de la regresión polinómica, determinan que en el rango de temperatura entre 373 y 377 °C, es el área donde se produce el mayor volumen de combustible líquido.

4.3 Caracterización, Cuantificación y Usos del Combustible

En la tabla 15 se describe las propiedades fisicoquímicas del combustible líquido obtenido del proceso de pirólisis.

Tabla 15. Características fisicoquímicas del combustible

Parámetro	Unidad	Valor
Color	-	verde oscuro
Olor	-	irritante
Densidad	g/cm ³	0,88
Gravedad API	-	23,87
Viscosidad	Centipoise	1,108
Punto de inflamación	°C	20,5
Punto de congelación	°C	-39,3
Número de Cetano	-	46,7
Temperatura de destilación del 90%	°C	320
Porcentaje de Queroseno	%	45,4

Fuente: Los Autores

El combustible obtenido del proceso de pirólisis, posee las siguientes características: color y olor característico de los productos derivados del petróleo. Densidad 0,88 gr/cm³ y una gravedad API de 23,87 que corresponde a un crudo mediano. Viscosidad 1,108 Centipoise que corresponde a un diésel No. 1. Punto de inflamación de 20,5 °C que ésta dentro del rango de una gasolina. Punto de congelación -39,3 °C que corresponde al queroseno. Número de Cetano 46,7 que corresponde a un diésel No. 2. Temperatura de destilación del 90 % de 320 °C que corresponde a un diésel No. 2. Porcentaje de queroseno del 45,4 % del total de combustible.

- **Caracterización de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs)**

Los análisis de HAPs del combustible obtenido en el Cromatógrafo de Gases, muestra que la mayor presencia de HAPs es el Fluoranteno con 6089,481 ppm y el Benzo (a) pireno con 4892,564 ppm, (véase anexo 7. Resultados de los análisis de HAPs).

Tabla 16. Concentración de HAPs en el combustible

HAPs	CONCENTRACIÓN	
	ppm	% de v/v
Fluoranteno	6089,481	0,6089
Benzo (b) fluoranteno	441,04	0,0441
Benzo (k) fluoranteno	0	0
Benzo (a) pireno	4892,564	0,4892
Indeno (1,2,3,-c,d) pireno	2100,602	0,21
Benzo (ghi) perileno	1376,313	0,1376
TOTAL	14900,00	1,4900

Fuente: Los Autores

En porcentaje de volumen de los seis HAPs analizados es de 1,49 % lo que quiere decir que de cada 100 cm³ de combustible estos representan 1,49 cm³.

- **Usos del combustible**

Debido a las características fisicoquímicas que presenta el combustible obtenido, se lo considera como un combustible diésel No. 2, en base a la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 14489:2011 “Productos Derivados del Petróleo. Diésel. Requisitos”, por lo tanto se puede utilizar para la quema en calderas, hornos de ladrilleras, calefacción, motores de combustión interna, etc. Debido a estas características se procede a realizar pruebas de combustión en el motor diésel.

- **Cuantificación de combustible líquido.**

El potencial de combustible medio estimado es de 0,4 cm³/g, la cantidad de residuos de neumáticos en la ciudad de Cuenca para el año 2015 es de 433,34 toneladas, lo que equivaldría a una producción aproximada de combustible líquido de 1040 barriles (1 barril es igual a 55 galones).

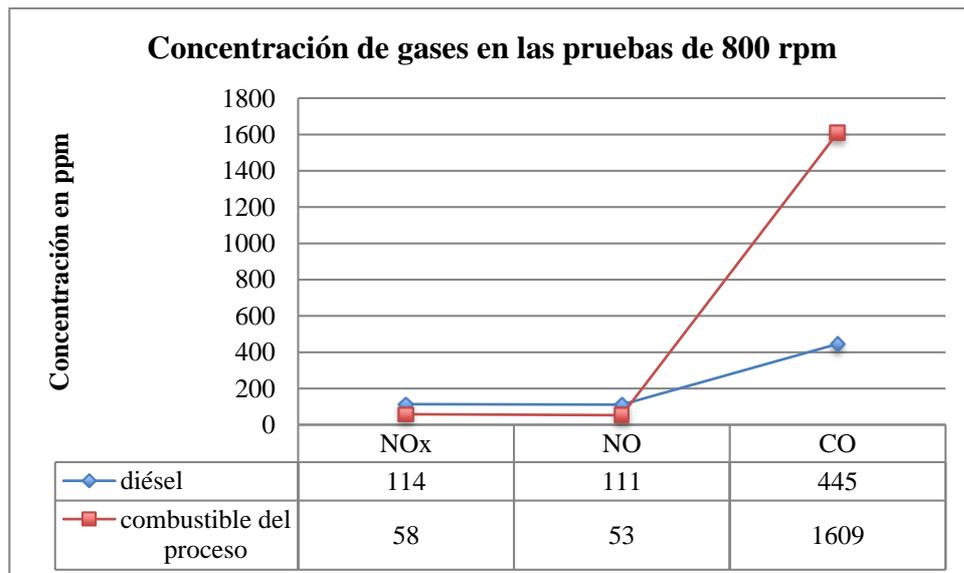
4.5 Comparativa del Proceso de Combustión

Se analizan emisiones de NO_x, NO, CO, Material Particulado, Opacidad; y para el análisis de los fallos en el proceso de combustión se analizan: ruido y vibraciones del motor; esta comparativa se establece a 800 rpm y 2500 rpm del motor.

4.5.1 Emisión de Gases NO_x, NO y CO en 800 rpm

En la prueba en 800 rpm el diésel emite un 96 % más de Óxidos de Nitrógeno (NO_x) que el combustible del proceso de pirólisis y un 109 % más de Monóxido de Nitrógeno (NO). El combustible del proceso emite un 261 % más de Monóxido de Carbono (CO) que el diésel comercial.

Ilustración 20. Concentración de gases en 800 rpm



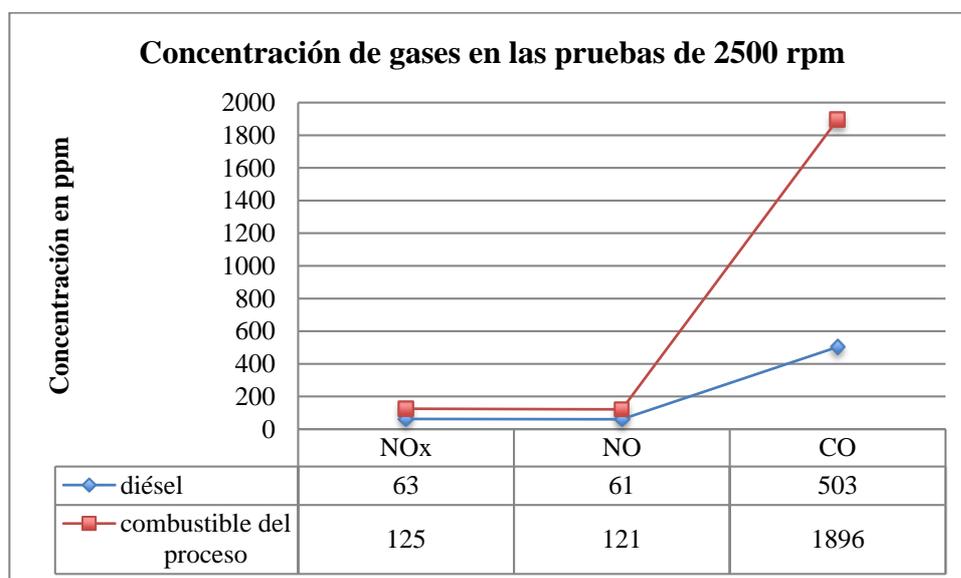
Fuente: Los Autores

En base al análisis de emisiones del combustible obtenido del proceso de pirólisis con la Normativa Ecuatoriana para Fuentes Fijas de Combustión, tenemos que para la emisión de NO_x cumple con los límites permisibles establecidos, mientras que para las emisiones de CO y NO, no existe un límite establecido en la normativa, (véase anexo 8. Límites máximos permisibles para fuentes fijas de combustión). Los principales efectos que tiene el CO en la salud, es el principal problema de este contaminante y de ahí la principal problemática por la alta emisión de este en la prueba de combustión, (véase el literal 2.5.1.1.2 Efectos de la Contaminación Sobre la Salud).

