

EVALUACIÓN DEL PROCESO DE PIROLISIS PARA LA PRODUCCIÓN DE
DIESEL A NIVEL LABORATORIO A PARTIR DE RESIDUOS PLÁSTICOS DE
INDUSTRIAS DE ALIMENTOS

MARIA PAULA MESA UPEGUI
CAROL IVONNE ORTÍZ RODRÍGUEZ

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTA, D.C, 2016

EVALUACIÓN DEL PROCESO DE PIROLISIS PARA LA PRODUCCIÓN DE
DIESEL A NIVEL LABORATORIO A PARTIR DE RESIDUOS PLÁSTICOS DE
INDUSTRIAS DE ALIMENTOS

MARIA PAULA MESA UPEGUI
CAROL IVONNE ORTÍZ RODRÍGUEZ

Proyecto integral de grado para obtener el título de
INGENIERO QUIMICO

Director
FELIPE CALDERÓN SÁENZ
Ingeniero de Minas y Metalurgia

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTA, D.C., 2016

Nota de aceptación

Orientador. Ing.

Jurado 1.

Jurado 2.

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr JAIME POSADA DÍAZ

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Secretario General.

Dr JUAN CARLOS POSADA GARCIA-PEÑA

Decano de Facultad de Ingenierías.

Dr JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director del Programa.

Dr LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIERREZ

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestos en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

Dedico en primer lugar a Dios, quien me dio y me da fuerzas cada día para seguir adelante durante esta carrera, por su amor incondicional y su ayuda durante este tiempo.

A mis padres quienes me apoyaron desde el principio, me han brindado su ejemplo y me han animado en todo momento; gracias porque cada paso que damos es impulsado por su amor y cuidado.

A mis hermanos por sus risas y favores.

A la empresa Laboratorios Calderón, por brindarme los recursos y mi experiencia profesional.

Y a todos aquellos que han estado pendientes, mis compañeros, mis amigos.

Carol Ivonne Ortiz Rodriguez

DEDICATORIA

A Dios primero que todo, eje y cimiento de mi vida. Él es la fuerza que me mantiene día a día, su amor incondicional es mi sustento para seguir adelante, a pesar de los baches en el camino.

A mis padres, Hernan y Sandra, su amor y su apoyo incondicional me han guiado y me han dado los mejores consejos, ellos son y serán siempre mi mejor ejemplo a seguir.

A mi hermano, Juan Esteban, mi mas grande motivación para querer ser mejor cada día.

A mis abuelos y mis tios, mi mas grande compañía y mi refugio en los momentos difíciles.

A mis amigos, por cada risa y cada momento que me regalan dia a dia.

A las personas que siempre han estado conmigo y a todas aquellas que aun sigo conociendo, por darme otros puntos de vista y ampliar mis horizontes.

Maria Paula Mesa Upegui

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos en primer lugar a Dios por permitirnos culminar esta carrera con éxito, dándonos valor cada día para alcanzar los objetivos propuestos cada día.

Al director del proyecto el Ingeniero Felipe Calderón Sáenz por haber confiado en nosotras y dirigirnos con su sabiduría nos estuvo asesorando durante el desarrollo del proyecto.

A todas las personas que hacen parte de la empresa Dr. Calderón laboratorios, por su constante ayuda, preocupación y favores, muchas gracias.

Agradecemos a la Universidad de América por formarnos como ingenieras Químicas por proporcionar el material de investigación y la asesoría de los profesores.

Agradecemos a nuestros familiares quienes vieron el esfuerzo y desarrollo durante este trabajo y a las personas que son y serán nuestra compañía.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	21
OBJETIVOS	23
1. PIROLISIS DE RESIDUOS PLASTICOS PARA LA OBTENCION DE COMBUSTIBLE	24
1.1 PLASTICOS	24
1.2 RESIDUOS PLASTICOS DE LA INDUSTRIA DE ALIMENTOS	26
1.3 RECICLAJE QUIMICO DE RESIDUOS PLASTICOS (PIROLISIS)	28
1.3.1 Pirolisis térmica.	31
1.3.1.1 Temperatura.	33
1.3.2 Pirolisis catalítica	33
1.3.2.1 Catalizador	36
1.4 PRODUCTOS DE LA PIROLISIS	38
2. EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL ACEITE PIROLITICO PROVENIENTE DE LA PIROLISIS DE RESIDUOS PLÁSTICOS	39
2.1 PIROLISIS DE RESIDUOS PLASTICOS DE INDUSTRIAS DE ALIMENTOS	39
2.2 EQUIPOS	40
2.2.1 Reactor Batch	40
2.2.2 Conector de gases	41
2.2.3 Condensador en húmedo	41
2.2.4 Quemador de gases (tea).	42
2.2.5 Controladores de temperatura	42
2.2.6 Medidor de presión	42
2.3 MATERIA PRIMA	43
2.3.1 Composición de la materia prima	44
2.3.2 Humedad	45
2.3.3 Porcentaje de cenizas	46
2.3.4 Prueba de Combustión	46
2.4 DISEÑO EXPERIMENTAL	47
2.4.1 Variables	48
2.4.1.1 Variables independientes	48
2.4.1.2 Variables controladas	50
2.4.1.3 Variables no controladas	52
2.4.1.4 Variables dependientes.	52
2.4.2 Experimentación	52
2.4.2.1 Rendimiento del aceite pirolitico en la pirolisis térmica.	54
2.4.2.2 Rendimiento del aceite pirolitico en la pirolisis catalítica.	54
2.4.3 Análisis estadístico.	57
2.4.4 Prueba de hipótesis	57

3. CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE PIROLITICO Y OBTENCIÓN DEL COMBUSTIBLE DIÉSEL POR DESTILACIÓN	61
3.1 CARACTERIZACION DEL ACEITE PIROLITICO	61
3.1.1 Gravedad API	61
3.1.2 Contenido De Sedimentos.	62
3.1.3 Contenido De Agua.	63
3.1.4. Punto De Fluides	64
3.1.5 Contenido De Azufre.	64
3.1.6 Caracterización PONA	65
3.1.6.1 Punto de anilina	65
3.1.6.2 Índice de refracción	66
3.1.6.3 Índice de Bromo	68
3.1.7 Número De Neutralización	68
3.1.8 Viscosidad Saybolt	69
3.2 CURVA DESTILACIÓN ATMOSFÉRICA DEL ACEITE PIROLÍTICO	70
4. CARACTERIZACIÓN DEL DIÉSEL OBTENIDO POR DESTILACIÓN DEL ACEITE PIROLITICO	75
4.1 CARACTERIZACION DEL DIÉSEL	75
4.1.1 Densidad	75
4.1.2 Curva de destilación atmosférica	76
4.1.3 Contenido de agua.	76
4.1.4 Viscosidad	77
4.1.5 Contenido de azufre	77
4.1.6 Flash Point	77
4.1.7 Cloud Point	78
4.1.8 Carbón Conradson	79
4.1.9 Cenizas.	80
4.1.10 Corrosión al cobre	81
4.1.11 Índice De Cetano	81
4.2 TABLA COMPARATIVA	82
BIBLIOGRAFIA	86
ANEXOS	92

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Estructura de poliolefinas formadas por alquenos simples.	25
Figura 2. Reciclaje químico de plásticos.	28
Figura 3. Esquema de un proceso de pirolisis.	30
Figura 4. Descomposición de polímeros.	31
Figura 5. Formación de radicales libres	31
Figura 6. Formación de nuevos radicales.	31
Figura 7. Reacción de despolimerización.	32
Figura 8. Abstracción de hidruros.	34
Figura 9. Adición de protones.	35
Figura 10. Obtención de olefinas y compuestos iónicos.	35
Figura 11. Isomerización de carga	36
Figura 12. Isomerización de un sustituyente	36
Figura 13. Desproporciónación	36
Figura 14. Estructura molecular de catalizadores alumino-silicatos.	37
Figura 15. Proceso de pirolisis.	39
Figura 16. Instalación del equipo de pirolisis	40
Figura 17. Color de la llama generado por los residuos plásticos.	47
Figura 18. Variables dependientes e independientes.	48
Figura 19. Diagrama de Pareto estandarizada para rendimiento	59
Figura 20. Equipo de laboratorio para la determinación de la curva de destilación ASTM D86.	71
Figura 21. Productos finales de la destilación atmosférica	74

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Dimensiones del reactor batch	41
Tabla 2. Dimensiones del tubo conector.	41
Tabla 3. Dimensiones del condensador en húmedo	42
Tabla 4. Dimensiones del quemador de gases	42
Tabla 5. Estructura multicapa en los empaques de alimentos usados en el proceso.	43
Tabla 6. Estructura de empaques de frituras	43
Tabla 7. Resultados de la prueba de combustión.	47
Tabla 8. Proporción de contaminación en cada 500 g de plástico.	52
Tabla 9. Condiciones de operación a la entrada del proceso.	53
Tabla 10. Factores a analizar	53
Tabla 11. Distribución de los bloques para el diseño experimental.	53
Tabla 12. Productos obtenidos en la pirolisis térmica de residuos plásticos	54
Tabla 13. Rendimientos para los productos de la pirolisis catalítica.	55
Tabla 14. Rendimientos de aceite pirolítico promedio.	56
Tabla 15. Análisis de varianza ANOVA	58
Tabla 16. Efectos estimados para el rendimiento	59
Tabla 17. Valor óptimo para el rendimiento	60
Tabla 18. Resultados prueba de gravedad API	62
Tabla 19. Datos de referencia para la prueba de porcentaje de sedimentos	63
Tabla 20. Determinación del punto de fluidez promedio	64
Tabla 21. Contenido de azufre en el crudo	65
Tabla 22. Datos para el punto de anilina	66
Tabla 23. Índices de refracción obtenidos a 15 °C	66
Tabla 24. Puntos de ebullición de los hidrocarburos generados.	70
Tabla 25. Valores para determinar la densidad en el Diésel.	75
Tabla 26. Residuo de la destilación atmosférica.	76
Tabla 27. Resultados para el contenido de agua en el diésel	76
Tabla 28. Datos para determinar la viscosidad del diésel.	77
Tabla 29. Contenido de azufre en la muestra de diésel	77
Tabla 30. Análisis de flash Point en el Diésel.	78
Tabla 31. Resultados para la prueba de punto de nube	79
Tabla 32. Resultados prueba de carbón Conradson	80
Tabla 33. Resultado promedio del contenido de cenizas para el crudo	80
Tabla 34. Resultados de la prueba de índice de Cetano para el diésel	81
Tabla 35. Comparación de las características del diésel obtenido con las características del Diésel 2 D y Diésel en mezcla con Biodiesel.	82
Tabla 36. Características Diésel Marino	83

LISTA DE GRAFICOS

	pág.
Gráfico 1. Proporción de gases y líquidos a temperaturas superiores a 650°	33
Gráfico 2. Clasificación de la materia prima	45
Gráfico 3. Rendimiento respecto a la cantidad de catalizador utilizado.	50
Gráfico 4. Rendimiento del producto respecto al tiempo de residencia.	51
Gráfico 5. Rendimiento del aceite pirolítico en relación al tiempo de residencia establecido.	51
Gráfico 6. Distribución de productos en la pirolisis térmica	55
Gráfico 7. Distribución de los productos obtenidos en la pirolisis catalítica	56
Gráfico 8. Relación temperatura vs rendimiento	57
Gráfico 9. Relación rendimiento temperatura	60
Gráfico 10. Relación del volumen destilado con los puntos de ebullición de los componentes	73
Gráfico 11. Fracciones identificadas en el combustible	73
Gráfico 12. Relación temperatura - volumen de los productos de destilación del Diésel	76

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Balance de masa para el proceso de pirólisis	39
Ecuación 2. Tamaño de muestra para poblaciones infinitas.	44
Ecuación 3. Tamaño de la muestra a estudiar.	44
Ecuación 4. Cálculo del porcentaje de humedad	45
Ecuación 5. Contenido de cenizas	46
Ecuación 6. Rendimiento del producto en función del material alimentado.	48
Ecuación 7. Contaminación promedio en 500 g de plástico	52
Ecuación 8. Cálculo del % de rendimiento	54
Ecuación 9. Regresión lineal	60
Ecuación 10. Determinación de los grados API	61
Ecuación 11. Porcentaje de volumen de sedimentos	62
Ecuación 12. Porcentaje de volumen de agua	63
Ecuación 13. Porcentaje de carbonos aromáticos	66
Ecuación 14. Porcentaje de carbonos nafténicos	67
Ecuación 15. Porcentaje de carbonos parafínicos	67
Ecuación 16. Moles de KOH gastados	69
Ecuación 17. % de neutralización para el crudo	69
Ecuación 19. Rendimiento de diésel por cada 100 ml de muestra	74
Ecuación 20. Determinación de la densidad	75
Ecuación 21. Corrección para la temperatura de flash Point	78
Ecuación 22. Cálculo del contenido de carbón.	79
Ecuación 23. Cálculo del porcentaje de cenizas	80
Ecuación 24. Cálculo del índice de cetano.	81

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Caracterización de la materia prima	93
Anexo B. Datos para el análisis estadístico de las pirólisis térmica y catalítica	98
Anexo C. Caracterización del aceite pirrolítico y el diesel obtenido	104
Anexo D. Diagramas de proceso	118

GLOSARIO

ACEITE PIROLITICO: hidrocarburo formado por el proceso de pirólisis del material plástico y predecesor del combustible.

ALAMBIQUE: instrumento de metal en el que se realiza la evaporación y condensación del aceite pirolítico para la obtención del combustible final.

ASFÁLTENOS: compuestos aromáticos y nafténicos de con alto peso molecular aproximadamente de 1000 a 50000kg/kgmol.

ASTM: *American Society for Testing and Materials*. Es una organización de estándares internacionales que desarrolla y publica estándares técnicos para una amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios.

BASIC SEDIMENT AND WATER (BSW): corresponde al contenido de agua libre (no disuelta) y sedimentos que trae el crudo. Es importante que su valor sea bajo, para evitar suciedades y dificultades durante el procesamiento del crudo, al vaporizarse el agua libre que pueden dañar el horno. Se informa como porcentaje en volumen sobre crudo.

CARBÓN CONRADSON: determina la cantidad de residuo de carbón presente en los diferentes productos del petróleo, es decir la tendencia a formar depósitos en su evaporación que forman daños al motor.

CATALIZADOR TIPO ZEOLITA: mineral cristalino con estructura formada por tetraedros enlazados con unidades primarias aluminosilicatos hidratados, de origen volcánico de forma natural, con estructura porosa y de canales, siendo útil como catalizador por sus mallas moleculares que controlan el tipo de moléculas que tienen acceso a los sitios activos.

CLOUD POINT: temperatura en la cual se empiezan a formar cristales de parafina en el aceite que se encuentran en solución, haciendo que el aceite se torna nebuloso. Si el aceite tiene un alto punto de nubosidad no es recomendable en ciertos usos pues los cristales de parafina pueden obstruir el medio por el cuál van disminuyendo la vida útil del equipo.

CONTENIDO DE AZUFRE: se expresa como tanto por ciento en peso de azufre y varía desde menos un 0,1% hasta más de un 5%. El contenido de azufre en el combustible afecta los motores diésel de dos formas diferentes. Una tiene que ver con la contaminación ambiental por la emisión de SO_x de los gases producidos en la combustión y otra directamente a las partes que componen los motores.

DESTILACIÓN ATMOSFERICA: es la destilación que se realiza a una presión cercana a la atmosférica. Se utiliza para extraer los hidrocarburos presentes de forma natural en el crudo, sin afectar la estructura molecular de los componentes.

DIESEL: hidrocarburo líquido compuesto principalmente por parafinas y utilizado principalmente como combustible en calefacción y motores diésel.

FLASH POINT: temperatura mínima corregida a presión barométrica de 101,3 kPa, donde al aplicar una fuente de ignición genera que los vapores del combustible produzcan un fogonazo instantáneo.

GRAVEDAD API: es la razón entre el peso de una sustancia y el peso de igual volumen de agua a la misma temperatura, la gravedad específica API se mide mediante hidrómetros que flotan en el líquido. El API determina si el producto es liviano o pesado.

MARMITA: recipiente metálico cubierto con tapa totalmente ajustado con calentador eléctrico, en donde es introducido el material plástico para el proceso de pirolisis.

PARAFINAS: ceras extraídas del petróleo, sólidas a temperatura ambiente, inertes, impermeables, brillantes, biodegradables y cuya combustión tiene lugar sin liberación de vapores nocivos o corrosivos.