4.5.2 Emisión de Gases NO_x, NO y CO en 2500 rpm

En la prueba de 2500 rpm el combustible del proceso emite un 98 % más de Óxidos de Nitrógeno (NO_x), un 98 % más Monóxido de Nitrógeno (NO), y en un 2769 % más de Monóxido de Carbono (CO) que el diésel comercial.

Ilustración 21. Concentración de gases en 2500 rpm



Fuente: Los Autores

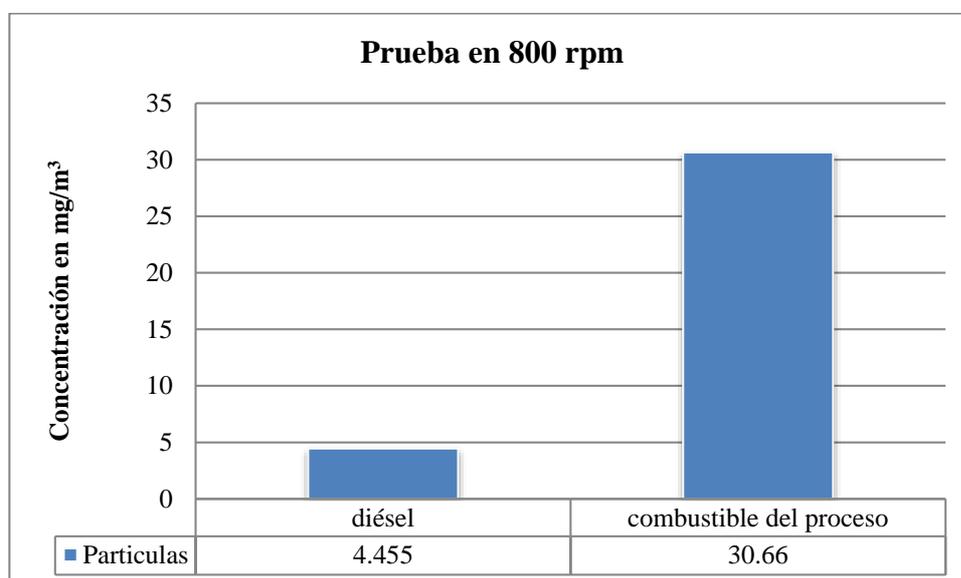
En base al análisis de emisiones del combustible obtenido del proceso de pirólisis con la Normativa Ecuatoriana para Fuentes Fijas de Combustión, tenemos que para las emisiones de NO_x están dentro de los límites permisibles, (véase anexo 8. Límites máximos permisibles para fuentes fijas de combustión), mientras que para lo relacionado a las emisiones de CO y NO, no existe un límite establecido en la

Normativa Ecuatoriana para Fuentes Fijas de Combustión, siendo el principal problema del combustible, la alta emisión de CO y las consecuencias asociadas a este contaminante, en los efectos a la salud, (véase el literal 2.5.1.1.2 Efectos de la Contaminación Sobre la Salud).

4.5.3 Emisión de Partículas en 800 rpm

La emisión de Partículas del combustible obtenido es mayor en 588 % más que el diésel.

Ilustración 22. Concentración de partículas en 800 rpm



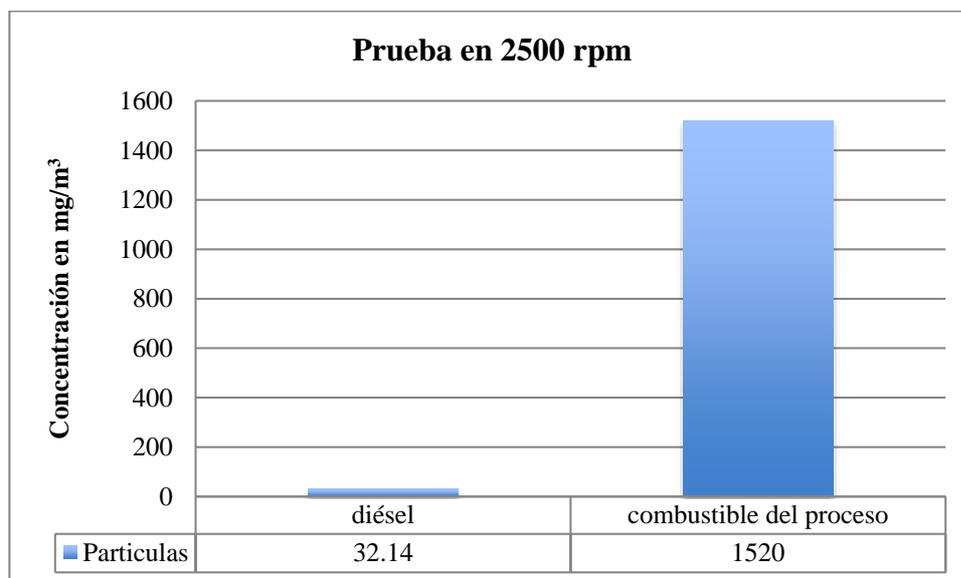
Fuente: Los Autores

De acuerdo con el análisis de la Normativa Ecuatoriana para Fuentes Fijas de Combustión en los límites máximos permisibles de emisiones al aire para motores de combustión interna, el combustible del proceso de pirólisis está dentro de los límites establecidos para fuentes nuevas, (véase anexo 8. Límites máximos permisibles para fuentes fijas de combustión). La principal problemática de la alta emisión de Partículas tiene que ver con las consecuencias a las salud, (véase el literal 2.5.1.1.2 Efectos de la Contaminación Sobre la Salud).

4.5.4 Emisión de Partículas en 2500 rpm

La emisión de Partículas del combustible obtenido es mayor en 4629 % más que el diésel comercial.

Ilustración 23. Concentración de partículas en 2500 rpm



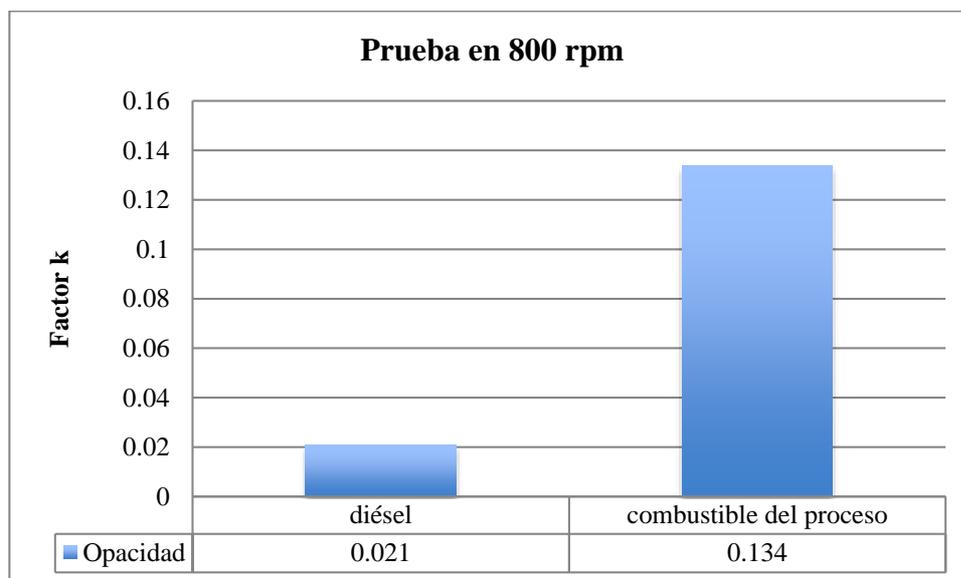
Fuente: Los Autores

De acuerdo con el análisis de la Normativa Ecuatoriana para Fuentes Fijas de Combustión en los límites máximos permisibles de emisiones al aire para motores de combustión interna, el combustible del proceso de pirólisis no cumple con los límites establecidos para fuentes nuevas, (véase anexo 8. Límites máximos permisibles para fuentes fijas de combustión), este valor incumple la normativa por 913 % más de lo establecido. En la prueba de 2500 rpm en la que el motor experimento una aceleración, se produce una alta concentración de partículas de ahí la problemática de la alta emisión de este contaminante, (véase el literal 2.5.1.1.2 Efectos de la Contaminación Sobre la Salud).

4.5.5 Opacidad en 800 rpm

En las pruebas de 800 rpm la opacidad del combustible obtenido es mayor 538 % más que la opacidad del diésel.

Ilustración 24. Opacidad en 800 rpm



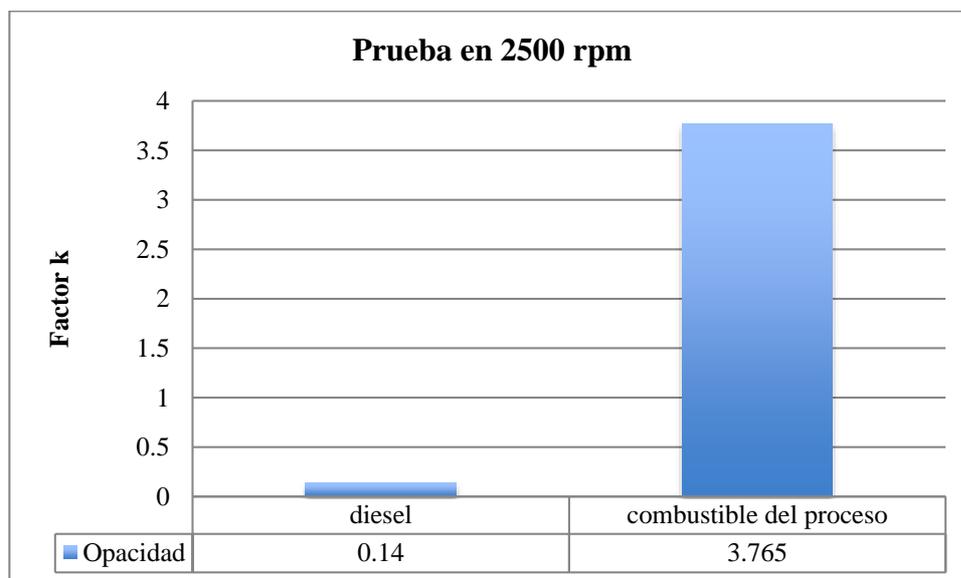
Fuente: Los Autores

De los análisis de opacidad se determina que el factor k del combustible obtenido del proceso de pirólisis es de 0,134 que equivale a 1,3 % de opacidad, lo cual representa un índice mayor en comparación del factor k del diésel de 0,021 que equivale a 0,2 % de opacidad, los mismos que cumplen con la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2 202:2000 (Gestión Ambiental. Aire. Vehículos Automotores. Determinación de la Opacidad de Emisiones de Escape de Motores Diésel Mediante la Prueba Estática). El principal problema en la combustión del combustible del proceso es que el porcentaje de opacidad es directamente proporcional al hollín y partículas del proceso de combustión.

4.5.6 Opacidad en 2500 rpm

En las pruebas de 800 rpm la opacidad del combustible obtenido es mayor 2589 % más que la opacidad del diésel.

Ilustración 25. Opacidad en 2500 rpm



Fuente: Los Autores

De los análisis de la opacidad se determina que el factor k del combustible obtenido del proceso de pirólisis es de 3,765 que equivale a 37,6 % de opacidad, lo que establece que es un índice mayor en comparación del factor k del diésel de 0,14 que es el 1,4 % de opacidad, los mismos que cumplen con la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2 202:2000 (Gestión Ambiental. Aire. Vehículos Automotores. Determinación de la Opacidad de Emisiones de Escape de Motores Diésel Mediante la Prueba Estática. Método de Aceleración Libre). La principal problemática asociada a esta emisión es que el porcentaje de opacidad es directamente proporcional al hollín y partículas del proceso de combustión.

4.5.7 Análisis de fallos en el proceso de combustión

La determinación de los fallos en el proceso de combustión, se realizan para determinar los efectos que tiene el combustible en el funcionamiento del motor.

4.5.7.1 Ruido de combustión a 800 rpm

Como se puede apreciar en la tabla 17, el Factor de Curtosis y el Factor de Cresta del combustible obtenido en el proceso de pirólisis es mayor a los valores del diésel, por lo cual se producen variaciones de la amplitud del ruido, mientras que el Valor de RMS que nos muestra la concentración de la energía del sonido son apreciablemente iguales, (véase en el anexo 9. Caracterización de señales del espectro de ruido a 800 rpm).

Tabla 17. Señales de ruido a 800 rpm

Caracterización de señales de ruido a 800 rpm		
Características de las señales	Diésel	Combustible del proceso
Factor de Curtosis	2,3078	2,6506
Valor RMS	0,0020	0,0021
Factor de Cresta	3,1681	3,4113

Fuente: Los Autores

4.5.7.2 Ruido de combustión a 2500 rpm

Como se puede apreciar en la tabla 18, el Factor de Curtosis y el Factor de Cresta del combustible obtenido del proceso de pirólisis son menores a los valores del diésel, lo que significa que no se producen variaciones considerables de la amplitud del ruido en comparación con el diésel, mientras que el Valor de RMS es mayor del combustible obtenido, lo que significa mayor energía contenida en el ruido y por lo tanto mayor ruido, (véase en el anexo 10. Caracterización de señales del espectro de ruido a 2500 rpm).

Tabla 18. Señales de ruido a 2500 rpm

Caracterización de señales de ruido a 2500 rpm		
Características de las señales	Diésel	Combustible del proceso
Factor de Curtosis	2,4009	2,3806
Valor RMS	0,0103	0,0111
Factor de Cresta	3,1318	3,0382

Fuente: Los Autores

4.5.7.3 Vibraciones del motor a 800 rpm

Como se puede apreciar en la tabla 19, el Factor de Curtosis y el Factor de Cresta del Combustible obtenido, son mayores a los del diésel, lo que representa que el motor con el uso del combustible, presentará un serio desgaste de los rodillos; el Factor de Cresta es relativamente alto debido a la cantidad de impactos ocurridos dentro del balero, lo que provocará un desgaste del balero de los rodillos, cavitación y desgaste de los dientes de engrane. El Valor de RMS del combustible obtenido es mayor al Valor de RMS del diésel, lo que significa que el contenido energético en la vibración es mayor por lo cual es mayor la severidad de la vibración, (véase en el anexo 11. Caracterización de señales del espectro de vibraciones a 800 rpm).

Tabla 19. Vibraciones a 800 rpm

Caracterización de señales de vibraciones a 800 rpm		
Características de las señales	Diésel	Combustible del proceso
Factor de curtosis	21,9701	39,1095
Valor RMS	0,0066	0,0081
Factor de Cresta	15,5893	20,2924

Fuente: Los Autores

4.5.7.4 Vibraciones del motor a 2500 rpm

Como se puede apreciar en la tabla 20, el Factor de Curtosis y el Factor de Cresta del combustible obtenido del proceso de pirólisis, son mayores a los del diésel, lo que representa que el motor con el uso del Combustible obtenido, presentará un serio

desgaste de los rodillos; el Factor de Cresta es relativamente alto lo que provocará un desgaste del balero de los rodillos, cavitación y desgaste de los dientes de engrane. El Valor RMS del combustible obtenido del proceso de pirólisis es mayor al Valor RMS del diésel, lo que significa que el contenido energético de las vibraciones es mayor y por lo tanto la severidad de las vibraciones en el motor son mayores con el combustible obtenido del proceso de pirólisis, (véase en el anexo 12. Caracterización de señales del espectro de vibraciones a 2500 rpm).