PIROLISIS: degradación térmica de una sustancia en ausencia de oxígeno o con cantidad limitada de este. Llevada habitualmente a temperaturas entre 400 °C y 800°C donde los residuos se transforman en gases, líquidos y cenizas sólidas “coque” de pirolisis.

POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PEBD): polímero termoplástico de cadena ramificada conformado por unidades repetitivas de etileno que hace que su densidad sea más baja 0,915-0,935 g/cm³ y con temperatura de fusión de 115°C. Es producido por polimerización vinílica por radicales libres a altas presiones desde 103 a 345 MPa y altas temperaturas, desde 150 a 300°C. Los productos fabricados con el PEBD tienen su respectiva identificación americana SPI (Society of the Plastics Industry) con el número 4 LDPE por sus siglas en inglés.

POLIPROPILENO (PP): polímero termoplástico obtenido por polimerización del propileno, perteneciente al grupo de las poliolefinas, su temperatura de fusión es superior a la del polietileno, cuando es Homopolímero de 160 a 170°C como copolímero de 130 a 168°C. Su densidad está comprendida entre 0,90 y 0,93 g/cm³. Para los productos fabricados como empaques de alimentos se identifican por la SPI con el número 5.

PUNTO DE ANILINA: mide la potencia de dilución de un producto de petróleo por medio de anilina y sustancias aromáticas. Es de importancia conocer este valor en procesos donde la dilución sea importante o donde dicha característica es indeseada. A altas temperaturas la anilina aumenta su solubilidad y cuando alcanza la solubilidad total se evidencia claridad, a bajas temperaturas se enturbia al

determinar esa temperatura de enturbiamiento se reconoce si es hidrocarburo, nafténico, aromático, parafinico.

PUNTO DE FLUIDEZ: se define como la temperatura más baja a la cual un derivado del petróleo fluiría.

PUNTO DE IGNICIÓN: se denomina así a la temperatura mínima necesaria para que los vapores generados por un combustible comiencen a arder.

PUNTO DE NUBE: es la temperatura a la cual empiezan a formarse cristales de cera en el petróleo crudo.

TEMPERATURA DE DEGRADACIÓN: temperatura superior en la que el polímero puede ser conformado de manera útil, si se excede esta temperatura los enlaces covalentes de la cadena principal pueden destruirse, quedando el polímero quemado o carbonizado.

TERMOPLÁSTICOS: son plásticos que, a temperaturas relativamente altas, se vuelven deformables o flexibles, se derriten cuando se calienta y se endurecen en un estado de transición vítrea cuando se enfrían lo suficiente. La mayor parte de los termoplásticos son polímeros de alto peso molecular, los cuales poseen cadenas asociadas por medio de fuerzas de Van der Waals débiles (polietileno); fuertes interacciones dipolo-dipolo y enlace de hidrógeno, o incluso anillos aromáticos apilados (poliestireno).

VISCOSIDAD: es una medida de la resistencia de un fluido a las deformaciones graduales producidas por tensiones cortantes o tensiones de tracción.

RESUMEN

Los plásticos son los materiales más usados industrialmente para procesos de empaque, almacenamiento y distribución tanto de materias primas como de productos finales, especialmente en industrias de alimentos, ya que deben garantizar que sus productos cumplan con las características especificadas por normas técnicas, pero cuando existen deficiencias en los procesos de empaque, se genera un gran volumen de residuos.

Los residuos plásticos se pueden tratar por medio de reciclaje mecánico o químico, así, el presente estudio se centra en los procesos de reciclaje químico, específicamente en la pirolisis térmica y catalítica, cuyo fin es generar productos útiles, como combustibles, y reducir considerablemente el volumen de residuos en los rellenos sanitarios.

Primero, se realiza la caracterización de la materia prima para determinar de qué tipo de plásticos se componen los residuos a tratar: se evalúa la presencia de contaminación (restos de alimentos), la humedad y las cenizas ya que los residuos contienen trazas de materia orgánica, además se identifica a que grupo de plásticos pertenecen de acuerdo a la codificación establecida por la norma ASTM D7611.

Posteriormente, se realiza un diseño de experimentos para determinar las condiciones de operación que generan el mejor rendimiento del producto de interés en la pirolisis tanto térmica como catalítica, que, en este caso, se denomina aceite pirolítico y corresponde a la fracción líquida de los productos finales. Se determina la temperatura como la variable de mayor influencia y se establece 650 °C como la temperatura a la que se obtienen los mejores rendimientos. El aceite pirolítico se caracteriza de acuerdo a las normas ASTM que aplican para el análisis de productos del petróleo y se hace énfasis en la norma ASTM D86 *“método de prueba estandarizado para la destilación de productos del petróleo y combustibles líquidos a presión atmosférica”* para la obtención del combustible (diésel) derivado del aceite. El aceite pirolítico se considera como un crudo ligero por su valor de densidad (47.7 °API), además muestra un contenido de azufre y de agua de 0.025% y <0.1% respectivamente. El punto de fluidez se registra a los -15°C; presenta un porcentaje de carbonos aromáticos, nafténicos, parafínicos y olefínicos del 12.22%, 34.03%, 53.75% y 15%. El aceite pirolítico tiene un porcentaje de sedimentos del 15% y un número de neutralización de 11.33 mg KOH/g de muestra analizada.

Finalmente, el diésel obtenido se somete a evaluación, también según las normas ASTM. Para el Diésel se obtiene un contenido de azufre del 0.0338%, una densidad de 0.8257 g/ml y un contenido de agua <0.1%. Registra su flash point a los 65.5°C y su cloud point a los 3°C. El contenido de carbón y cenizas para el diésel es de

0.8847% y 0.0637% respectivamente y su índice de cetano es de 49.08. Los resultados finales se comparan con combustibles diésel comerciales con el objetivo de conocer las aplicaciones en las que puede ser útil de acuerdo a sus características.

Palabras claves: residuos plásticos, reciclaje, tratamiento, pirolisis térmica, pirolisis catalítica, combustible, aceite pirolítico, caracterización, normas ASTM.

INTRODUCCIÓN

Los plásticos son materiales de estructuras moleculares complejas y pesos moleculares altos; son usados para todo tipo de aplicaciones industriales y su demanda es cada vez mayor: una gran demanda de plásticos, genera a su vez una gran cantidad de residuos. Aunque existen varios métodos para el tratamiento de residuos, muchos de ellos requieren etapas de lavado y acondicionamiento que se traducen en mayores costos, por lo que se buscan formas de reciclaje que garanticen la máxima utilidad de los residuos.

Uno de los métodos de reciclaje de plásticos es el reciclaje químico¹ o pirolisis, ya que, por medio de este tratamiento, se modifican las estructuras químicas de los polímeros garantizando la reducción del volumen de residuos y la generación de productos como combustibles.

La producción de combustibles a partir de la pirolisis de residuos plásticos es una tecnología emergente que brinda una solución para la disposición adecuada de aquellos residuos post-consumo y post-industria que no pueden ser tratados mediante reciclaje mecánico y que usualmente van a parar a rellenos sanitarios. La pirolisis es un proceso en el que se da la degradación térmica de los residuos en ausencia de oxígeno; durante este proceso los materiales poliméricos se calientan a altas temperaturas, de manera que sus macromoléculas se descomponen en moléculas más pequeñas y se recuperan productos tales como gasolina, queroseno, diésel y una amplia gama de hidrocarburos líquidos y gaseosos.

Los productos pirolíticos generalmente se componen de una fracción semilíquida o aceite pirolítico, una fracción sólida o carbonilla y una fracción de gases combustibles no condensables. El aceite pirolítico se compone de una mezcla de hidrocarburos que se extienden desde alcanos ligeros hasta aceites pesados, naftas, compuestos aromáticos y parafinas.

La pirolisis puede ser térmica o catalítica, en ambas, la temperatura es el factor de mayor influencia, por lo que se busca siempre manejar una temperatura óptima acorde a los residuos que se están tratando. La pirolisis térmica produce una distribución de hidrocarburos muy amplia y se requiere un mayor tiempo de residencia en el proceso para lograr la descomposición total de los residuos, mientras que, en la pirolisis catalítica, aunque la temperatura sigue siendo el factor de mayor influencia, el uso de un catalizador apropiado reduce los tiempos de

¹ UNIVERSIDAD DE VALLADOLID. Escuela técnica superior de Ingenieros Industriales. Departamento de Química Orgánica. Recuperado el 13 de junio de 2016 de: http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05-06/pet/reciclado_quimico.htm

procesamiento y la distribución de hidrocarburos en el producto final, además de mejorar su calidad.

Actualmente, en países como Alemania, Inglaterra, España, EEUU, Corea y Japón, han surgido instalaciones, con una alta tecnología, dedicadas a la producción de combustibles derivados del plástico. Otras instalaciones de media tecnología han surgido en Ucrania, Pakistán y México². En Colombia, aún no se ha visto el desarrollo de este tipo de tecnologías, pero se han empezado a adelantar investigaciones a una escala menor (laboratorio y planta piloto) con el fin de estudiar la rentabilidad y factibilidad del proceso en el contexto colombiano de la generación y tratamiento de residuos plásticos³.

² KAMINSKY Walter, SCHEIRS John. Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics: converting waste plastics into diesel and other fuels. West Sussex UK, 2006, p 7

³ QUINTERO PEÑA Carlos Humberto. Reciclaje termo-mecánico del poliestireno expandido (Icopor), como una estrategia de mitigación de su impacto ambiental en rellenos sanitarios. Universidad de Manizales. Manizales, Colombia. 2013., p 22

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el proceso de pirolisis de plásticos para la producción de Diésel a nivel laboratorio a partir de residuos plásticos de industrias de alimentos.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar condiciones de operación para el proceso de pirolisis de acuerdo al rendimiento en la conversión de los residuos plásticos en aceite pirolítico.
- Obtener Diesel mediante la destilación del aceite pirolítico a nivel laboratorio.
- Caracterizar el Diesel obtenido por destilación del aceite pirolítico mediante análisis fisicoquímicos.

1. PIROLISIS DE RESIDUOS PLASTICOS PARA LA OBTENCION DE COMBUSTIBLE

Con el objetivo de entender de qué trata el proceso de pirolisis de residuos plásticos para la obtención de combustible, en el presente capítulo se muestran conceptos generales de los plásticos, su composición, además del panorama colombiano en cuanto a generación de residuos, principalmente en la industria de alimentos.

Después de entender un poco más acerca de los compuestos plásticos encontrados en los residuos, se identifican las formas de tratarlos y se hace énfasis en el reciclaje químico o pirolisis, siendo este el objetivo de la presente investigación. A este tema corresponden los tipos de pirolisis, la descripción del proceso, así como los productos y subproductos obtenidos, dando a conocer las ventajas económicas y ambientales que conllevan este tratamiento.

1.1 PLASTICOS

Los polímeros conformados por moléculas de carbono e hidrogeno que contienen dobles enlaces carbono – carbono a través de los cuales se polimerizan por adición son llamados poliolefinas. Los alquenos, conocidos también como olefinas, son compuestos químicos formados por moléculas de carbono e hidrogeno con al menos un enlace doble carbono – carbono, siendo etileno y propileno los alquenos más simples.

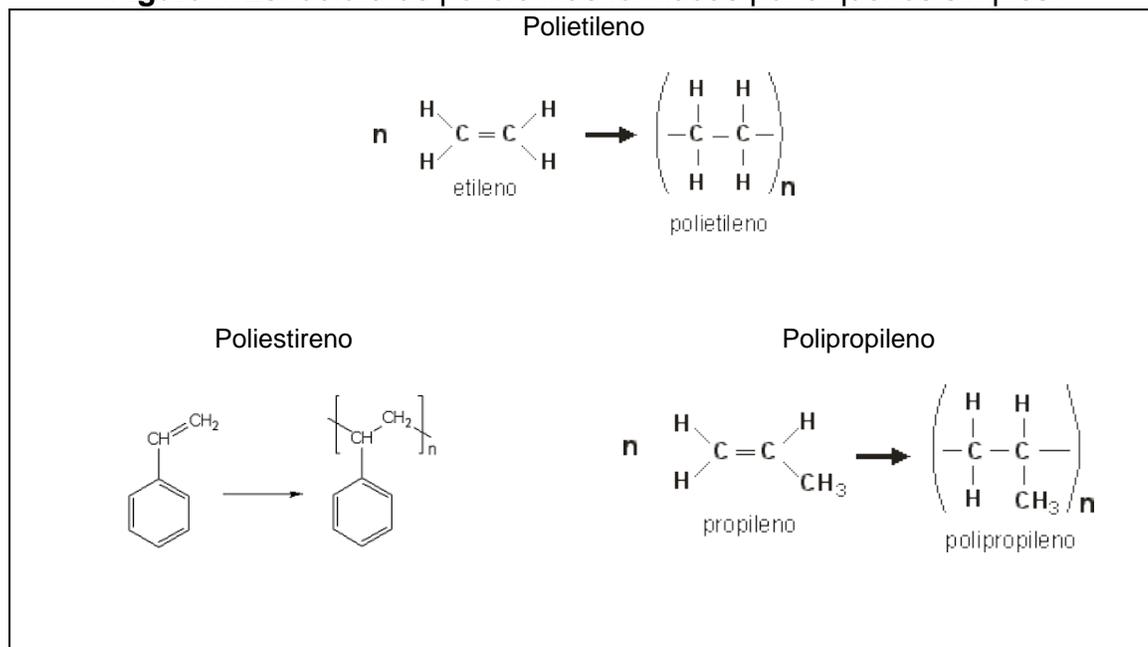
Las poliolefinas obtenidas a partir de la polimerización de alquenos simples, como PE (polietileno), PP (polipropileno) y PS (poliestireno) son normalmente utilizadas como materia prima para la producción de empaques de alimentos⁴. A continuación, se describen las aplicaciones más comunes para cada tipo de plástico (poliolefina) en la industria alimenticia y una descripción general de sus características. En la **figura 1** se muestra la estructura de cada una de las poliolefinas.

El **polipropileno (PP)** se puede fabricar de diferentes formas; la forma en la que se produce afecta sus propiedades físicas ya que un bajo contenido de comonomeros altera su estructura y sus propiedades. Su punto de fusión es aproximadamente a 130 °C. Los usos principales dados al polipropileno son:

- Los homopolimeros se usan para termoformado y fibras orientadas.
- Los copolimeros aleatorios se usan para empaques de alimentos, químicos, productos de belleza, contenedores claros y empaques resistentes al calor.
- Los copolimeros en bloque se usan para filmes y hojas.

⁴ EBNESAJJAD Sina. Plastic films in food packaging Materials, technology and applications. Chadds Ford, PA, USA. 2013, p 2

Figura 1. Estructura de poliolefinas formadas por alquenos simples.



Fuente: EBNESAJJAD Sina, Plastic films in food packaging Materials, technology and applications. Chadds Ford, PA, USA. 2013

El **Poliestireno (PS)** es el plástico más simple basado en moléculas de estireno. Su punto de fusión se encuentra en los 240 °C. Existen tres formas generales de películas de Poliestireno:

- PS para propósitos generales
- PS orientado
- PS de alto impacto (HIPS)

Los principales usos y aplicaciones que se le dan al Poliestireno son:

- El PS de propósitos generales se usa para empaques de yogurt, crema, mantequilla, cajas de huevos, bandejas de frutas y vegetales, ponqués y galletas. Empaques desechables de medicamentos, empaques de horneados y etiquetas.
- Las películas de PS orientado pueden ser impresas y laminadas con espumas para platos y bandejas de comida, mejorando su estética.

El **polietileno (PE)** es el plástico más común. A veces, algunos de los carbonos en la estructura del polímero, en lugar de tener hidrógenos unidos a ellos, tienen asociadas largas cadenas de polietileno, esto se llama polietileno ramificado, o de baja densidad (LDPE). Cuando no hay ramificación, se llama polietileno lineal, o

polietileno de alta densidad (HDPE)⁵. El polietileno lineal es mucho más fuerte que el polietileno ramificado, pero el polietileno ramificado es más barato y más fácil de fabricar⁶. Las ramificaciones afectan la cristalinidad, es decir, un alto grado de ramificaciones reducen el tamaño de las regiones cristalinas, lo que conlleva a una baja cristalinidad. Entre las aplicaciones del polietileno se encuentran⁷:

- El polietileno de ultra baja densidad se usa para empaques de quesos, carnes, café y detergentes.
- El polietileno de baja densidad se usa para empaques de alimentos como panes, productos horneados y en empaques para textiles.
- El polietileno de baja densidad lineal se usa para empaques en agricultura y empaques de burbujas para embalaje.
- El polietileno de media densidad se usa para bolsas de mercado, sobres de envíos y empaques de productos frescos.
- El polietileno de alta densidad se usa para empaques de alimentos, botellas de agua, cosméticos, productos médicos y químicos.

1.2 RESIDUOS PLASTICOS DE LA INDUSTRIA DE ALIMENTOS

Un envase alimentario es cualquier material que se utiliza para contener, proteger, distribuir y mostrar productos alimentarios, desde la materia prima hasta el producto terminado y desde el fabricante hasta el usuario o consumidor. Los plásticos constituyen uno de los grupos de materiales que más se utiliza en la industria alimentaria como envases de alimento; del total de residuos plásticos generados, el 60% corresponde a residuos de envases plásticos post consumo.

El consumo de plásticos por tipos y aplicaciones ha cambiado con los años, hoy en día, alrededor de un 70% del consumo total es en forma de termoplásticos, principalmente PE, PP y PS; su uso predominante es en el envasado.

Los residuos plásticos generados diariamente, se pueden dividir en 4 categorías:

1. Plásticos poco degradables y limpios
2. Plásticos poco degradables que han sido contaminados
3. Mezclas de plásticos con composición conocida
4. Componentes de residuos sólidos urbanos

Los residuos son generados en todas las etapas del ciclo productivo de los plásticos, partiendo desde su producción hasta su consumo. Del total de residuos generados,

⁵ Ibid, EBNESAJJAD Sina., p 5

⁶ Ibid, EBNESAJJAD Sina., p 6

⁷ Ibid, EBNESAJJAD Sina, p 6

alrededor de un 60 % es residuo post consumo, principalmente productos de envasado⁸. El PE de alta y baja densidad, el PP y el PS son los polímeros más utilizados en el envasado y por tanto contribuyen a un alto porcentaje en los residuos tanto urbanos como industriales, en total, representan el 94 % del total de residuos plásticos. Los procesos de reciclaje son muy limitados⁹ ya que los materiales que los componen están formados por estructuras difíciles de separar en capas o partículas menores y son generalmente incluidos en los residuos municipales y tratados como basuras.

Existen diversos métodos en el tratamiento de los residuos plásticos, estos se denominan tratamientos primarios, secundarios, terciarios y cuaternarios.

Los tratamientos primarios consisten en operaciones mecánicas para obtener un producto de similares características a las del producto original; se aplica principalmente en recortes de plantas de producción.

Los tratamientos secundarios consisten en la fusión, es decir, los desechos plásticos son convertidos en productos de diferentes formas y aplicaciones que difieren a las del plástico original.

El reciclado terciario, o “reciclado químico”, persigue el aprovechamiento integral de los elementos constitutivos del plástico, transformándolo en hidrocarburos, los cuales pueden ser materia prima para la obtención de otros productos petroquímicos; los métodos pueden ser químicos o térmicos, dependiendo del tipo de polímero¹⁰.

En la **figura 2** se ilustra un proceso de reciclado químico de plásticos (pirolisis), que busca reducir las cadenas poliméricas para obtener productos más simples útiles en la industria petroquímica.

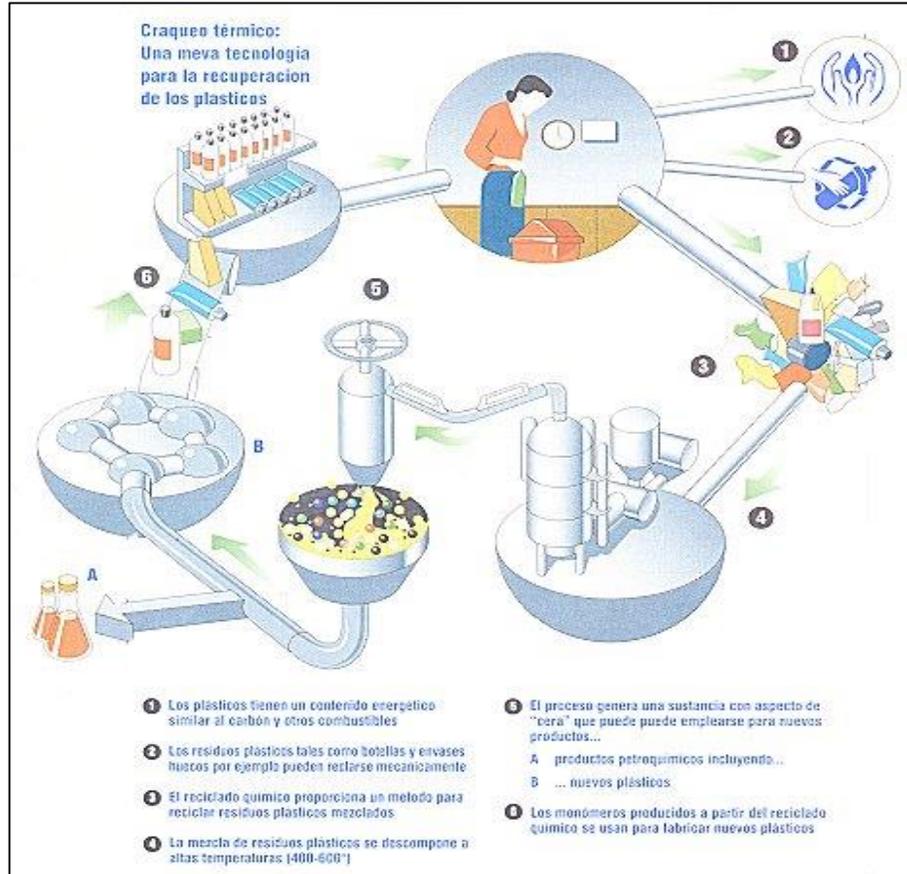
El reciclado cuaternario consiste en la incineración para recuperar energía, actualmente es un método polemizado debido a los problemas ambientales que este conlleva.

⁸ Ibíd, CONESA FERRER Juan Antonio, p 15

⁹ CISAN. Consejo para la información sobre seguridad de alimentos y nutrición. Los plásticos biodegradables en la industria alimentaria. En: http://cisan.org.ar/adjuntos/20110210125752_.pdf, p 1

¹⁰ ARANDES José M, BILBAO Javier, LOPEZ Danilo. Reciclado de residuos plásticos. En <http://www.ehu.eus/reviberpol/pdf/MAR04/Danilo2004.pdf>, p 31

Figura 2. Reciclaje químico de plásticos.



Fuente: LINAZISORO Ibon. El reciclado químico, otra alternativa menos conocida. En: <http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/5628-El-reciclado-quimico-otra-alternativa-menos-conocida.html>

1.3 RECICLAJE QUIMICO DE RESIDUOS PLASTICOS (PIROLISIS)

El reciclaje químico de plásticos hace referencia a todos los procesos que transforman materiales plásticos en moléculas más pequeñas, habitualmente líquidas o gases, que pueden ser usados como materias primas de otros procesos petroquímicos, ya sea para producir un compuesto diferente o plástico nuevamente. Se denomina reciclado químico pues se produce un cambio en la estructura química del polímero y los productos son útiles como combustibles.

El reciclado químico ha centrado su atención en la pirolisis, especialmente la pirolisis térmica y la pirolisis catalítica, como método para obtener diversas fracciones de combustible a partir de los residuos plásticos.

La pirolisis es una posibilidad de tratamiento además de la combustión o incineración, en las que de una forma u otra se aprovecha el contenido energético

de los residuos plásticos en general¹¹. Los plásticos están compuestos por largas cadenas poliméricas que, por acción de la temperatura, se descomponen y se obtienen compuestos de cadena más corta, estos suelen ser líquidos y gases; los plásticos, al ser sustancias de alto peso molecular no pueden ser purificados mediante procesos como la destilación, extracción o cristalización, solamente pueden ser aprovechados mediante la ruptura de macromoléculas en fragmentos más pequeños.

La pirolisis rompe las macromoléculas para formar moléculas más pequeñas, además se puede usar para convertir mezclas de residuos plásticos en combustibles y derivados, con los que se puede generar energía limpia. Los compuestos a base de carbono contenidos en el residuo se descomponen dando origen a una mezcla de gases, hidrocarburos condensables y un residuo carbonoso o char (coque).¹²

Los tres principales componentes que resultan de la pirolisis son:

- La corriente de gas compuesta básicamente de hidrogeno, metano, monóxido y dióxido de carbono, entre otros gases, dependiendo de las características orgánicas del material que es pirolizado y las condiciones de operación.
- La fracción condensable, líquida a temperatura ambiente, consistente en alquitranes o aceite con agentes químicos tales como ácido acético, acetona y metanol.
- Un coque o char residual (carbono) mezclado con el material inerte que entra al proceso.

A medida que aumenta la temperatura del proceso, la proporción de gases es mayor en relación con la fase sólida (char), no obstante, a medida que aumenta la temperatura se van volatilizandocompuestos que, mezclados con el gas de síntesis, provocaran una contaminación que obligara a una depuración, en función de la clase de aplicación a la que se haya destinado.

Solamente se puede obtener combustible líquido con la pirolisis de termoplásticos como PE, PP y PS, la adición de termoestables, madera y papel a la alimentación lleva a la formación de sustancias de carbono indeseadas y disminuye el rendimiento en el producto¹³. Dependiendo de la composición en los residuos plásticos, el combustible líquido resultante puede tener trazas de otros compuestos tales como aminas, alcoholes, ceras y algunas sustancias inorgánicas, la

¹¹ CASTELLS Elías, VELO Enric. La pirólisis. España: Ediciones Díaz de Santos, 2012. Febrero 13, 2016. ProQuest ebrary. P 479

¹² Ibíd, CASTELLS Elías, VELO Enric., p 494

¹³ UNEP. Converting Waste Plastics into a Resource: Compendium of technologies. Osaka, Japón. P 15. 2009

contaminación inesperada y altos contenidos de agua pueden reducir el rendimiento del producto y afectar la vida útil de los reactores de pirólisis.

La pirólisis se puede llevar a cabo a varios niveles de temperatura, tiempos de reacción, presiones, presencia o ausencia de gases o líquidos reactivos y catalizadores. La temperatura puede ser baja (<400°C), media (400 – 600 °C) o alta (>600°C). La presión es generalmente atmosférica. En la **figura 3** se muestra el esquema de un proceso de pirólisis.

En su sentido más estricto, la pirólisis debe realizarse en ausencia total de oxígeno, sin embargo, actualmente se utiliza este término en un sentido más amplio, para describir los cambios químicos provocados por la acción del calor, incluso con aire y otros aditivos.¹⁴ Existen dos tipos principales de pirólisis: pirólisis térmica y pirólisis catalítica.

La pirólisis térmica, involucra la degradación de materiales poliméricos al calentarlos; la pirólisis catalítica corresponde al mismo proceso, pero un catalizador adecuado es utilizado para realizar la reacción de craqueo (pirólisis).

Figura 3. Esquema de un proceso de pirólisis.



Fuente: CONESA FERRER Juan Antonio, Estudio de la pirólisis de residuos plásticos de polietileno y neumáticos usados. Universidad de Alicante. Departamento de Ingeniería Química. Alicante, España. Enero de 1996

¹⁴ CONESA FERRER Juan Antonio. Estudio de la pirólisis de residuos plásticos de polietileno y neumáticos usados. Universidad de Alicante. Departamento de Ingeniería Química. Alicante, España. Enero de 1996, p 38.

1.3.1 Pirolisis térmica. La pirolisis térmica es un proceso endotérmico de alta energía que requiere temperaturas de por lo menos 350 a 650 °C, dependiendo del polímero a degradar. En algunos procesos se requieren temperaturas de hasta 900 °C para alcanzar rendimientos de productos aceptables. Los estudios realizados en craqueo térmico se han centrado principalmente en el polietileno, Poliestireno y polipropileno tanto virgen como de residuos.

La descomposición térmica de polímeros (olefinas) conlleva a la formación de hidrocarburos con pesos moleculares más altos y char o coque, que se pueden presentar en diferentes cantidades según el material:

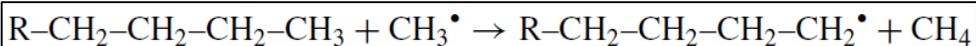
Figura 4. Descomposición de polímeros.



Fuente: KAMINSKY Walter, Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics: converting waste plastics into diesel and other fuels. West Sussex UK, 2006

El craqueo térmico es una reacción de cadena con radicales libres (un radical libre es un átomo o grupo de átomos con un electrón libre). Los radicales libres reaccionan con los hidrocarburos obtenidos, produciendo nuevos hidrocarburos y nuevos radicales libres¹⁵:

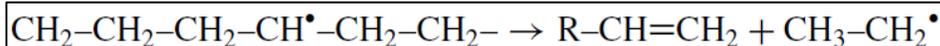
Figura 5. Formación de radicales libres



Fuente: KAMINSKY Walter, Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics: converting waste plastics into diesel and other fuels. West Sussex UK, 2006

Los radicales libres se pueden descomponer dando lugar a olefinas y nuevos radicales¹⁶:

Figura 6. Formación de nuevos radicales.



Fuente: KAMINSKY Walter, Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics: converting waste plastics into diesel and other fuels. West Sussex UK, 2006

Buekens¹⁷ propone 4 tipos de reacción de pirolisis, pero para el caso del PE, PP y PS, solo dos tipos de mecanismos son aplicables, a saber:

1. Ruptura de final de cadena, la cual produce monómeros principalmente.

¹⁵ KAMINSKY Walter, SCHEIRS John. Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics: converting waste plastics into diesel and other fuels. West Sussex UK, 2006, p 114

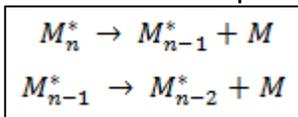
¹⁶ Ibid, KAMINSKY Walter, SCHEIRS John, p 114

¹⁷ BUEKENS Alfons G. Technical methods in plastics pyrolysis. Department of chemical engineering and Industrial Chemistry. Brussels, Belgium. 1998, p 64

2. Ruptura de cadena aleatoria, la cual rompe la cadena en fragmentos de diferentes tamaños.

La vía de corte de fin de cadena parte en un extremo de la cadena del polímero y sucesivamente libera unidades del monómero, disminuyendo el peso molecular del polímero lentamente y liberando gran cantidad de monómero; este tipo de ruta de degradación también se conoce como reacción de despolimerización y se representa de la siguiente forma:

Figura 7. Reacción de despolimerización.



Fuente: CONESA FERRER Juan Antonio, Estudio de la pirolisis de residuos plásticos de polietileno y neumáticos usados. Universidad de Alicante. Departamento de Ingeniería Química. Alicante, España. Enero de 1996

La reacción de corte aleatorio ocurre en un sitio al azar a lo largo de la cadena del polímero, en este caso se degrada para generar fragmentos de menor peso molecular y prácticamente no se liberan monómeros. En diversos estudios se ha mostrado que el corte aleatorio es la principal vía de degradación en la pirolisis térmica de varios polímeros, en particular poliolefinas tales como PE y PP¹⁸.

Las reacciones lentas a bajas temperaturas maximizan el rendimiento de productos sólidos. Cambiando la temperatura, la presión y el tiempo de residencia se modifican sustancialmente las proporciones de gases, líquidos y sólidos. Altas velocidades de calentamiento (hasta de 1000 K/min), minimizan la formación de char y favorecen la condensación de la fase líquida por encima del craqueo para la producción de gases.

Los productos obtenidos se pueden usar como combustibles, petroquímicos y monómeros; como regla, tanto en la fracción líquida como en la gaseosa, hay una mezcla de numerosos componentes mientras que en el char se pueden encontrar cenizas y pigmentos.