Tabla 20. Vibraciones a 2500 rpm

Caracterización de señales de vibraciones a 2500 rpm		
Características de las señales	Diésel	Combustible del proceso
Factor de curtosis	11,2895	16,1305
Valor RMS	0,0346	0,0348
Factor de Cresta	9,7782	15,2128

Fuente: Los Autores

4.6 Conclusiones

Del estudio del proceso de pirólisis realizado en el prototipo experimental se analizaron tres variables: presión, tiempo de retención y temperatura; esta última tiene una mayor influencia estadística la misma que fue comprobada mediante la prueba del ANOVA; determinando así que la temperatura óptima para un mayor rendimiento de combustible líquido es de 375 °C.

Los análisis fisicoquímicos del combustible líquido obtenido determinaron que éste posee características propias de los combustibles derivados del petróleo (gasolina, diésel y queroseno); encontrando características como: el número de Cetano de 46,7 que corresponde a un diésel tipo II, porcentaje de queroseno del 45,4 %.

De los análisis en el cromatógrafo de gases se establece que de los seis HAPs analizados el Fluoranteno y el Benzo (a) pireno, son los que se encuentran en mayor proporción dentro de la composición química del combustible obtenido del proceso de pirólisis; la concentración de HAPs en el combustible es de 1,49 cm³ por cada 100 cm³.

Al establecer la comparativa en la combustión del combustible obtenido del proceso de pirólisis y el diésel comercial se establece que en condiciones de ralentí a 800 rpm del motor, los dos combustibles están dentro de los límites máximos permisibles de la normativa ecuatoriana para fuentes fijas de combustión en la emisión de NOx y Partículas; el porcentaje de Opacidad de los dos combustibles cumplen con la norma NTE INEN 2 202:2000, con respecto a las emisiones de CO no existe normativa ecuatoriana aplicable, encontrando que el combustible obtenido del proceso presenta mayores concentraciones de contaminantes (CO, Partículas, Opacidad) que el diésel comercial.

En el proceso de combustión a una aceleración de 2500 rpm del motor, se determina que en la emisión de NOx están por debajo de los límites máximos permisibles, en la concentración de Partículas el combustible obtenido del proceso de pirólisis no cumple con la normativa para fuentes fijas de combustión sobrepasando los valores máximos permisibles, en el porcentaje de Opacidad los dos combustibles están dentro de los

límites establecidos en la NTE INEN 2 2002:2000, en la emisión de CO, la alta concentración de este contaminante, Partículas y Opacidad del combustible obtenido del proceso de pirólisis en comparación con el diésel, se determina que el diésel presenta mejores resultados en la combustión, al estar muy por debajo de las emisiones del combustible del proceso, además en el proceso de combustión del combustible de pirólisis se observa una excesiva generación de humo blanco, síntoma de una combustión anticipada en la cámara.

De los resultados de fallos del proceso de combustión mediante el análisis de ruido y vibraciones en las pruebas a 800 rpm y 2500 rpm, se determina que el motor presenta más dificultades en el proceso de combustión del combustible obtenido del proceso de pirólisis a comparación del diésel comercial, encontrando mayor ruido y vibraciones que generan un mayor desgaste en las piezas del motor, determinando que el diésel presenta mejor combustión para el motor.

Una vez analizados los resultados se demuestra que la hipótesis sobre la sustentabilidad del proceso de pirólisis no constituye una metodología de gestión de residuos de caucho vulcanizado, mediante el análisis de la prueba de combustión en el motor diésel; debido a que el combustible obtenido del proceso presenta en su combustión mayores emisiones de contaminantes (CO, NO, NOx, Partículas y Opacidad) y fallos de combustión que afecta al motor.

Se concluye esta investigación determinando que el combustible obtenido en el proceso de pirólisis presenta características similares a los del diésel; pero mediante las pruebas de combustión se determina que este no puede ser un reemplazante directo del diésel comercial.

4.7 Recomendaciones

Para la caracterización del combustible se puede realizar un fraccionamiento entre del combustible que contiene: gasolina, diésel y queroseno; para proceder con las pruebas de combustión por separado; ya que el combustible obtenido presenta un alto contenido de queroseno y el punto de inflamación es bajo, por lo que puede ser utilizado como una gasolina.

Para pruebas futuras del combustible obtenido se debe realizar la calibración de la bomba de alimentación para evitar la excesiva emisión de humo blanco que es síntoma de una combustión anticipada en la cámara, lo recomendable sería calibrar el ángulo de adelanto de esta manera se garantiza que el combustible genere trabajo y no se desperdicie en forma de calor por causa de una apertura anticipada de las válvulas de escape o admisión.

Realizar pruebas de combustión utilizando al combustible obtenido en el proceso de pirólisis como aditivo para otros combustibles, sea diésel o gasolinas; estableciendo la comparativa de emisiones y de los fallos de combustión.

Realizar pruebas de combustión en hornos de las ladrilleras y cementeras; determinando la eficiencia y las emisiones que produce éste en su combustión.

BIBLIOGRAFIA

- AGUADO ALONSO, L., *Reciclado De Neumáticos Para La Fabricación De Láminas Impermeabilizantes En La Construcción*. Universidad Politecnica de Madrid, España, 2010.
- AGUDELO, J. R., BEDOYA, I. D., & AGUDELO, A. F., "Emisiones gaseosas y opacidad del humo de un motor operando con bajas concentraciones de biodiesel de palma", *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*, No. 18, Barranquilla, (2011).
- ALVARO FRANCO, M., *Caracterización en frío de un reactor solar de lecho fluidizado para pirólisis de biomasa*, Tesis Universidad autónoma metropolitana de Iztapalapa, México, 2005.
- ARACIL SÁEZ, I., *Formación de contaminantes y estudio cinético en la pirólisis y combustión de plásticos (PE, PVC y PCP)*, Tesis Universidad de Alicante Departamento de Ingeniería Química, Alicante, 13 de abril de 2011.
- ASTAFAN, C. G., *Procesamiento de Neumáticos Usados en los Estados Unidos*. Columbus McKinnon Corporation, Estados Unidos, 1995.
- ASTM, *ASTM D 2386-06 Standard Test Method for Freezing Point of Aviation Fuels*, 2012.
- ATSDR, ATSDR - *Resumen de Salud Pública: Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP) Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PHA)*, 1995.
- BAUMEISTER, T., AVALONE, E. A., & BAUMEISTER III, T., *Marks: manual del ingeniero mecánico- 2^{da}*. Edición, Editorial McGraw-Hill, México, 1978.
- BENDAT, J., & PIERSOL A., *Random data*, 2^{da} Edición, Editorial John Wiley & Sons, New York, 1986.

- BERRUECO, C., ESPERANZA, E., MASTRAL, F. J., CEAMANOS, J., & GARCÍA-BACAICOA, P., "Pyrolysis of waste tyres in an atmospheric static-bed batch reactor: Analysis of the gases obtained", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, No. 74, Zaragoza, España, 2005.
- CALIDAD, A. E., *Fundamentos de estadística: análisis de la varianza y diseño de experimentos*, Editorial AEC, 2008.
- CAMARILLO MONTERO, J. A., *Estudio de la combustión de un motor monocilíndrico de ignición alimentado con mezclas gasolina-etanol anhidro e hidratado a distintas concentraciones*, Tesis Universidad Veracruzana, Xalapa, 2011.
- CANO SERRANO, E., CEREZO GARCÍA, L., & URBINA FRAILE, M., *Valoración material y energética de neumáticos fuera de uso*, CEIM Dirección General de Universidades e Investigación, Madrid, España, 2007.
- CASELLI, M., *La contaminación atmosférica*, Editorial Siglo Veintiuno, México, 1992.
- CASELLI, M., *La contaminación atmosférica*, 2^{da}. Edición, Editorial Siglo XXI, México, 2000.
- CASTELLS, X. E., VELO, E., & E-LIBRO, C., *La pirólisis*, Editorial Díaz de Santos, Madrid, España, 2012.
- CHIARAVALOTTI, A., RAVERA, J. M., & LEIDI, F. E., "Nuevas determinaciones en combustibles y lubricantes", *Segundo encuentro de jóvenes investigadores en ciencia y tecnología de minerales*, Argentina, 2008.
- COMSTOCK, M, Joan, *Thermal Conversion of Solid Wastes and Biomass*, American Chemical Society, 1980.