Las resinas poliolefinicas contienen solo carbono e hidrogeno y algunos aditivos como antioxidantes y estabilizadores UV, la presencia de hetero-elementos, como cloratos y bromatos es indeseable, ya que estos elementos se distribuyen a través

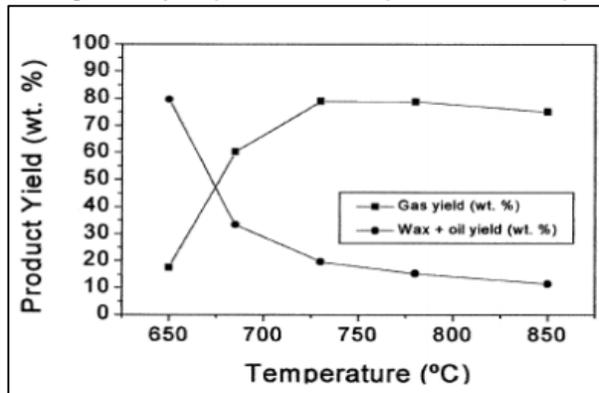
¹⁸ CONESA FERRER Juan Antonio, Estudio de la pirolisis de residuos plásticos de polietileno y neumáticos usados. Universidad de Alicante. Departamento de Ingeniería Química. Alicante, España. Enero de 1996., p 37

de todos los productos obtenidos, reduciendo su potencial comercial y el valor de cada uno de ellos.¹⁹

1.3.1.1 Temperatura. La temperatura es la variable de operación más importante, ya que determina tanto la velocidad de descomposición térmica como la estabilidad del alimento y los productos obtenidos. Temperaturas altas (>600°C) favorecen la producción de moléculas gaseosas simples, esto debido a que un aumento en la temperatura introduce el efecto de la degradación térmica lo que aumenta el rango de productos obtenidos y acelera las reacciones de craqueo sobre la superficie de los catalizadores lo que da origen a una mayor cantidad de gases y también reacciones de crecimiento de cadena y descomposición²⁰, mientras que bajas temperaturas (<400°C) conllevan a productos líquidos más viscosos, mayores velocidades de descomposición, mayor tendencia a la formación de coque y mayor cantidad de productos secundarios.²¹

Para mezclas de plásticos a altas temperaturas, se favorece la producción de gases y productos líquidos con altos pesos moleculares²², sin embargo, en algunos casos el incremento en la producción de gases a temperaturas mayores a 650 °C puede disminuir la proporción de productos líquidos, como se observa en el **grafico 1**.

Gráfico 1. Proporción de gases y líquidos a temperaturas superiores a 650 °C.



Fuente: GAO Feng. Pyrolysis of Waste Plastics into Fuels. University of Canterbury. Nueva Zelanda. 2010

1.3.2 Pirolisis catalítica. En comparación con la pirolisis puramente térmica, la adición de catalizadores, reduce significativamente las temperaturas y tiempos de pirolisis e incrementa el rendimiento de productos gaseosos. El uso del catalizador

¹⁹ KAMINSKY Walter, SCHEIRS John, Op cit, p 7

²⁰ CONTRERAS CANTEROS Francisco Eduardo. Estudio de la pirolisis catalítica de polietileno en un reactor semi-batch. Universidad de Chile. Santiago de Chile, Chile. Enero de 2014, p 22

²¹ KAMINSKY Walter, SCHEIRS John. Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics: converting waste plastics into diesel and other fuels. West Sussex UK, 2006, p 10

²² GAO Feng. Pyrolysis of Waste Plastics into Fuels. University of Canterbury. Nueva Zelanda. 2010, p 15

busca la selectividad de los productos de máximo interés, ya sea como combustible o como materia prima en la industria petroquímica. Existen cuatro rutas de trabajo para la pirolisis catalítica:

- Directa, en la que los plásticos y el catalizador son fundidos en el mismo reactor.
- Reformado en la línea de producto gaseoso de la pirolisis.
- Reformado del producto líquido de la pirolisis, en un segundo reactor catalítico.
- Craqueo catalítico de los plásticos disueltos.

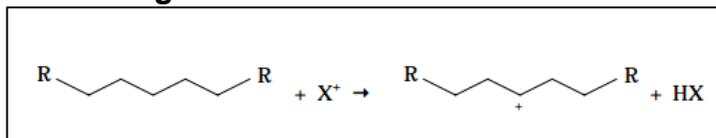
La finalidad de los catalizadores es reducir la velocidad de reacciones secundarias hacia productos no deseados (gases y alquitranes) y mejorar la selectividad de una reacción cambiando el rendimiento hacia la generación de líquido combustible. El proceso utiliza catalizadores de la familia de los aluminos-silicatos²³ como los obtenidos a partir de roca volcánica (riolita) o zeolitas, ya que son muy activos.

El mecanismo de reacción de la pirolisis catalítica de plásticos se describe de la siguiente manera:

- **Iniciación.** Tiene lugar en la superficie del catalizador. Las macromoléculas del polímero reaccionan en los sitios activos de la superficie externa de los cristales del catalizador debido a que presentan un tamaño demasiado grande como para penetrar en los canales del mismo²⁴. En este primer paso, pueden tener lugar dos reacciones: la abstracción de un hidruro de la molécula del polímero, como se indica en la **figura 8**, o la adición de un protón a los enlaces carbono-carbono de la molécula, como se muestra en la **figura 9**.

Esta reacción tiene lugar preferentemente sobre defectos de la cadena del polímero, como es el caso de los enlaces olefínicos.

Figura 8. Abstracción de hidruros.

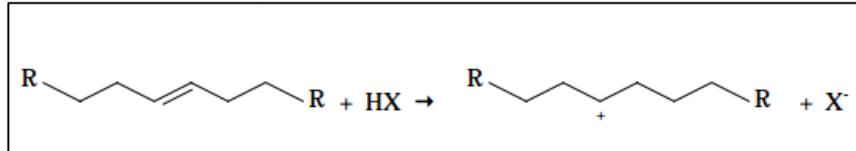


Fuente: HERNANDEZ FERREZ Maria del Remedio, Evaluación de la pirolisis térmica y catalítica de polietileno en lecho fluidizado como técnica de reciclado. Influencia de las variables sobre los productos generados. Universidad de Alicante. Alicante, España. Marzo de 2007

²³ EGIDO Sergio David. Procedimiento catalítico de pirolisis flash para la obtención de bio-oil o biofuel a partir de materias poliméricas carbonadas. Patent WO 2014041212 A1. Google Patents. Marzo 20 de 2014. Obtenido de: <http://www.google.com/patents/WO2014041212A1?cl=es>

²⁴ HERNANDEZ FERREZ Maria del Remedio. Evaluación de la pirolisis térmica y catalítica de polietileno en lecho fluidizado como técnica de reciclado. Influencia de las variables sobre los productos generados. Universidad de Alicante. Alicante, España. Marzo de 2007, p 97

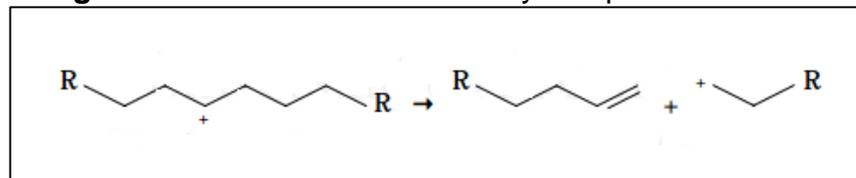
Figura 9. Adición de protones.



Fuente: HERNANDEZ FERREZ Maria del Remedio, Evaluación de la pirolisis térmica y catalítica de polietileno en lecho fluidizado como técnica de reciclado. Influencia de las variables sobre los productos generados. Universidad de Alicante. Alicante, España. Marzo de 2007.

Los iones generados de este modo pueden estabilizarse mediante reacciones de transferencia de hidrogeno, isomerización, etc. o bien, una ruptura en posición β respecto a la carga positiva, dando lugar a una olefina y un compuesto iónico así²⁵:

Figura 10. Obtención de olefinas y compuestos iónicos.



Fuente: FERNANDEZ FERREZ Maria del Remedio, Evaluación de la pirolisis térmica y catalítica de polietileno en lecho fluidizado como técnica de reciclado. Influencia de las variables sobre los productos generados. Universidad de Alicante. Alicante, España. Marzo de 2007

- **Propagación.** Los productos obtenidos de la rotura inicial reducen su longitud a través de ataques sucesivos por parte de los centros ácidos del catalizador o de cadenas iónicas, conduciendo a una cadena de menor tamaño. Estos fragmentos del polímero se difunden hacia el interior del catalizador y continúan reaccionando en los centros ácidos internos mediante reacciones secundarias, dando lugar a cadenas más ligeras que provocan la formación de una fracción líquida y una fracción gaseosa²⁶.

Las principales reacciones en la etapa de propagación del mecanismo catalítico son:

- **Isomerización.** Pueden producirse dos tipos de isomerizaciones durante la reacción: isomerización de carga o isomerización de un sustituyente a lo largo de la cadena. La isomerización de carga tiene lugar a través de la transferencia de átomos de hidrógeno, tendiendo a favorecer la formación de iones más estables:

²⁵ Ibid, HERNANDEZ FERREZ Maria del Remedio, p 98

²⁶ Ibid, HERNANDEZ FERREZ Maria del Remedio, p 99

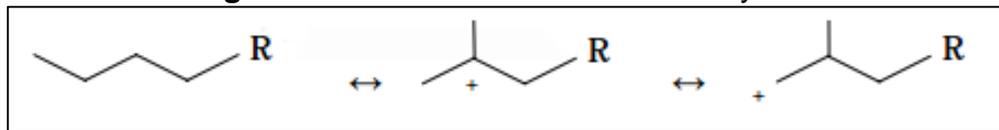
Figura 11. Isomerización de carga



Fuente: HERNANDEZ FERREZ María del Remedio, Evaluación de la pirólisis térmica y catalítica de polietileno en lecho fluidizado como técnica de reciclado. Influencia de las variables sobre los productos generados. Universidad de Alicante. Alicante, España. Marzo de 2007

Mientras que la isomerización de un sustituyente conduce a la generación de iones ramificados, así:

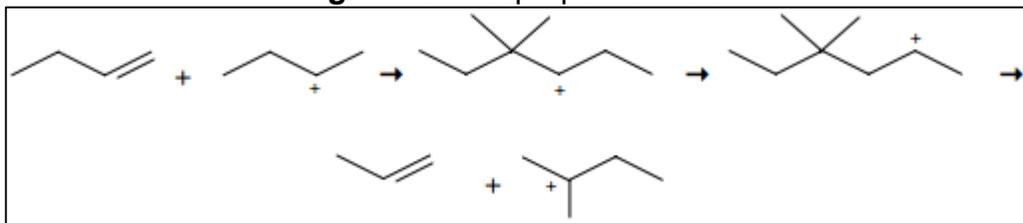
Figura 12. Isomerización de un sustituyente



Fuente: HERNANDEZ FERREZ María del Remedio, Evaluación de la pirólisis térmica y catalítica de polietileno en lecho fluidizado como técnica de reciclado. Influencia de las variables sobre los productos generados. Universidad de Alicante. Alicante, España. Marzo de 2007

- **Desproporción.** Supone la formación de un enlace carbono-carbono entre un carbocatión y una olefina, seguido de un reordenamiento de la molécula, dando lugar a otra olefina y a un nuevo carbocatión²⁷ así

Figura 13. Desproporción



Fuente: HERNANDEZ FERREZ María del Remedio, Evaluación de la pirólisis térmica y catalítica de polietileno en lecho fluidizado como técnica de reciclado. Influencia de las variables sobre los productos generados. Universidad de Alicante. Alicante, España. Marzo de 2007

La degradación catalítica de poliolefinas genera un subproducto sólido generalmente llamado coque, que contamina el catalizador y lo desactiva debido a que bloquea físicamente los poros del catalizador obstruyendo el paso de las moléculas del reactante hacia los sitios activos interiores.

1.3.2.1 Catalizador. Se han estudiado catalizadores heterogéneos y homogéneos para el craqueo catalítico de plásticos. Generalmente se prefieren los catalizadores heterogéneos debido a su facilidad de separación y recuperación del medio

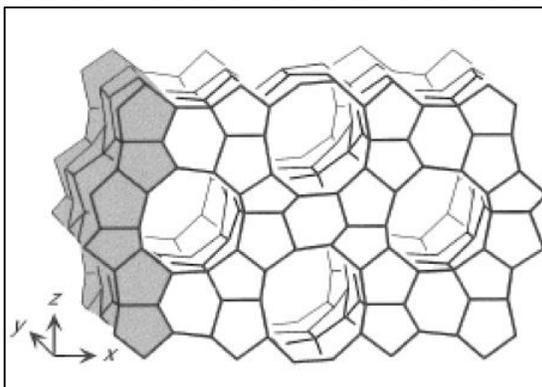
²⁷ Ibid, HERNANDEZ FERREZ María del Remedio, p 100

reactante. Entre los catalizadores heterogéneos se encuentran zeolitas, aluminosilicatos, sólidos ácidos y superácidos y óxidos básicos.

Los aluminosilicatos presentan estructuras cristalinas que forman poros uniformes de dimensiones moleculares. Los catalizadores ácidos como las zeolitas han resultado particularmente eficientes en las reacciones de degradación de compuestos poliolefínicos. Son sólidos porosos de origen natural o sintético compuestos principalmente por óxidos de aluminio y silicio en proporciones definidas, que presentan redes de alta cristalinidad con estructuras espaciales fijas. Tienen alta área y acidez superficial, por lo que son muy utilizados en procesos donde se requiera abstracción de hidruros, como es el caso de la degradación de polímeros²⁸.

En la **figura 14**²⁹ se muestra la estructura molecular de estos catalizadores.

Figura 14. Estructura molecular de catalizadores aluminosilicatos.



Fuente: GAO Feng, Pyrolysis of Waste Plastics into Fuels. University of Canterbury. Nueva Zelanda. 2010 p 23.

La apertura y tamaño del poro son factores claves para el efecto catalítico en la pirolisis de plásticos. El alto contenido de sílice en el catalizador lo hace apto para temperaturas altas y ciclos de regeneración, por lo que se prefieren catalizadores con una alta proporción en SiO₂ mayor al 60% en la degradación de poliolefinas.

La adición de catalizadores mejora la conversión reduciendo las temperaturas y tiempos de residencia en el proceso y permitiendo un mejor control sobre la distribución de los productos³⁰.

²⁸ CONTRERAS Francisco. Estudio de la pirolisis catalítica de polietileno en un reactor semi-batch. Universidad de Chile, Santiago de Chile. 2014, p 24

²⁹ GAO Feng. Pyrolysis of Waste Plastics into Fuels. University of Canterbury. Nueva Zelanda. 2010 p 23.

³⁰ PANDA Achyut. Thermolysis of waste plastic to liquid fuel. A suitable method for plastic waste management and manufacture of value added products -A world perspective. National Institute of Technology, Rourkela, India. Abril 16 de 2009, p 238

La zeolita ZSM-5 es el catalizador más estudiado en diferentes pirolisis de plásticos, sin embargo, las zeolitas son costosas y difíciles de conseguir; es de interés estudiar otro tipo de catalizadores, por lo que se propone el uso de catalizadores aluminosilicatos³¹.

1.4 PRODUCTOS DE LA PIROLISIS

Las poliolefinas, principalmente PE y PP, se descomponen en parafinas y olefinas, la distribución de pesos moleculares y las concentraciones de parafinas y olefinas disminuyen con el aumento en la temperatura y en el tiempo de reacción. El PS normalmente produce estireno y oligómeros, más que todo dímeros y trímeros; en las mezclas de PS y PE se obtienen productos más saturados ya que la descomposición del PE de cierta forma se ve acelerada por la presencia del PS.

Los subproductos en la pirolisis de plásticos se relacionan con la presencia de heteroátomos:

- Oxígeno en la atmósfera de la pirolisis conlleva a la formación de agua y otros productos oxigenados
- El cloro conlleva a la formación de HCl gaseoso, que puede resultar irritante y corrosivo
- El nitrógeno puede formar amoníaco, cianuro y posibles compuestos orgánicos, como nitrilos y aminas.

Además, se pueden dar subproductos por la presencia de aditivos:

- Los aditivos minerales que se encuentran comúnmente en la fracción de coque.
- Los aditivos orgánicos se pueden volatilizar o descomponer. Algunos residuos de PVC pueden contener más aditivos que resina.

³¹ GOBIN Karishma, MANOS George. Catalytic degradation of plastic waste to liquid fuel over commercial cracking catalysts: Effect of polymer to catalyst ratio/acidity content. University College London, Londres, UK. Enero 21 de 2015.

2. EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL ACEITE PIROLITICO PROVENIENTE DE LA PIROLISIS DE RESIDUOS PLÁSTICOS

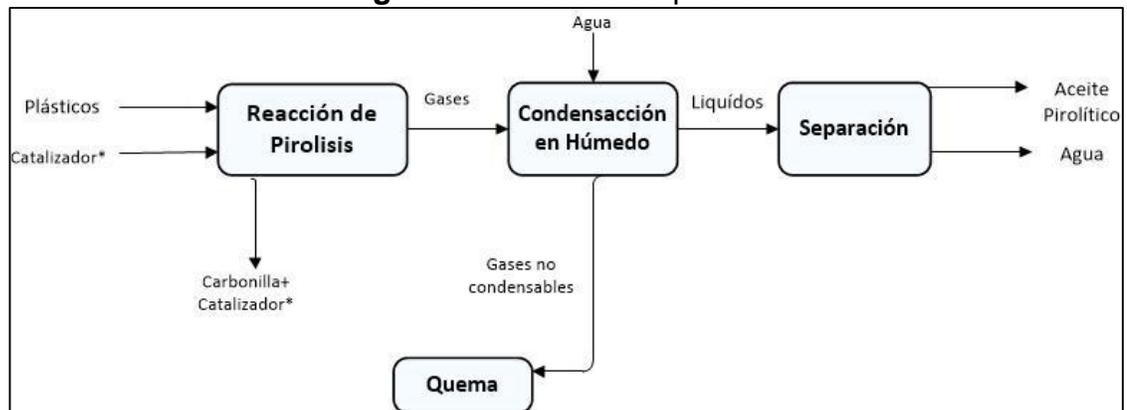
En el presente capítulo se describen los recursos y procedimientos necesarios para el desarrollo de la pirolisis de residuos plásticos. La evaluación del proceso de pirolisis se realiza mediante un diseño de experimentos factorial, donde se determinan las condiciones de operación teniendo en cuenta las variables independientes que afectan el rendimiento del aceite pirolítico.

2.1 PIROLISIS DE RESIDUOS PLASTICOS DE INDUSTRIAS DE ALIMENTOS

La transformación de plásticos de industrias de alimentos en aceite pirolítico (AP), se realiza mediante un proceso de pirolisis lenta, en sistema Batch donde no se suministran corrientes de oxígeno ni de ningún otro tipo de atmósfera al reactor.

El diagrama de la **figura 15** muestra los componentes generales del proceso, donde se identifican entradas y salidas para un balance global.

Figura 15. Proceso de pirolisis.



* Dependiendo de la ausencia o presencia del catalizador

El balance de masa global correspondiente a la **figura 15** se define en la siguiente ecuación:

Ecuación 1. Balance de masa para el proceso de pirolisis

Donde:

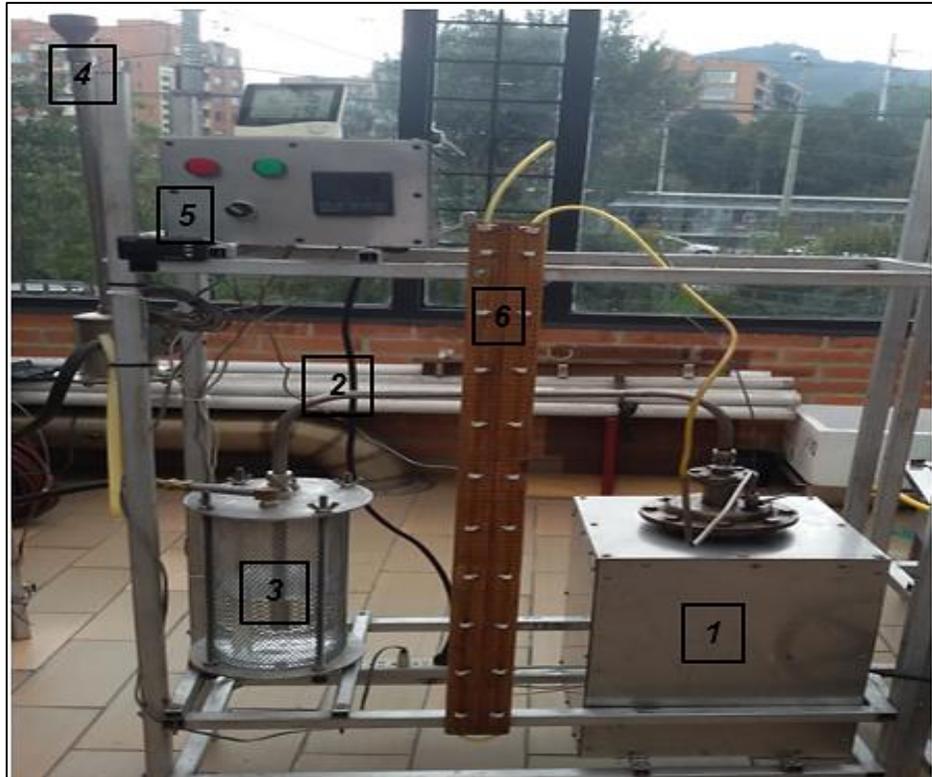
$$M_p + M_{cat}^* + M_A = M_{cr} + M_{AP} + M_{A2} + M_g$$

Entradas		Salidas	
M_p :	Masa de plástico contaminado al reactor	M_{cr} :	Masa de carbonilla en el reactor+ masa catalizador*
M_{cat}^* :	Masa de catalizador al reactor	M_{AP} :	Masa de aceite pirolítico
M_A :	Masa agua	M_g :	Masa de gases (calculado)
		M_{A2} :	Masa agua salida

2.2 EQUIPOS

Los equipos para la evaluación del proceso de pirolisis son suministrados por la empresa Dr. Calderón Laboratorios Asistencia Técnica Agrícola ubicados en la AK 20 N 87- 81 de Bogotá. Todas las pruebas son realizadas a nivel laboratorio. En la **figura 16**, se muestra el esquema completo de la instalación donde se lleva a cabo la pirolisis.

Figura 16. Instalación del equipo de pirolisis



- 1)Reactor Batch 2) Conector de gases 3) Condensador en Húmedo 4) Tea 5) Controladores de temperatura 6)Medidor de presión

A continuación, se muestran las especificaciones y la descripción detallada de cada uno de los equipos.

2.2.1 Reactor Batch. El reactor consta de un cilindro vertical construido en acero inoxidable, con capacidad de 3 L, rodeado por una resistencia eléctrica en el fondo y distribuida a lo largo del reactor, activada por un controlador PID.

Posee una cobertura de fibra de lana de cerámica. En la **tabla 1** se encuentran las dimensiones del reactor.

Tabla 1. Dimensiones del reactor batch

Reactor	Descripción	Medida (mm)
	Diámetro Interno	173
	Diámetro Externo	230
	Profundidad	382
Cobertura 	Altura	460
	Ancho	314

2.2.2 Conector de gases. El reactor de pirolisis se conecta al condensador en húmedo por la parte superior mediante un tubo de acero inoxidable, que permite el desplazamiento de los gases.

En la **tabla 2**, se muestran las dimensiones del conector.

Tabla 2. Dimensiones del tubo conector.

Tubo conector	Descripción	Medida (mm)
	Diámetro Interno	40
	Diámetro Externo	49,5
	Largo	560

2.2.3 Condensador en húmedo. El condensador en vidrio, cuyas medidas se indican en la **tabla 3**, recibe los gases del reactor de pirolisis en 2500 ml de agua que se encuentra a temperatura ambiente, aproximadamente a 20°C, permitiendo la condensación en húmedo del aceite pirolítico, extraído por decantación.

Cuenta con una conexión a la tea para los gases no condensables, y una malla protectora alrededor del vidrio.

Tabla 3. Dimensiones del condensador en húmedo

Condensador en vidrio	Descripción	Medida (mm)
	Diámetro Interno	140
	Diámetro Externo	155
	Profundidad	350

2.2.4 Quemador de gases (tea). En la parte exterior del condensador de vidrio, se encuentra una conexión hacia un quemador de gases que recibe los gases no condensables en el proceso y los expulsa al exterior del sistema.

En la **tabla 4** se muestran las dimensiones del quemador.

Tabla 4. Dimensiones del quemador de gases

Quemador de gases	Descripción	Medida (mm)
	Diámetro	59,95
	Altura quemador	60,54
	Largo	224
	Diámetro	89,15
	Altura cilindro	125

2.2.5 Controladores de temperatura. El equipo cuenta con dos controladores de temperatura conectados al reactor por medio de resistencias eléctricas.

El controlador en la parte superior indica la temperatura de entrada del proceso, mientras que el controlador en la parte inferior indica la temperatura que alcanzan los vapores en la salida hacia el condensador a lo largo del proceso.

2.2.6 Medidor de presión. El equipo hace uso de un manómetro de tubo en U para medir la presión en el reactor en milímetros de agua (mm.c.a).

2.3 MATERIA PRIMA

Los residuos plásticos tratados en la presente investigación se componen principalmente de empaques fabricados con diversos polímeros para la distribución de nueces, horneados, confituras, y demás, que se generan por deficiencias en los procesos de empaqueo de los alimentos y deben desecharse, por lo que se tiene un volumen alto de residuos que no son aptos para reciclaje primario y secundario por los restos de materia orgánica que pueden contener, pero que si pueden ser aprovechados para procesos de reciclaje terciario (reciclaje químico) como la pirolisis para la obtención de combustible.

La estructura común de los empaques que se usaron en el proceso de pirolisis³² se muestra en las **tablas 5 y 6**:

Tabla 5. Estructura multicapa en los empaques de alimentos usados en el proceso.

Structure	Layers (%)	Gauge (μm)
cPP/PP/cPP	10 80 10	30–60
EVA/PP	20 80	30–60
HDPE/EAA/PA/EAA	70 10 10 10	30–70
LLDPE/PP/LLDPE	10 80 10	30–60
LLDPE/Tie/PA/EVOH/PA	30 10 20 10 20	100–160

Structure	Layers (%)	Gauge (μm)
o-PP//LDPE//o-PP	20 60 20	40–60
o-PP//LDPE//Foil//LDPE	10 20 5 65	40–60

Fuente: EBNESAJJAD Sina. Plastic films in food packaging Materials, technology and applications. Chadds Ford, PA, USA. 2013

Tabla 6. Estructura de empaques de frituras

Structure	Layers (%)			Gauge (μm)
Potato chips (OTR 2.0, MVTR 0.02)				
o-PP//met o-PP	50		50	20–60
o-PP//LDPE//met o-PP	25	50	25	20–60
EVA/HDPE//met o-PP	15	70	15	40–80
Tortilla and corn chips (OTR <2.0, MVTR <0.35)				
o-PP//LDPE//o-PP	25	50	25	20–60
o-PP//PVDC//o-PP	50	//p 5	45	20–60

Fuente: EBNESAJJAD Sina. Plastic films in food packaging Materials, technology and applications. Chadds Ford, PA, USA. 2013

Los residuos, son tratados generalmente mediante incineración o llevados a rellenos sanitarios, por lo que se pierde la utilidad que pueden generar; por esta razón, se trabajan en las condiciones recibidas con el fin de no añadir etapas adicionales en el proceso, como trituración o lavado, teniendo en cuenta que el

³² EBNESAJJAD Sina. Plastic films in food packaging Materials, technology and applications. Chadds Ford, PA, USA. 2013, p 44

objetivo del proyecto es primero, tratar con los plásticos a condiciones reales y no simuladas con plásticos vírgenes como en estudios previos, y segundo, lograr un proceso de tratamiento de residuos rentable y eficiente.

2.3.1 Composición de la materia prima. El proceso experimental de pirolisis de plásticos se realiza seleccionando una cantidad determinada de materia prima, para evitar posibles variaciones en la composición de la entrada al reactor.

El tamaño de la muestra se determina mediante la **ecuación 2³³** para poblaciones infinitas.

Ecuación 2.Tamaño de muestra para poblaciones infinitas.

$$n = \frac{Z^2 PQ}{E^2}$$

Fuente: MARTINEZ BENCARDINO Ciro. Estadística y muestreo. Décimo tercera edición. 1997

Siendo:

n: El tamaño de la muestra

Z: Valor dependiente del nivel de confianza fijado por el investigador

E²: Error de muestreo (margen de error que el investigador fija)

PQ: Grado de variabilidad de la muestra, en caso de desconocerse P: 0,5 y Q: 1- P

Para obtener una muestra representativa de la población se establece un 95% de probabilidad a favor, es decir una confianza del 0,95 con valor de Z: 1,96, de acuerdo a las tablas de distribución de Gauss.

Teniendo en cuenta la variedad de la población, se admite un 10% del error en el muestreo. En la **ecuación 3**, se muestra el tamaño de muestra estimado para la población:

Ecuación 3. Tamaño de la muestra a estudiar.

$$n = \frac{1.96^2 * 0.5 * 0.5}{0.10^2} = 96 \text{ kg}$$

El lote de trabajo se forma seleccionando muestras de manera aleatoria y homogeneizándolas. Considerando la capacidad del reactor batch, se asignan 500 g de material para cada montaje en el equipo y a partir de esta cantidad se hacen las caracterizaciones.

³³ MARTINEZ BENCARDINO Ciro. Estadística y muestreo. Décimo tercera edición. 1997 p 305

Los residuos plásticos se agrupan según su código de clasificación y según la presencia de laminación así:

Gráfico 2. Clasificación de la materia prima



De acuerdo al **gráfico 2**, la mayor cantidad de plástico encontrada es plástico laminado; el número de reciclaje da a conocer el tipo de plástico del que está compuesto principalmente el empaque: el grupo 7 (otros), que representa el 46% del total de la muestra, identifica cualquier tipo de plástico que no cumpla con las características de los demás grupos como las resinas fenólicas, poliuretano, resinas amídicas, entre otros. El grupo 5 (23% del total de la muestra) identifica al polipropileno; el porcentaje restante representa los empaques plásticos que no pudieron ser identificados.

2.3.2 Humedad. El porcentaje de humedad de la muestra viene determinado principalmente por los componentes del alimento. Esta característica se analiza en base a la norma NTC 529³⁴.

El porcentaje de humedad (w) se calcula mediante la **ecuación 4**, donde:

m_1 : masa en gramos de la porción de ensayo.

m_0 : masa en gramos de la porción de ensayo después del secado

Ecuación 4. Cálculo del porcentaje de humedad

$$w = 1 - \frac{m_1}{m_0} * 100\%$$

Fuente: NTC 529. Norma Técnica Colombiana. Cereales y Productos Cereales. Determinación del contenido de Humedad. Bogotá, Colombia. Noviembre 30 de 2010

El contenido de humedad encontrado en la muestra es del 3% en peso, lo que indica que la mayor parte de la materia orgánica encontrada en los residuos es sólida. Al

³⁴ NTC 529. Norma Técnica Colombiana. Cereales y Productos Cereales. Determinación del contenido de Humedad, p 1. Bogotá, Colombia. Noviembre 30 de 2010.

inicio de la pirolisis, este porcentaje será el primero en pasar al condensador como vapor de agua.

2.3.3 Porcentaje de cenizas. La prueba de porcentaje de cenizas se hace con el objetivo de conocer el contenido de minerales en el alimento, es decir, en la contaminación presente en los residuos plásticos.

En general, las cenizas suponen menos del 5% de la materia seca de los alimentos, esto se remite al residuo inorgánico que queda tras eliminar totalmente los compuestos orgánicos existentes en la muestra³⁵.

El contenido de cenizas se calcula con la **ecuación 5**:

Ecuación 5. Contenido de cenizas

$$\text{Cenizas (\%)} = \frac{(B - C)}{(A - C)} \times 100$$

Fuente: NTC 282. Norma Técnica Colombiana. Industrias Alimentarias. Harinas de trigo. Métodos de ensayo. Bogotá, Colombia. Noviembre 7 de 2002

Donde:

A: Masa del crisol más muestra, en gramos

B: Masa del crisol más ceniza, en gramos

C: Masa del crisol vacío, en gramos

Se toman 3 muestras de 100 g y se obtiene un porcentaje de cenizas promedio del 10,30% en peso; este resultado es superior al esperado, debido a la presencia de plástico metalizado, que queda en el crisol. Parte de los residuos plásticos metalizados se pueden ver en la carbonilla de la pirolisis.

2.3.4 Prueba de Combustión. La prueba de combustión³⁶ se realiza para identificar los polímeros presentes en los residuos a tratar. El principio de la prueba, se basa en el comportamiento de cada tipo de plástico en contacto con la llama.

Se toman 3 muestras de 100 g de residuos plásticos para realizar la prueba de combustión; en la **figura 17** se observa el color de la llama generado por el plástico y sus características durante la combustión.

³⁵ NTC 282. Norma Técnica Colombiana. Industrias Alimentarias. Harinas de trigo. Métodos de ensayo. Bogotá, Colombia. Noviembre 7 de 2002, p 5

³⁶ RODENAS PASTOR Mercedes. Los materiales plásticos en tecnología industrial I. Prácticas de identificación. Diciembre de 2008. Tomado de https://docs.google.com/document/d/1HcvK9slks_S3_KVg2ZRXXALjafE7CVGaWQYmpVWh2i0/edit?pref=2&pli=1

Figura 17. Color de la llama generado por los residuos plásticos.