- COVENIN, COVENIN 2052-93 Productos Derivados del Petróleo. Determinación de la Densidad y la Densidad Relativa de Líquidos por Medio del Picnómetro Bingham, 1993.
- DAI, X., YIN, X., WU, C., ZHANG, W., & CHEN, Y., "Pyrolysis of waste tires in a circulating fluidized-bed reactor", *Energy*, No. 24, 2001.
- DIAZ, S., *Medición y análisis de vibraciones*, Tesis Universidad Simón Bolívar. Laboratorio de máquinas, Venezuela, 2011.
- EL TELÉGRAFO, "Diez mil carros entran cada año al parque automotor de Cuenca", en el TELÉGRAFO, p. 12. Cuenca, Ecuador, 19 de septiembre del 2013.
- ELÍAS CASTELLS, X., *Tratamiento y valorización energética de residuos*, Editorial Díaz de Santos : Fundación Universitaria Iberoamericana, Madrid, España, (2005).
- EMAC, Registro de llantas receptadas en el relleno sanitario de Pichacay, Cuenca, Ecuador, 2014.
- FERRÉ, J., *El diseño factorial completo 2k*, Departamento de Química Analítica y Química Orgánica de la Universidad Rovira i Virgili, Tarragona, 2003.
- FRIEDMAN, A., "Detección automática del desgaste de rodamientos", *Procedimientos del Instituto de Vibraciones, Estados Unidos, 2004.*
- GALLEGO PICÓ, A., GONZÁLEZ FERNÁNDEZ, I., & SÁNCHEZ GIMENO, B., *Contaminación atmosférica*, Editorial UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia, España, 2012.
- GAO, F., Pyrolysis of Waste Plastics into Fuels, Tesis Universidad de Canterbury, Nueva Zelanda, 2010.

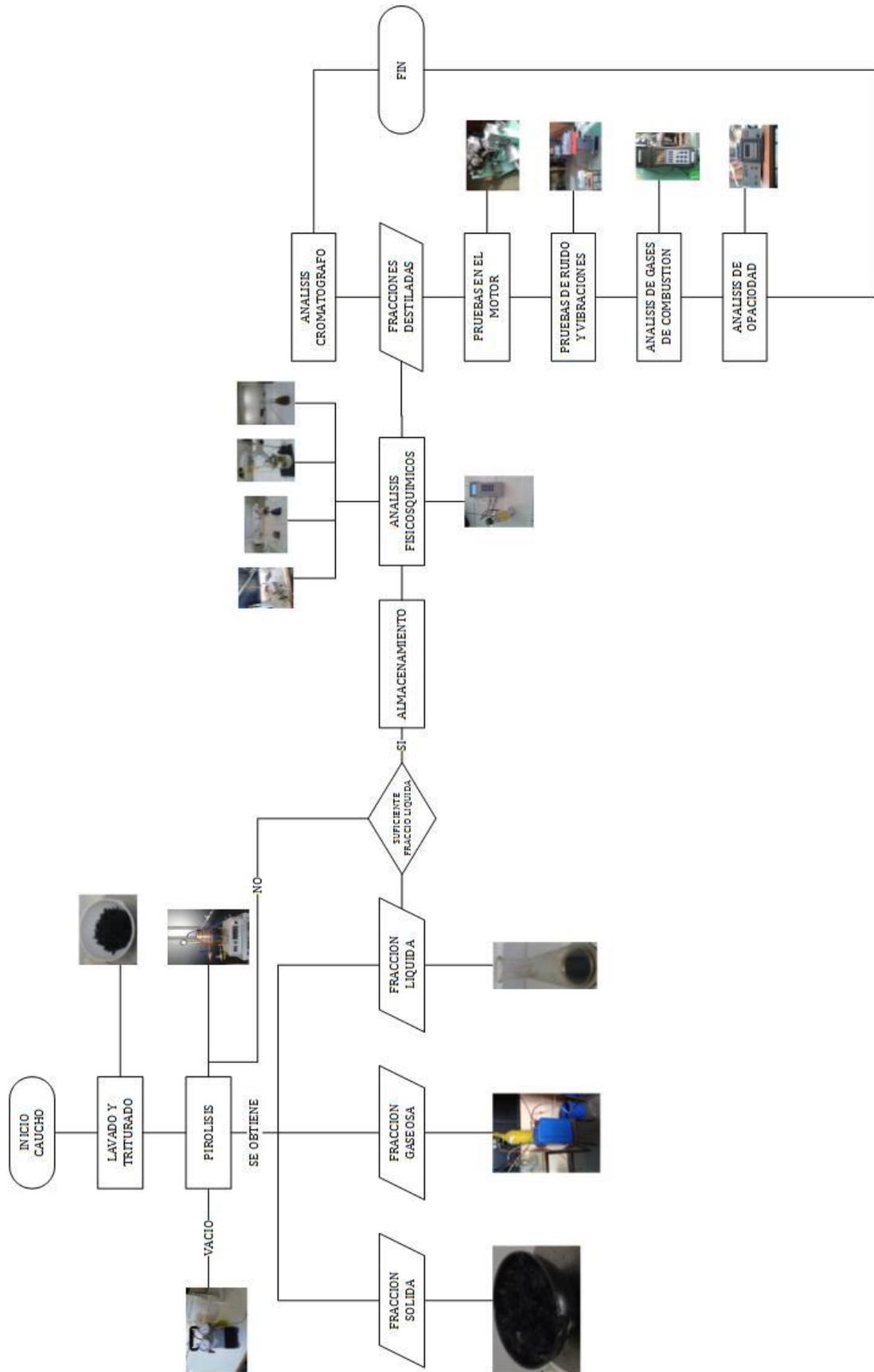
- GARCÍA-MARTÍNEZ, M. J., *Los hidrocarburos policíclicos aromáticos asociados a combustibles fósiles: caracterización, análisis y remediación*, Tesis Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Ingeniería Química y Combustibles, Madrid España, 2005.
- GARZA, J. B., *Aplicación de diseño de experimentos para el análisis de secado de un producto*, Tesis de la Universidad de Monterrey, México, 2013.
- GONZÁLEZ, J. F., ENCINAR, J. M., CANITO, J. L., & RODRIGUEZ, J. J., "Pyrolysis of automobile tyre waste. Influence of operating variables and kinetics study", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, No. 58, 01 de abril 2001.
- GUARANGO PILLCO, G. F., & LAZO NAULA, K. M., *Diagnóstico de fallos en el proceso de combustión en motores alternativos de encendido por compresión utilizando el método de análisis de ruido*. Tesis Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2014.
- INEN, *NTE INEN 926:1982 Productos de Petróleo. Ensayos de Destilación*, Ecuador, 1982.
- INEN, *NTE INEN 808:1986 Productos de Petróleo. Determinación de los Puntos de Inflamación y Combustión en Vaso Abierto Cleveland*, Ecuador, 1986.
- INEN, *NTE INEN 810:1986 Productos de Petróleo. Determinación de la Viscosidad Cinemática y Dinámica en Líquidos Transparentes y Opacos*, Ecuador, 1986.
- INEN, *NTE INEN 319:2001 Productos Derivados del Petróleo. Determinación de la Densidad API*, Ecuador, 2001.
- INVENTARIA, *Motores Diésel – Índice de Cetano*, 2008.