Las observaciones se registran en la **tabla 7**:

Tabla 7. Resultados de la prueba de combustión.

Descripción	Observación
Cantidad y Color de Humo	No abundante, Gris
Color llama	Amarillo
Combustibilidad	Continúa ardiendo
Tipo de Fusión	No gotea

A partir de las observaciones, se concluye que hay mayor presencia de PS y PP³⁷, lo cual se confirma con el código de referencia que identifica a cada uno de los plásticos presentes en los residuos³⁸.

2.4 DISEÑO EXPERIMENTAL

Para el diseño experimental, se tiene en cuenta la fracción líquida obtenida en el proceso de pirólisis, es decir, el aceite pirolítico (AP), ya que es el producto de interés.

El rendimiento de la fracción líquida respecto al material pirolizado, está definido por la **ecuación 6** según Kumagai S.³⁹ y se determina como la variable de respuesta al diseño de experimentos.

³⁷ De acuerdo a las observaciones hechas en la tabla adjunta en el *Anexo 2* para cada tipo de plástico

³⁸ De acuerdo a la clasificación establecida por la norma ASTM D7611, adjunta en el *Anexo 1*

³⁹ KUMAGAI Shogo, HASEGAWA Itaru. Thermal decomposition of individual and mixed plastics in the presence of CaO. Tohoku University, Tokio, Japan. Abril 20 de 2015, p 5.

Ecuación 6. Rendimiento del producto en función del material alimentado.

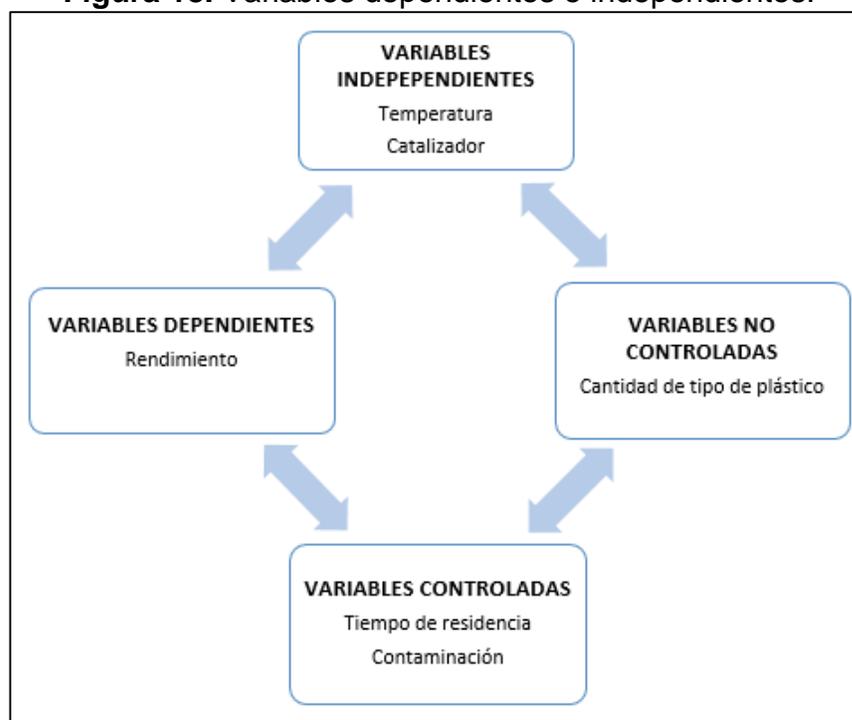
$$\text{Weight fraction [wt\%]} = \frac{\text{Product weight [g]}}{\text{Sample weight [g]}} \times 100 \text{ [wt\%]}$$

Fuente: KUMAGAI Shogo, HASEGAWA Itaru. Thermal decomposition of individual and mixed plastics in the presence of CaO. Tohoku University, Tokio, Japan. Abril 20 de 2015

2.4.1 Variables. Para determinar el rendimiento del producto de interés, se establecen factores que tienen influencia directa e indirecta en el resultado final, de esta forma, se definen las variables dependientes e independientes.

En la **figura 18** se muestran las variables consideradas para la presente investigación.

Figura 18. Variables dependientes e independientes.



2.4.1.1 Variables independientes

- **Temperatura.** Se definen 3 niveles de temperatura para el diseño de experimentos:
 1. 550 °C
 2. 600 °C
 3. 650 °C

Estos niveles se definen bajo los siguientes criterios:

- A una temperatura menor a 550°C no se lograría la descomposición de la materia orgánica⁴⁰ presente en los residuos.
- 600 °C es la temperatura establecida para la descomposición térmica de poliolefinas (PE, PP y PS) en estudios realizados previamente⁴¹.
- Temperaturas superiores a 650 °C generan una mayor distribución de productos gaseosos.
- **Catalizador.** Como objeto de la presente investigación, se usa riolita volcánica, un mineral aluminio-silicato, cuyo grado de acidez es muy cercano al de la zeolita ZSM-5 (SiO₂>66%)⁴². El catalizador es suministrado por la empresa Dr. Calderón Laboratorios y sus especificaciones son de confidencialidad de la empresa. Para determinar la cantidad de catalizador que se tendrá en cuenta para el diseño de experimentos, se realiza una pre-experimentación en la que se utiliza el 5% y el 10% en peso de catalizador respecto a la cantidad de material ingresado (25 g y 50 g de catalizador por cada 500 g, respectivamente), como se indica en el **gráfico 3**.

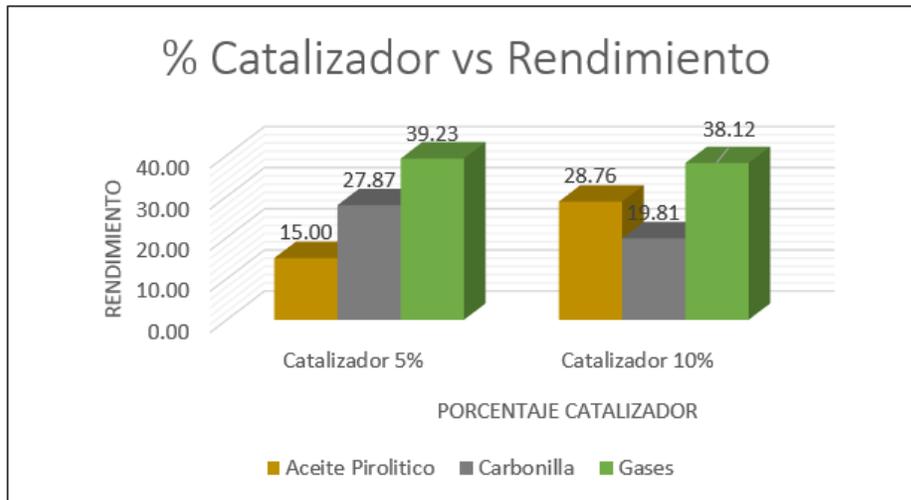
De acuerdo a los resultados obtenidos en la pre-experimentación, para la experimentación se definen dos factores para la presencia de catalizador: 0%, lo que indica una pirolisis térmica y 10% en peso de catalizador, es decir, 50 g de catalizador por cada 500 g de residuos plásticos, debido a que con esta cantidad se obtienen mejores rendimientos para el aceite pirolítico (28.76% con 10% de catalizador frente a 15.00% con 5% de catalizador), menor cantidad de residuos sólidos (carbonilla), menor cantidad de agua a la salida del proceso y una distribución de gases muy similar.

⁴⁰ ADRADOS A, LOPEZ A, TORES A. Pyrolysis of plastic packaging waste: A comparison of plastic residuals from material recovery facilities with simulated plastic waste. Escuela de Ingeniería de Bilbao, Bilbao, España. Diciembre 20 de 2010.

⁴¹ GAO Feng., Op Cit., p 50

⁴² MONTERO J. Minerales y rocas. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 2007., p 77. En: <http://www.docentes.unal.edu.co/jmmonteroo/docs/4-5%20Minerales%20-Rocas.pdf>

Gráfico 3. Rendimiento respecto a la cantidad de catalizador utilizado.



2.4.1.2 Variables controladas

- **Tiempo de residencia.** La formación de monómeros se da en tiempos de residencia reducidos (10 – 60 min)⁴³, los productos termodinámicamente más estables (CH₂, CH₄, aromáticos) se dan en tiempos de residencia largos⁴⁴. En un largo tiempo de residencia se favorece la producción de la carbonilla y el alquitrán (producto líquido). Se realizan pruebas pre-experimentales para definir el tiempo adecuado en la pirolisis de los residuos plásticos, manteniendo como parámetro determinante el rendimiento del aceite pirolítico frente a la cantidad de materia prima alimentada al proceso.

En un tiempo de residencia menor a 4 horas, el plástico no logra descomponerse completamente y en la fracción sólida obtenida se puede ver parte de los residuos plásticos alimentados. Cuando el proceso alcanza las 5 horas, se observa un descenso en la temperatura de salida de los gases, por lo que se asume que el plástico fue totalmente consumido y no hay presencia de este en la carbonilla, entonces se considera innecesario llevar a cabo el proceso en una mayor cantidad de horas.

De acuerdo al **gráfico 4** que relaciona el rendimiento del producto respecto al tiempo de residencia, se define un tiempo de 4 horas para la experimentación ya que en este tiempo se dan rendimientos altos para el aceite pirolítico y la fracción gaseosa de los productos finales.

⁴³ GAO Feng, Op Cit., p 21

⁴⁴ KAMINSKY Walter, SCHEIRS John. Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics: converting waste plastics into diesel and other fuels. West Sussex UK, 2006, p 9

En el **gráfico 5**, que relaciona el tiempo de residencia con el rendimiento del aceite pirolítico, se observa que en tiempos de residencia altos se dan mayores rendimientos para el producto de interés.

Gráfico 4. Rendimiento del producto respecto al tiempo de residencia.

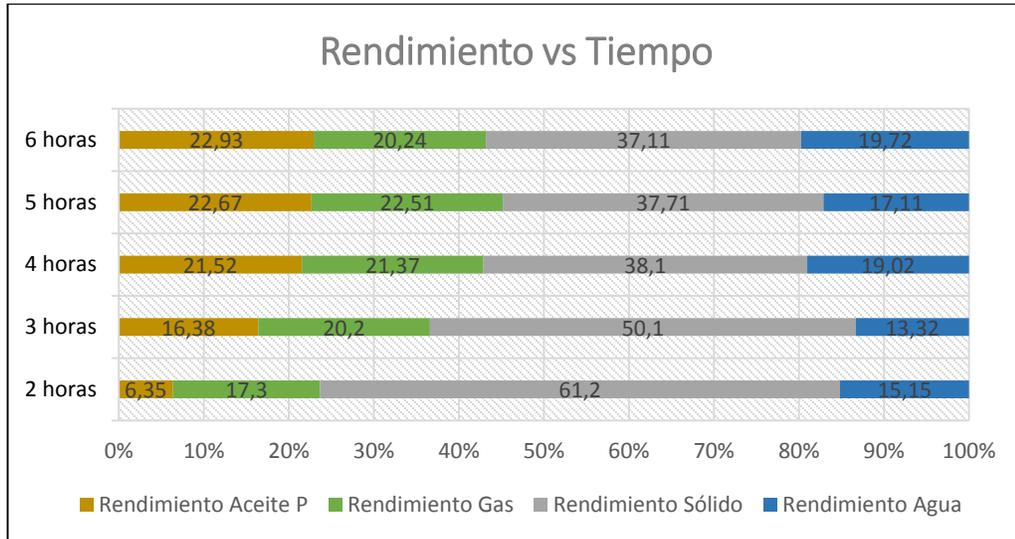
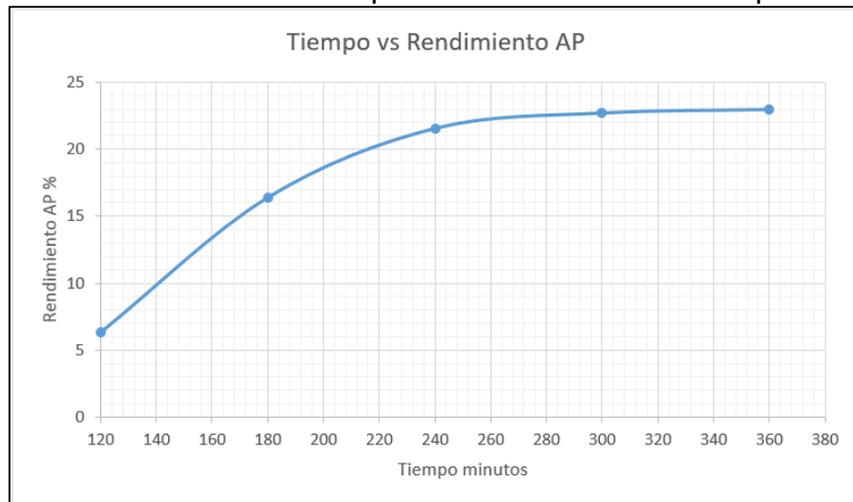


Gráfico 5. Rendimiento del aceite pirolítico en relación al tiempo de residencia



- **Contaminación.** Del lote de trabajo se toman cinco muestras al azar para identificar sus componentes; en las muestras se encuentran residuos de alimentos denominados como “contaminación” para efectos del proyecto. Los plásticos se sacuden en rejillas de acero inoxidable de 4x3 cm, y se fija una proporción de alrededor del 5% en contaminación por cada 500 gramos de plástico de acuerdo a los resultados de la **tabla 8**.

Tabla 8. Proporción de contaminación en cada 500 g de plástico.

Muestra	Peso Contaminación
1	22
2	22
3	26
4	23
5	29

Haciendo uso de los datos mostrados en la **tabla 8**, se promedia la cantidad de contaminación en las muestras representativas y se obtiene como resultado 24.4 g de contaminación promedio (**ecuación 7**), sin embargo, se aproxima al 5% teniendo en cuenta la contaminación que puede quedar incrustada en el plástico.

Ecuación 7. Contaminación promedio en 500 g de plástico

$$\bar{X}: \frac{22 + 22 + 26 + 23 + 29}{5} = 24,4g$$

En cuanto a la contaminación que es derivada de los alimentos, se tienen mezclas complejas de productos químicos que incluyen aguas, grasas, azúcares, almidones y fibra, proteínas, minerales, vitaminas y muchos otros productos químicos orgánicos. La composición varía en cada alimento y dan a la comida sus características principales⁴⁵.

2.4.1.3 Variables no controladas. Las muestras de plástico seleccionadas para la experimentación son tomadas al azar del mismo lote; no se conoce la cantidad exacta de tipo de plástico ingresada al reactor.

2.4.1.4 Variables dependientes. El rendimiento es la variable de respuesta; se ve influenciada directamente por las demás variables estudiadas. El objetivo de la experimentación es conocer la variable de mayor influencia sobre el rendimiento de los productos finales, especialmente, el aceite pirolítico ya que es el producto de interés para el presente trabajo.

2.4.2 Experimentación. Mediante un diseño de experimentos factorial, se evalúa la influencia que tiene cada una de las variables independientes en el proceso. Las combinaciones en los niveles de cada factor y el orden en que se realizan las pruebas se escogen al azar, resultando en un diseño de experimentos completamente aleatorio.

⁴⁵ BEYER Richard. Manual on Food Packaging for Small and Medium Size Enterprises in Samoa. Apia, Samoa. 2012 p 9. Tomado de http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/sap/docs/Food%20Packaging%20Manual.pdf

Para minimizar el error experimental, se realizan dos observaciones y se obtiene una respuesta promedio de la variable rendimiento en las condiciones pre-establecidas, resumidas en la **tabla 9**:

Tabla 9. Condiciones de operación a la entrada del proceso.

Variable	Unidades	Valor
Tiempo	Horas	4
Plástico	Gramos	500
Contaminación	Gramos	25
Agua	Mililitros	2500

En la **tabla 10**, se resumen los factores (con sus respectivos niveles) que se tienen en cuenta para desarrollar el diseño de experimentos:

Tabla 10. Factores a analizar

Factores	Bajo	Alto	Niveles	Unidades
Temperatura	550	650	3	°C
Catalizador	0	10	2	%

El diseño experimental se realizó en corridas aleatorias (sin orden específico) con varios niveles se hace en un total de 12 corridas para las dos réplicas así:

Tabla 11. Distribución de los bloques para el diseño experimental.