- JORNADAS AMBIENTALES, RAMOS CASTELLANOS, P., ALVAREZ OQUINA, C., & RAMOS CRIADO, P. A., *Medio ambiente: calidad ambiental*, Editorial Universidad de Salamanca, Salamanca, España, 2002.
- MASSART, D. L., *Handbook of chemometrics and qualimetrics*, Editorial Elsevier, Amsterdam; Oxford. 1997.
- MASTANDREA, C., CHICHIZOLA, C., LUDUEÑA, B., SÁNCHEZ, H., ÁLVAREZ, H., & GUTIÉRREZ, A., "Hidrocarburos aromáticos policíclicos. Riesgos para la salud y marcadores biológicos", *Acta Bioquímica Clínica Latinoamericana*, No. 39, 2005.
- MOTT, R. L., & PEDRAZA, C. R. C., *Mecánica de fluidos aplicada*, Editorial Pearson Educación, 1993.
- MUÑOZ, M., & FERNANDA, L., "Contribución al estudio del ruido de combustión en conceptos avanzados de combustión diésel", *Riunet*, 2013.
- MURILLO, B., *Pirólisis de caucho procedente de neumáticos empleados en automoción*. Tesis Universidad de Extremadura, España, 1999.
- PEMEX, R., *Terminal de almacenamiento y distribución en Toluca*, México, 2010.
- PEREZ BAYER, J. F., *Gasificación de biomasa: estudios teórico experimentales en lecho fijo equicorriente*, Editorial Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, 2009.
- PETROSUD, *Diésel gas oil - d2 gost 305-82*, España, 2014.
- RAMIREZ, D., & CHRISTIAN, J., "Estudio CFD de la resonancia en la cámara de combustión de Motores Diésel HDI", *Riunet*, 2013.
- ROJAS GUTIÉRREZ, C., *Determinación de pesos moleculares de crudos y fracciones petrolíferas*, 2009.

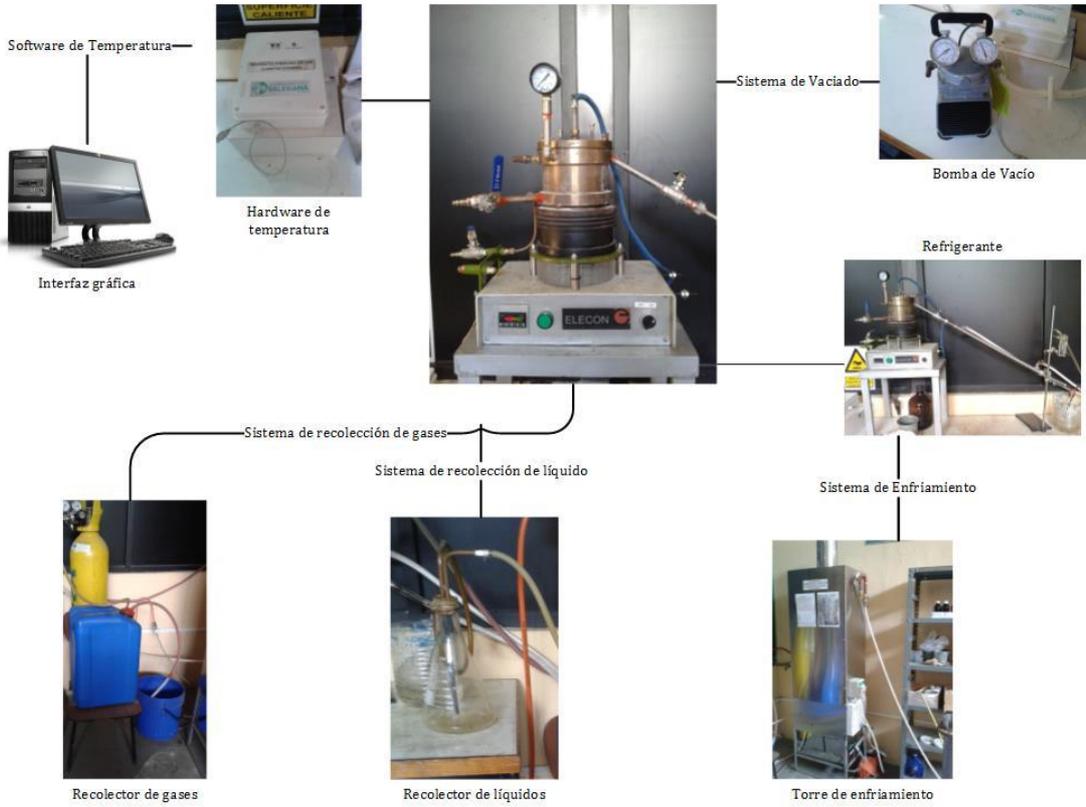
- ROJAS, N. Y., "Review of particulate emissions by diésel and biodiesel combustión",
Revista de Ingeniería, No. 20, 2004.
- SBARATO, D., SBARATO, V., & E-LIBRO, C., *Contaminación del aire*, Editorial
Encuentro, Córdoba, España, 2009.
- SCHEIRS, J., & HONORARYESSOR, E., *Feedstock Recycling and Pyrolysis of
Waste Plastics*, Editorial John Wiley & Sons. Ltd, 2006.
- SEDESOL, *La Pirólisis*, México, 2010.
- SERRANO, J. C., & CARRANZA, Y. A., "Análisis teórico de la combustión en
quemadores de gas natural", *Scientia Et Technica*, No. 139, 2005.
- TAPIA, C., *Análisis de vibraciones en elementos funcionales del faro derecho del auto
new beetle 2,5 versión Europea (ECE)*, Tesis Universidad de las Américas
Puebla, Cholula, Puebla, México, 6 de enero de 2006.
- TOTAL, TOTAL Fluidos Especiales, Argentina, 2012.
- WILLIAMS, P. T., BESLER, S., & TAYLOR, D. T., "The pyrolysis of scrap
automotive tyres: The influence of temperature and heating rate on product
composition", *Fuel*, No. 69, 1990.
- ZANÓN, M. P., & TRIOLA, M. D. C., *Medio atmosférico, La Meteorología y la
contaminación*. Editorial Universidad de Barcelona, Barcelona, España, 2008.

ANEXOS

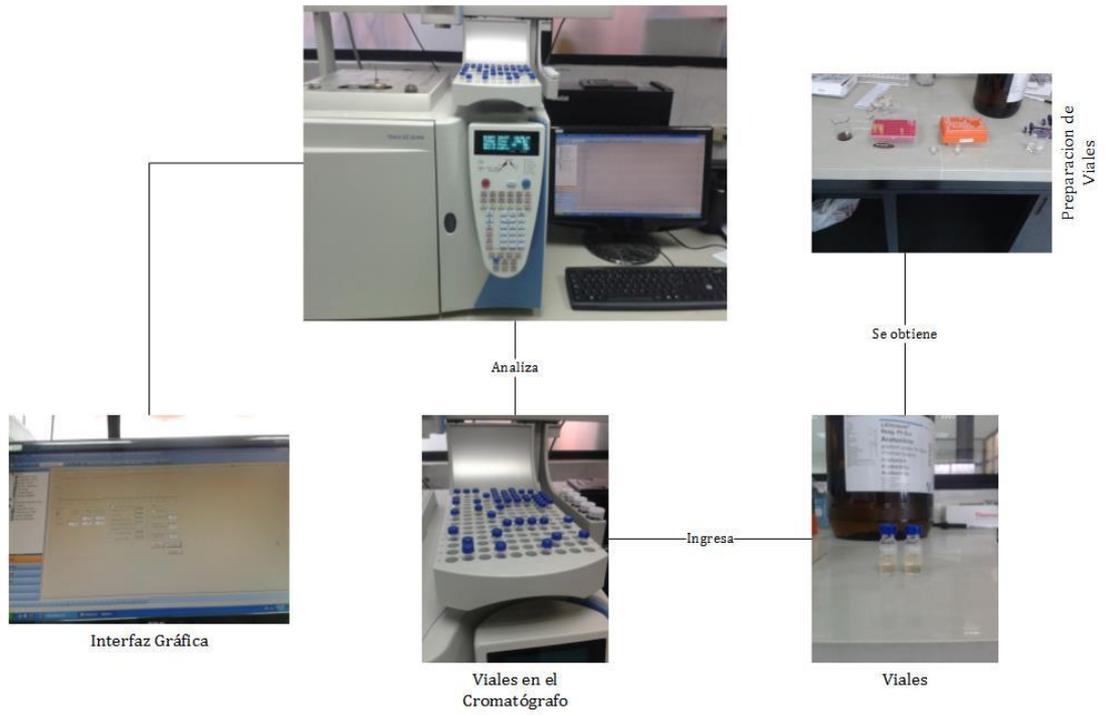
Anexo 1. Proceso general del proceso de pirólisis y prueba de combustión