Bloque	Temperatura °C	Catalizador %
1	650	0
1	600	10
1	550	0
1	650	10
1	600	0
1	550	10
2	600	10
2	600	0
2	550	10
2	650	10
2	650	0
2	550	0

2.4.2.1 Rendimiento del aceite pirolítico en la pirolisis térmica. El rendimiento se calcula a partir del material ingresado (500 g de residuos plásticos más 25 g de contaminación⁴⁶) mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 8. Cálculo del % de rendimiento

$$\%Rendimiento = \frac{\text{masa de aceite pirolítico (g)}}{\text{masa total de materia prima ingresada (g)}} * 100$$

En la **tabla 12**, se resumen los porcentajes de los productos obtenidos en cada montaje a los diferentes niveles de temperatura establecidos en la pre-experimentación. Se hace énfasis en el rendimiento de aceite pirolítico, ya que este es el producto de interés.

El rendimiento más alto para el aceite pirolítico es 38.10% a una temperatura de 650 °C, esto significa que, con el incremento en la temperatura, se obtienen mayores rendimientos para el producto de interés, además se generan más productos gaseosos y menos productos sólidos. A 650°C no se observa un porcentaje alto de agua a la salida del proceso en comparación con temperaturas menores.

Tabla 12. Productos obtenidos en la pirolisis térmica de residuos plásticos

Número	T (°C)	Aceite (g)	Rendimiento Aceite %	Carbonilla %	Agua %	Gas %
1	550	113	21,52	38,10	19,02	21,37
2	550	101	19,24	46,67	15,21	18,88
3	600	152	28,95	24,00	9,51	37,54
4	600	160	30,48	24,38	19,02	26,13
5	650	184	35,05	11,81	9,51	43,64
6	650	200	38,10	12,76	7,61	41,54

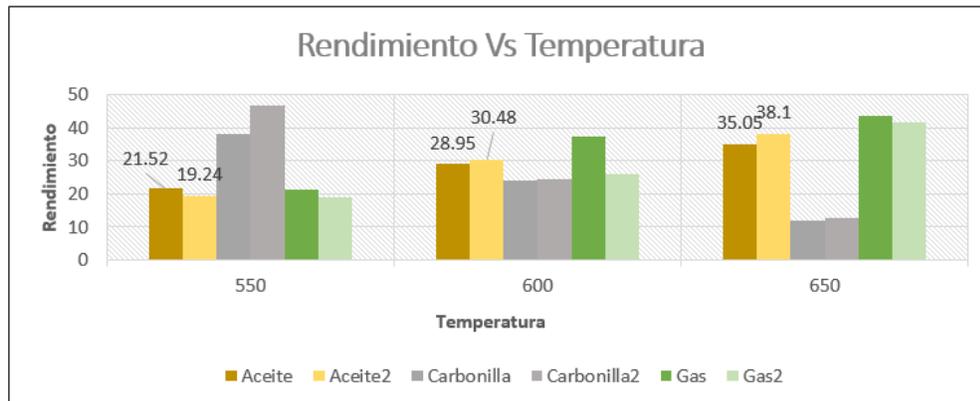
El **grafico 6** muestra la distribución de los productos obtenidos.

2.4.2.2 Rendimiento del aceite pirolítico en la pirolisis catalítica. Para el balance de masa, se considera que el catalizador es recuperado al final de la conversión en la carbonilla, por lo que la cantidad de catalizador ingresada en la alimentación (50 g) se resta de la cantidad de carbonilla a la salida del proceso. Los rendimientos se calculan de acuerdo a la **ecuación 8**, tomando 525 g⁴⁷ como masa total de materia prima alimentada.

⁴⁶ Correspondiente al cinco por ciento en proporción a la carga de entrada de acuerdo a los parámetros expuestos en la sección 6.4.1.2 *Variables controladas, Contaminación* del presente documento

⁴⁷ Se ingresan 500 g de residuos plásticos más 25 g de contaminación. Correspondiente al cinco por ciento en proporción a la carga de entrada expuestos en la sección 6.4.1.2 *Variables controladas, Contaminación* del presente documento

Gráfico 6. Distribución de productos en la pirolisis térmica



Los rendimientos obtenidos para cada uno de los productos a los diferentes niveles de temperatura establecidos en la pre-experimentación se encuentran resumidos en la **tabla 13**. se hace énfasis en el rendimiento de aceite pirolítico por ser el producto de interés.

Tabla 13. Rendimientos para los productos de la pirolisis catalítica.

Cantidad Aceite (g)	Rendimiento Aceite%	Carbonilla %	Agua %	Gas %
143	27,05	34,29	13,31	25,36
151	28,76	29,33	13,31	28,59
157	29,90	20,57	9,51	40,02
146	27,81	20,00	11,41	40,78
193	36,76	13,90	9,51	39,83
198	37,90	14,29	5,70	42,11

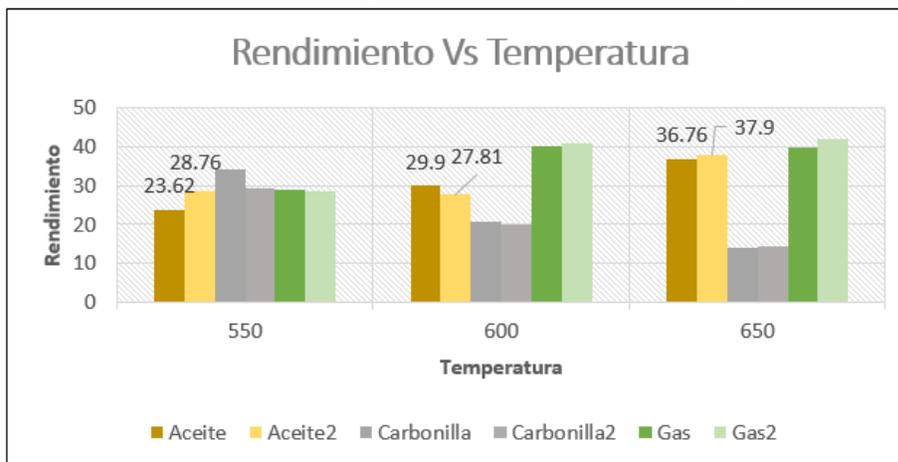
El rendimiento más alto para el aceite pirolítico es 37.90% a una temperatura de 650 °C, esto significa que, con el incremento en la temperatura, se obtienen mayores rendimientos para el producto de interés, además se generan más productos gaseosos y menos productos sólidos.

No hay un cambio evidente en los rendimientos de los productos en la pirolisis catalítica frente a los productos en la pirolisis térmica. A 650°C no se observa un porcentaje alto de agua a la salida del proceso en comparación con temperaturas menores.

La distribución de los productos obtenidos se resume en el **gráfico 7**.

Para determinar si existen diferencias significativas entre los rendimientos obtenidos en ambas pirolisis, se hace un análisis de varianza ANOVA.

Gráfico 7. Distribución de los productos obtenidos en la pirolisis catalítica



Para minimizar el porcentaje de error en los resultados finales, se hace un promedio de los rendimientos de aceite pirolítico obtenidos en cada montaje a cada nivel de temperatura. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

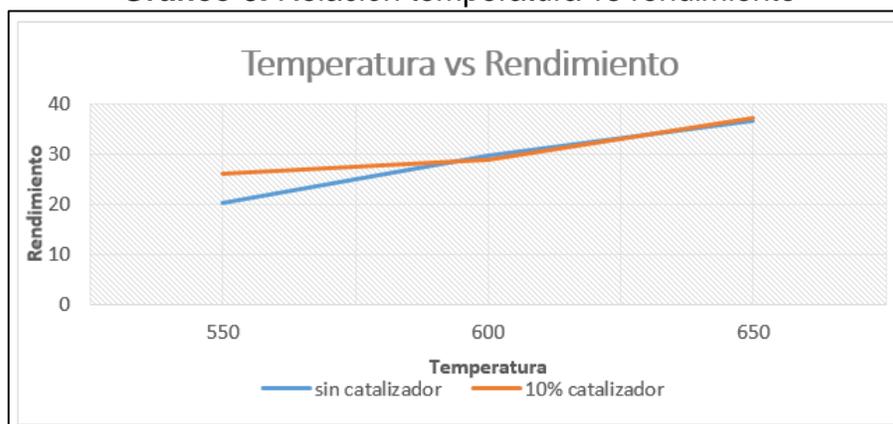
Tabla 14. Rendimientos de aceite pirolítico promedio.

T(°C)	Rendimiento aceite pirolítico	
	Sin catalizador	10% Catalizador
550	20,38	27,91
600	29,71	28,86
650	36,57	37,33

La temperatura es la variable de mayor influencia en el rendimiento del producto de interés; a 650 °C se tienen los mayores rendimientos independientemente de la presencia del catalizador.

En el **grafico 8** se muestra la relación entre rendimiento y temperatura para ambos tipos de pirolisis (térmica y catalítica).

Gráfico 8. Relación temperatura vs rendimiento



2.4.3 Análisis estadístico. El análisis de los resultados del diseño de experimentos se hace con el software Statgraphics⁴⁸. Se parte de un análisis de varianza ANOVA que resulta útil cuando se tienen muestras aleatorias que se someten a diversos análisis replicados⁴⁹.

Para ejecutar un ANOVA, se debe tener una variable de respuesta continua, en este caso, el rendimiento de aceite pirolítico con respecto al material alimentado al inicio del proceso, y al menos un factor categórico con dos o más niveles: los factores temperatura y catalizador, cada uno con 3 y 2 niveles respectivamente.

Los ANOVA evalúan la importancia de uno o más factores (temperatura y catalizador) al comparar las medias de la variable de respuesta (rendimiento de aceite pirolítico) en los diferentes niveles de los factores. La hipótesis nula (H_0) establece que todas las medias de la población son iguales mientras que la hipótesis alternativa (H_i) establece que al menos una de las medias es diferente⁵⁰.

2.4.4 Prueba de hipótesis. Para comprobar si las medias de los rendimientos son significativamente diferentes se hace uso de la tabla ANOVA que evalúa la importancia de uno o más factores (temperatura y catalizador) al comparar las medias de la variable de respuesta (rendimiento de aceite pirolítico) en los diferentes niveles de los factores.

Suponiendo una distribución normal en los datos, se asume un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$ (probabilidad de cometer error), a partir del cual se establecerá la regla de decisión.

⁴⁸ STATGRAPHICS Centurion XVII. Madrid, España.

⁴⁹ MINITAB 17. ANOVA. Recuperado el 9 de mayo de 2016 de: <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/anova/basics/what-is-anova/>

⁵⁰ Ibid, MINITAB 17.

El valor P es la probabilidad de obtener un resultado de la muestra que sea al menos tan improbable como lo que se observa. Si el valor $P < \alpha$ se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna

La hipótesis nula (H_0) establece que todas las medias de la población son iguales, es decir las varianzas de los promedios son igual a cero⁵¹. Se evaluará entonces:

H_0 = Las medias del rendimiento respecto a la temperatura son iguales.

H_0 = Las medias del rendimiento respecto al catalizador son iguales.

H_0 = Las medias del rendimiento respecto a la interacción entre catalizador y temperatura son iguales.

La hipótesis alternativa (H_i) establece que al menos una de las medias es diferente⁵².

En la **tabla 15** se muestran los resultados para el análisis de varianza ANOVA.

Tabla 15. Análisis de varianza ANOVA

Análisis de Varianza para Rendimiento					
<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Temperatura	345,056	1	345,056	61,24	0,0002
B:Catalizador	21,7083	1	21,7083	3,85	0,0973
AA	5,415	1	5,415	0,96	0,3648
AB	18,7272	1	18,7272	3,32	0,1181
bloques	0,140833	1	0,140833	0,02	0,8796
Error total	33,8067	6	5,63445		
Total (corr.)	424,854	11			

Fuente: Statgraphics Centurion XVII. Madrid, España.

La tabla ANOVA prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. El valor de P para el efecto temperatura tiene un valor menor de 0,05, indicando que es significativamente diferente de cero con un nivel de confianza del 95,0% por lo cual se rechaza la hipótesis nula para la temperatura.

Las estimaciones para cada uno de los efectos se evidencian en la **tabla 16**, donde la temperatura tiene un mayor efecto respecto al catalizador, y la interacción de ambos disminuye el efecto en rendimiento. El factor de inflación de varianza (V.I.F) no es superior a 10, es decir no se aumenta la varianza de los coeficientes de la

⁵¹ ESPINOZA MERCHAN Johanna Elizabeth, NARANJO CABRERA Tania Marisol. Estudio de viabilidad técnica preliminar para la obtención de combustibles mediante la pirolisis de residuos plásticos generados en la Universidad Politécnica Salesiana. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. 2014., p 28

⁵² MINITAB 17., Op cit

regresión evitando que exista confusión entre los efectos, que hace difícil su interpretación y se tiene un diseño ortogonal donde todos los factores son igual a 1.

Tabla 16. Efectos estimados para el rendimiento

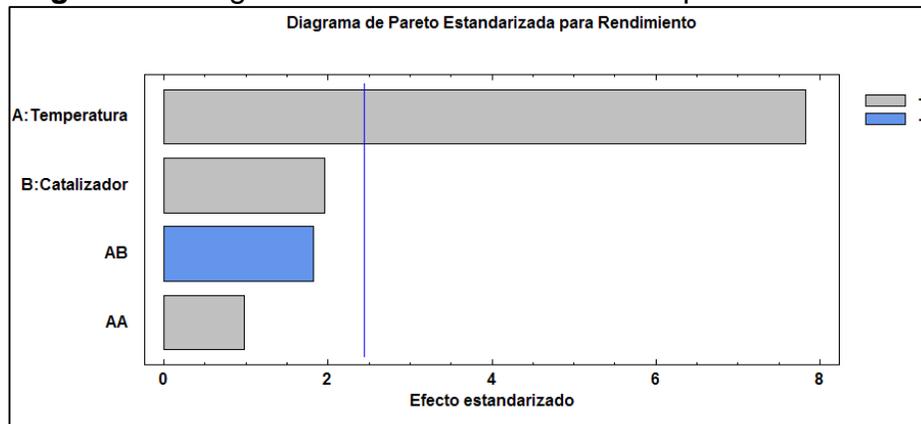
Efectos estimados para Rendimiento (%)			
<i>Efecto</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error Estd.</i>	<i>V.I.F.</i>
promedio	29,285	1,18685	
A:Temperatura	13,135	1,67846	1,0
B:Catalizador	2,69	1,37046	1,0
AA	2,85	2,90718	1,0
AB	-3,06	1,67846	1,0
bloque	0,216667	1,37046	1,0

Errores estándar basados en el error total con 6 g.l.

Fuente: Statgraphics Centurion XVII. Madrid, España.

Para rectificar el resultado, se hizo uso del diagrama de Pareto (**figura 19**). Se observan los efectos en orden decreciente de importancia, la longitud viene dada por el efecto estimado dividido entre su error estándar, la línea vertical permite identificar qué efectos son estadísticamente significativos. Como se observa solo la variable temperatura se encuentra por encima, evidenciando el efecto significativo con un 95,0% de nivel de confianza.

Figura 19. Diagrama de Pareto estandarizada para rendimiento



Fuente: Statgraphics Centurion XVII. Madrid, España.

Con la opción de optimizar respuesta, dada por Statgraphics⁵³, se maximiza el rendimiento teniendo en cuenta la ecuación de regresión lineal:

⁵³ Statgraphics Centurion XVII. Madrid, España.