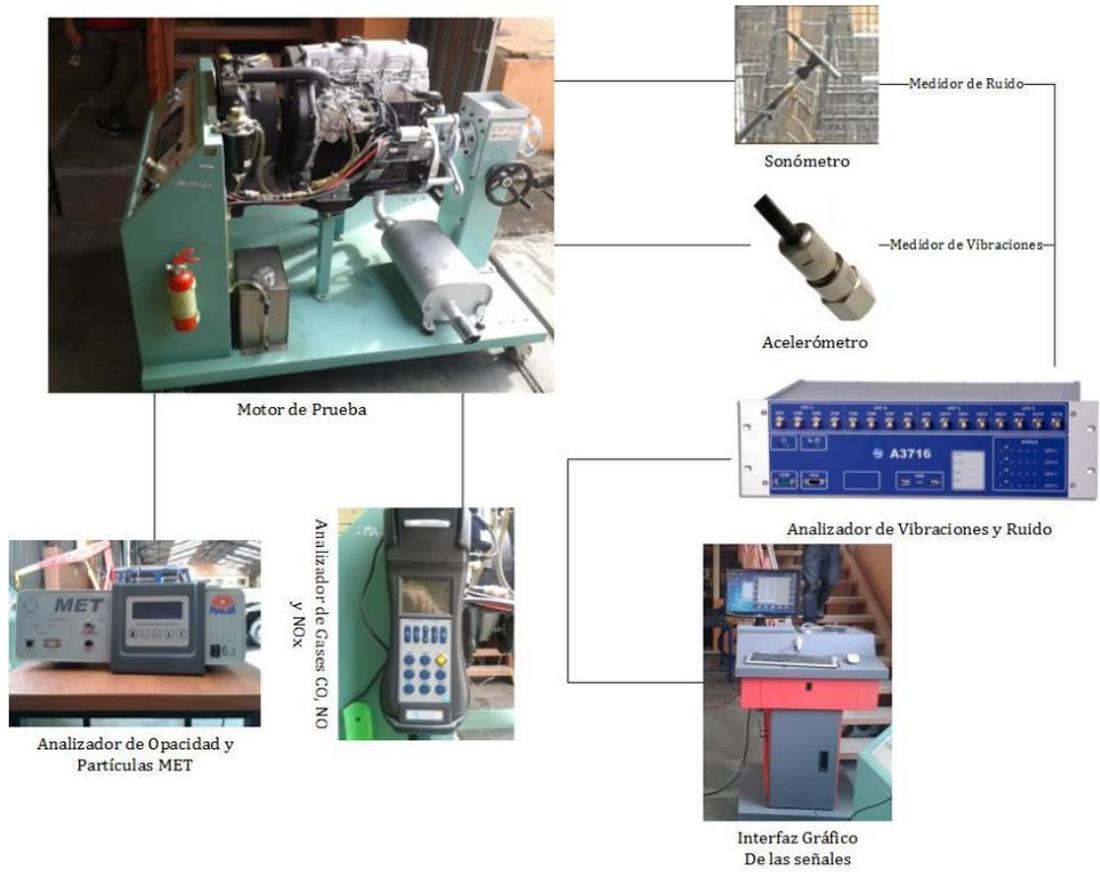
Anexo 2. Esquema del prototipo de pirólisis experimental



Anexo 3. Esquema del proceso de cromatografía de gases



Anexo 4. Esquema del proceso de la prueba de combustión



Anexo 5. Análisis de la varianza del proceso de pirólisis

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC	Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	0.28324		77.54%	0.28324	0.09441	4.60	0.087
Lineal	3	0.28324		77.54%	0.28324	0.09441	4.60	0.087
Presion	1	0.01051		2.88%	0.01051	0.01051	0.51	0.514
Temperatura	1	0.25561		69.98%	0.25561	0.25561	12.46	0.024
Tiempo de residencia	1	0.01711		4.68%	0.01711	0.01711	0.83	0.413
Error	4	0.08205		22.46%	0.08205	0.02051		
Total	7	0.36529		100.00%				

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	PRESS	R-cuad. (pred)
0.143222	77.54%	60.69%	0.3282	10.15%

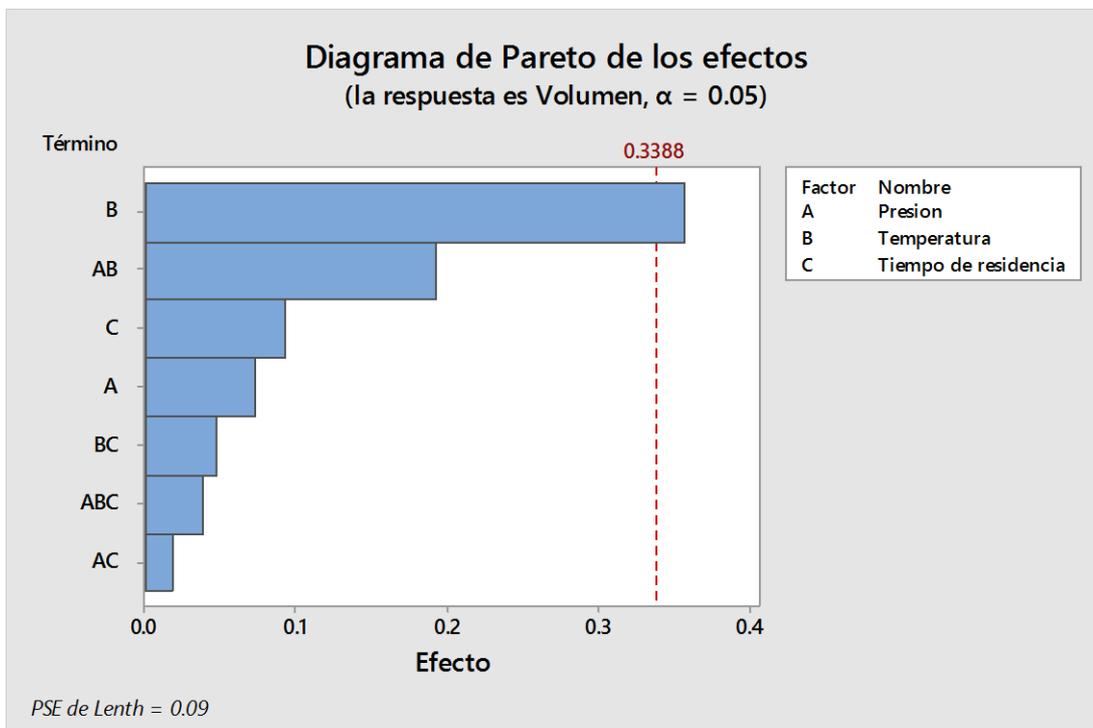
Coefficientes codificados

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	IC de 95%	Valor T	Valor p	VIF
Constante		4.4588	0.0506	(4.3182, 4.5993)	88.05	0.000	
Presion	-0.0725	-0.0363	0.0506	(-0.1768, 0.1043)	-0.72	0.514	1.00
Temperatura	-0.3575	-0.1787	0.0506	(-0.3193, -0.0382)	-3.53	0.024	1.00
Tiempo de residencia	0.0925	0.0463	0.0506	(-0.0943, 0.1868)	0.91	0.413	1.00

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

Volumen = 5.778 - 0.00181 Presion - 0.00357 Temperatura + 0.0093 Tiempo de residencia

Anexo 6. Diagrama de Pareto de los efectos en el proceso de pirólisis



Anexo 7. Resultados de los análisis de HAPs

TRACE GC-FID
Results (System
2/4/2015 4:54:57
PM) (Original))

PK #	Name	Retention Time	Area	Concentration
7	Fluoranteno	3.103	5491022	40.869
32	Benzo (b) fluoranteno	9.207	225931	2.960
	Benzo (k) fluoranteno			0.000 BDL
33	Benzo (a) pireno	10.428	2860724	32.836
43	Indeno (1,2,3-c,d) pireno	14.990	921808	14.098
50	Benzo (ghi) perileno	16.030	716941	9.237
Totals			10216426	100.00

Anexo 8. Límites máximos permisibles para fuentes fijas de combustión

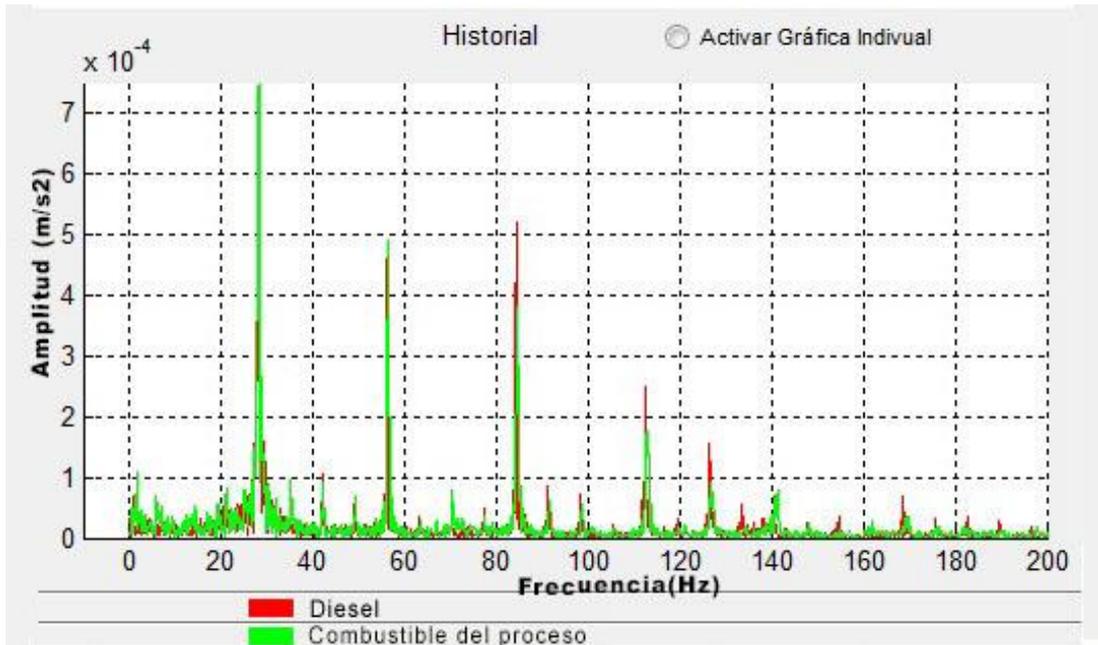
Tabla 11. Límites máximos permisibles de emisiones al aire para motores de combustión interna

CONTAMINANTE EMITIDO	OBSERVACIONES	FUENTES EXISTENTES	FUENTES NUEVAS	UNIDADES [1]
Partículas Totales	--	350	150	mg/m ³
Óxidos de Nitrógeno	--	2 300	2 000	mg/m ³
Dióxido de Azufre	--	1 500	1 500	mg/m ³

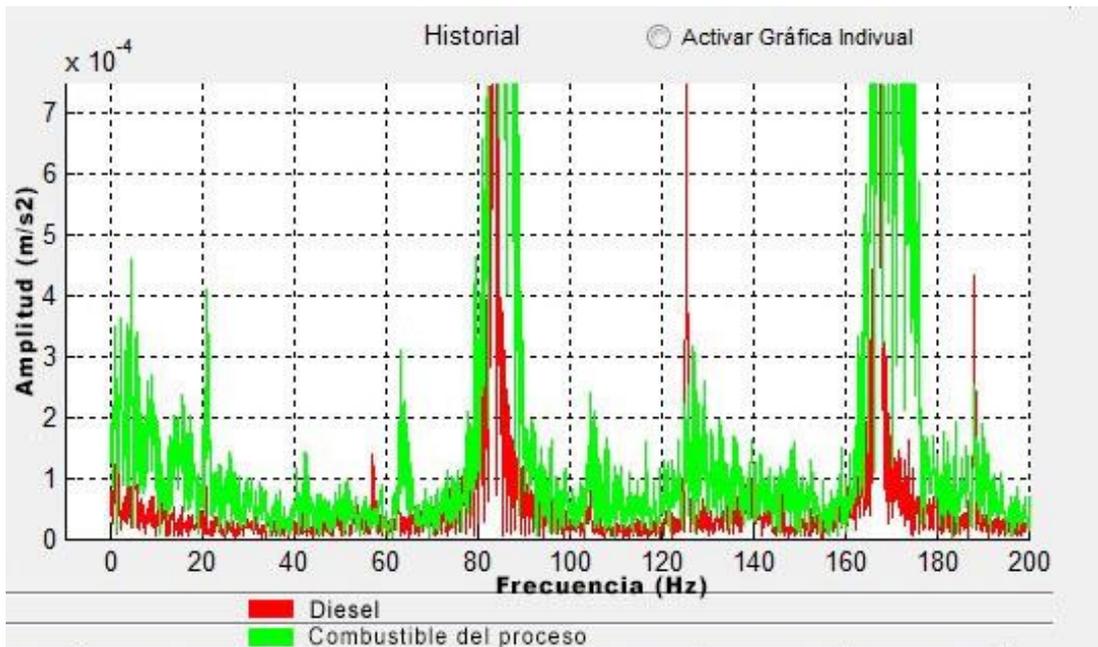
Notas:

[1] mg/m³: miligramos por metro cúbico de gas a condiciones normales de de 1 013 milibares de presión y temperatura de 0 °C, corregidos a 15% de O₂, en base seca.

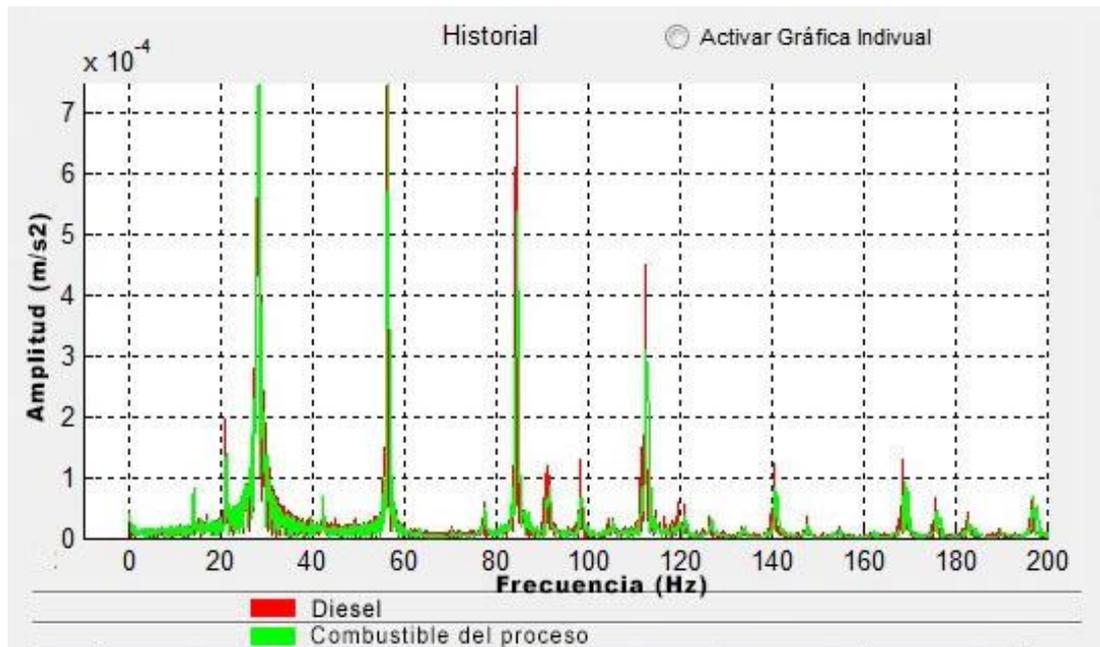
Anexo 9. Caracterización de señales del espectro de ruido a 800 rpm



Anexo 10. Caracterización de señales del espectro de ruido a 2500 rpm



Anexo 11. Caracterización de señales del espectro de vibraciones a 800 rpm



Anexo 12. Caracterización de señales del espectro de vibraciones a 2500 rpm