Ecuación 9. Regresión lineal

$$\text{Rendimiento} = 135,97 - 0,52205 * \text{Temperatura} + 3,941 * \text{Catalizador} + 0,00057 * \text{Temperatura}^2 - 0,00612 * \text{Temperatura} * \text{Catalizador}$$

El valor óptimo obtenido se muestra en la **tabla 17**:

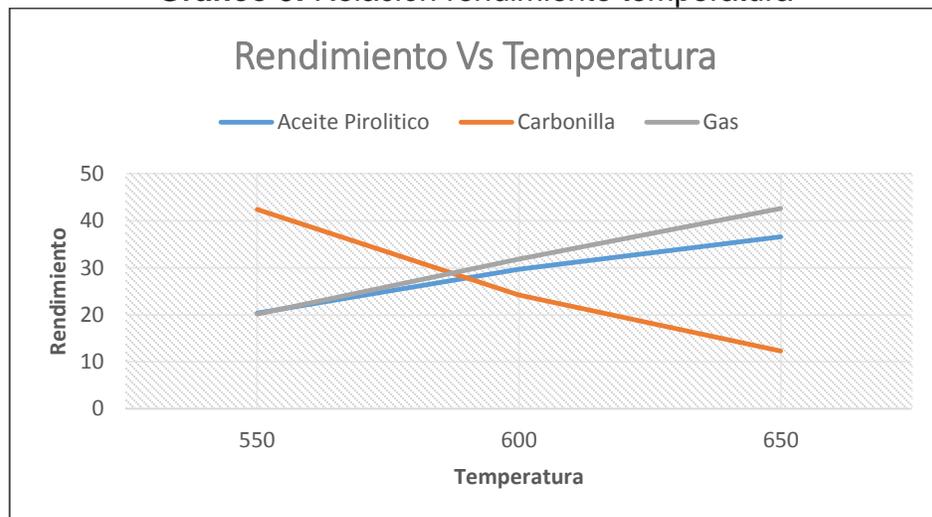
Tabla 17. Valor óptimo para el rendimiento

Optimizar Deseabilidad			
Valor óptimo = 0,912951			
Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Temperatura	550,0	650,0	650,0
Catalizador	0,0	10,0	0,0
Respuesta	Óptimo		
Rendimiento	37,4625		

Fuente: Statgraphics Centurion XVII. Madrid, España.

En el **gráfico 9**, se muestra la relación de la temperatura con el rendimiento de los productos generados: aceite pirolítico, carbonilla y gas. Se concluye que, a mayor temperatura, mayor rendimiento de aceite pirolítico y menor generación de residuos sólidos (carbonilla) en el proceso.

Gráfico 9. Relación rendimiento temperatura



3. CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE PIROLITICO Y OBTENCIÓN DEL COMBUSTIBLE DIÉSEL POR DESTILACIÓN

Es de importancia conocer las características del aceite pirolítico para determinar que productos se pueden obtener, de qué forma se debe tratar y cuál es la mejor manera de almacenarlo. Por medio de la caracterización del aceite se genera un panorama más amplio respecto a las aplicaciones que este puede tener en la industria al momento de realizar el proceso a una escala mayor (planta piloto o planta de producción).

En el presente capítulo, se muestran los resultados de las caracterizaciones efectuadas sobre el aceite pirolítico bajo las normas NTC⁵⁴ y ASTM⁵⁵, así como el proceso de destilación a presión atmosférica para la producción de Diésel de acuerdo a la norma ASTM D 86⁵⁶.

3.1 CARACTERIZACION DEL ACEITE PIROLITICO

Las pruebas realizadas y los resultados obtenidos para la caracterización del aceite pirolítico, son los siguientes:

3.1.1 Gravedad API. El método a seguir para la determinación de la gravedad API se realiza bajo la norma ASTM D 1298⁵⁷, empleando un hidrómetro de vidrio el cual presenta lectura directa la gravedad específica de un crudo a temperatura ambiente, para determinar la gravedad API se emplea la **ecuación 10** y posterior a esto debe corregir el valor obtenido de grados API a temperatura ambiente para llevarlo a una temperatura de 60°F, la cual es la temperatura de reporte; el procedimiento detallado para realizar el ensayo se puede observar en el **anexo 37**.

Este ensayo se realizó dos veces y se tomó el valor promedio entre los dos resultados (ver **tabla 18**).

Ecuación 10. Determinación de los grados API

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{\text{gravedad.especifica}} - 131,5$$

⁵⁴ NTC. Norma Técnica Colombiana

⁵⁵ ASTM. American Standard Test Methods

⁵⁶ ASTM D86-15, Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products and Liquid Fuels at Atmospheric Pressure, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org

⁵⁷ ASTM D1298-12b, Standard Test Method for Density, Relative Density, or API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products by Hydrometer Method, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org

Donde:

° API: Gravedad API.

Gravedad específica: Gravedad específica del crudo por medición directa en el hidrómetro

Los resultados obtenidos para esta propiedad se pueden observar en la tabla 18.

Tabla 18. Resultados prueba de gravedad API

Número de análisis	Gravedad específica leída de hidrómetro	Temperatura de ensayo(°F)	°API (A temperatura ensayo)	°API a 60°F (Corregida)
1	0,784	72	48,9	47,7
2	0,784	72	48,9	47,7
			Promedio	47,7

El aceite pirolítico obtenido mediante la pirolisis de plásticos presenta una gravedad API de 47,7, clasificándolo como crudo ligero, pues se encuentra entre los 30 a 50°API. Los crudos ligeros son los más cotizados porque a partir de ellos se obtienen productos de alto valor como combustibles, contiene una concentración de hidrocarburos de bajo peso molecular, siendo fácil de transportar, con mayor obtención de cantidad de gasolina, diésel y queroseno mediante refinación simple.

3.1.2 Contenido De Sedimentos. La determinación del contenido de sedimentos se requiere para establecer los volúmenes netos de crudo, pues representa un porcentaje del volumen bruto que no es hidrocarburo, o aceite pirolítico, su importancia radica en que si el crudo presenta una excesiva cantidad de sedimentos puede generar problemas operacionales, como corrosión de equipos y problemas de transporte. La prueba se realiza de acuerdo a la norma ASTM D4007⁵⁸. El contenido de sedimentos se expresa como porcentaje de volumen de sedimentos mediante la **ecuación 11**:

Ecuación 11. Porcentaje de volumen de sedimentos

$$\%BS = \frac{A}{B} * 100\%$$

Donde:

%BS: Porcentaje de volumen de sedimentos

A: Volumen de sedimentos

B: Volumen de muestra de petróleo

⁵⁸ ASTM D4007-11e1, Standard Test Method for Water and Sediment in Crude Oil by the Centrifuge Method (Laboratory Procedure), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, www.astm.org

Los resultados obtenidos para la prueba se presentan en la tabla No. 19.

Tabla 19. Datos de referencia para la prueba de porcentaje de sedimentos

Número de Análisis	Volumen de muestra de petróleo	Volumen de sedimentos	Porcentaje de volumen de sedimentos
1	50 ml	9 ml	18
2	50 ml	6 ml	12
Promedio	--	--	15

De acuerdo a los datos de la **tabla 19**, se obtiene un porcentaje de volumen de sedimentos promedio del 15% (representado por los grumos formados por las ceras parafínicas presentes en el aceite pirolítico), lo que significa que es un crudo con un contenido de sedimentos elevado de acuerdo con *Oleoducto de Colombia (ODC)*⁵⁹, donde se especifica un valor de < 0.50% vol para crudos comerciales. Esto puede ocasionar problemas en su manipulación y uso como taponamiento en las tuberías de transporte o en los sistemas de filtrado.

Es recomendable un tratamiento para disminuir este parámetro con el fin de mantener la integridad de equipos que realizarán la destilación para obtener el diésel.

3.1.3 Contenido De Agua. El contenido de agua se determina mediante destilación de acuerdo a la norma ASTM D 4006⁶⁰, este parámetro es útil debido a que el agua es uno de los factores que afecta la calidad de un crudo pues se encuentra relacionado al costo de transporte y procesamiento, para su cálculo se recurre a la **ecuación 12**.

Ecuación 12. Porcentaje de volumen de agua

$$V \% = \frac{(A - B)}{C} * 100$$

Donde:

V %: Porcentaje de agua en la muestra

A: Volumen de agua medida en la trampa

⁵⁹ ODC. Oleoducto de Colombia. Requerimientos mínimos de calidad de crudo. Mayo 19 de 2016. En: <http://www.oleoductodecolombia.com/bto/Paginas/REQUERIMIENTOS-MINIMOS-DE-CALIDAD-DEL-CRUDO.aspx>

⁶⁰ ASTM D4006-11(2012) e1, Standard Test Method for Water in Crude Oil by Distillation, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org

B^{61} : Volumen de agua utilizado para preparar el solvente

C: Volumen de crudo para la muestra

Para el aceite pirolítico no se registró un volumen de lectura de agua en la trampa, por lo que su valor corresponde al valor menor del límite de detección, es decir, < 0,1% volumen de agua en la muestra; el contenido bajo de agua en el crudo indica que no habrá formación de sales que deterioren su calidad y no serán necesarios tratamientos posteriores para eliminar dicha humedad, como la deshidratación.

3.1.4. Punto De Fluides. El punto de fluides es una propiedad que se aplica para aceites negros y aceites combustibles no destilados, siempre y cuando la muestra esté libre de agua. El punto de fluides se determina en base a la norma ASTM D97⁶² (ver **anexo 37**).

De acuerdo a los datos registrados en la **tabla 20**, se obtiene un punto de fluides promedio a los -15 °C, lo cual indica que el crudo puede ser almacenado y transportado a temperaturas bajas sin aumentar su viscosidad, además puede ser refinado en equipos que trabajen a bajas temperaturas. Cabe anotar que el punto de fluides no debe ser tomado como el único indicador para predecir el comportamiento dinámico del crudo, ya que existen otras características que deben tenerse en cuenta, como la viscosidad y el punto de nube.

Tabla 20. Determinación del punto de fluides promedio

Número de Análisis	Temperatura registrada	Temperatura corregida
1	-18 °C	-15 °C
2	-18 °C	-15 °C
Promedio	--	-15 °C

3.1.5 Contenido De Azufre. La muestra de crudo es analizada por la empresa PROASEM SA, ubicada en Barrancabermeja, departamento de Santander, Colombia. El análisis se realiza de acuerdo a la norma ASTM D 4294⁶³.

El resultado entregado por la empresa PROASEM para el contenido de azufre se muestra a continuación:

⁶¹ El solvente se mezcla con una cantidad de agua para completar el volumen necesario. Por esto se resta esta cantidad de agua del volumen de agua medido en la trampa.

⁶² ASTM D97-16, Standard Test Method for Pour Point of Petroleum Products, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org

⁶³ ASTM D4294-16e1, Standard Test Method for Sulfur in Petroleum and Petroleum Products by Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org

Tabla 21. Contenido de azufre en el crudo

Norma	Azufre (ppm)	Azufre (%)
ASTMD4294	250	0,025

Se clasifica como bajo nivel de azufre⁶⁴. El azufre es un compuesto que se encuentra naturalmente en todos los crudos y es un indicador de la corrosividad potencial del crudo; teniendo en cuenta la cantidad de azufre, un crudo se puede clasificar como “dulce” o “ácido”. Los crudos dulces tienen un bajo contenido de azufre (entre 0,01 y 0,5% en peso de azufre) y los crudos ácidos pueden llegar a tener hasta el 5% en peso de azufre⁶⁵. Se prefieren los crudos dulces ya que no son altamente corrosivos y los combustibles que se obtienen tienen una emisión muy baja de material particulado. El crudo obtenido se considera dulce, ya que tiene un porcentaje de azufre del 0,025%, este valor asegura que el crudo no es corrosivo y no va a requerir de tratamientos de endulzamiento.

3.1.6 Caracterización PONA. Por medio de la caracterización PONA, se determina la cantidad de compuestos parafínicos, olefínicos, nafténicos y aromáticos en la muestra de crudo. Cada uno de estos compuestos se determina por separado mediante las siguientes pruebas:

3.1.6.1 Punto de anilina. El punto de anilina se define como la temperatura mínima de solubilidad entre una muestra de anilina y la muestra de crudo. Puntos de anilina bajos, representan la presencia de hidrocarburos aromáticos, mientras que los puntos más altos, representan compuestos parafínicos⁶⁶. La prueba se hace según la norma ASTM D611⁶⁷.

La temperatura registrada donde se distingue la separación de la mezcla es 58°C. En la **tabla 22** se registran los datos para la determinación del punto de anilina

⁶⁴ ICCT. International Council on Clean Transportation. Introducción a la refinación del petróleo y producción de gasolina y diésel con contenido ultra bajo de azufre. 24 de Octubre de 2011. Maryland, EEUU., p 20

⁶⁵ WAUQUIER Jean-Pierre. El refino del petróleo. Petróleo crudo. Productos petrolíferos. Esquemas de fabricación. Editorial Diaz de Santos. Madrid, España. 2004., p 30

⁶⁶ NTE. Norma Técnica Ecuatoriana. Productos derivados del petróleo. Determinación del punto de anilina y punto de anilina mixto. Instituto Ecuatoriano de Normalización. Quito, Ecuador. Diciembre 6 de 2002., p 1

⁶⁷ ASTM D611-12, Standard Test Methods for Aniline Point and Mixed Aniline Point of Petroleum Products and Hydrocarbon Solvents, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org

Tabla 22. Datos para el punto de anilina

Número de análisis	Temperatura en la que se distingue la separación de la muestra
1	58 °C
2	58 °C
Promedio	58 °C

Según los resultados obtenidos para el punto de anilina del aceite pirolítico, este lo clasifica como un crudo Parafínico, debido a que la temperatura obtenida es baja.

3.1.6.2 Índice de refracción. Se denomina índice de refracción al cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el medio; se trata de un valor adimensional y determinado para conocer la pureza de los químicos. Se determina de acuerdo a la norma ASTM D 1218⁶⁸

El índice de refracción n varía a la vez con la estructura química y el peso molecular de manera ascendente, así: n parafinas < n naftenos < n aromáticos⁶⁹.

En la **tabla 22** se resumen los índices de refracción tomados para las dos muestras de crudo analizadas. Se indica un valor promedio de 1,4373 a 15°C.

Tabla 23. Índices de refracción obtenidos a 15 °C

Número de Análisis	Temperatura	Índice de refracción
1	15 °C	14,395
2	15 °C	14,397
Promedio		14,395

La cantidad de carbonos aromáticos viene expresada por la siguiente ecuación:

Ecuación 13. Porcentaje de carbonos aromáticos

$$\%Ca = 1039,4(n) - 470,4(d) - 0,315(PA) - 1094,3$$

FUENTE: PROAÑO Oswaldo, CRESPO Sara. Obtención de combustibles a partir de residuos plásticos. Guayaquil, Ecuador. 2009.

Donde:

Ca: Concentración de carbonos aromáticos, en %

n: Índice de refracción, a 15°C.

⁶⁸ ASTM D1218-12, Standard Test Method for Refractive Index and Refractive Dispersion of Hydrocarbon Liquids, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org

⁶⁹ WAUQUIER Jean-Pierre. El refino del petróleo. Petróleo crudo. Productos petrolíferos. Esquemas de fabricación. Editorial Diaz de Santos. Madrid, España. 2004., p 42

d: Densidad relativa, a 15°C

PA: Punto de anilina, °C.

$$\%Ca = 1039,4(1,4395) - 470,4(0,7896) - 0,315(58) - 1094,3$$

$$\%Ca = 12,22$$

Se obtiene un porcentaje de carbonos aromáticos del 12,22%; es un crudo con una baja proporción de hidrocarburos aromáticos, por lo que no es susceptible a la oxidación con formación de ácidos orgánicos. Es un buen indicador para la obtención de diésel, ya que los compuestos aromáticos no son deseados en este tipo de combustible debido a que producen barros en sus procesos de oxidación.

Para determinar la concentración de carbonos nafténicos se hace uso de la siguiente ecuación:

Ecuación 14. Porcentaje de carbonos nafténicos

$$\%Cn = -1573,3(n) + 840,15(d) - 0,4619(PA) + 1662,2$$

FUENTE: PROAÑO Oswaldo, CRESPO Sara. Obtención de combustibles a partir de residuos plásticos. Guayaquil, Ecuador. 2009.

Donde:

Cn: Concentración de carbonos nafténicos, expresado en %

d: Densidad relativa, a 15°C

PA: Punto de anilina, °C

$$\%Cn = -1573,3(1,4395) + 840,15(0,7896) - 0,4619(58) + 1662,2$$

$$\%Cn = 34,03$$

Se obtiene una concentración de carbonos nafténicos del 34,03%; este porcentaje indica la existencia de compuestos volátiles en el crudo.

Finalmente, para determinar la concentración de carbonos parafínicos, se hace uso de la **ecuación 15**:

Ecuación 15. Porcentaje de carbonos parafínicos

$$\%Cp = 100 - (\%Ca + \%Cn)$$

FUENTE: PROAÑO Oswaldo, CRESPO Sara. Obtención de combustibles a partir de residuos plásticos. Guayaquil, Ecuador. 2009.

Donde

Cp.: Concentración en carbonos parafínicos, %

%C_p= 53,75%

Se obtiene una concentración del 53,75% para carbonos parafínicos; es la fracción más predominante en el crudo, esto es un indicador de que la cadena de carbonos en el crudo es lineal, el diésel y los lubricantes derivados del crudo serán de muy buena calidad.

3.1.6.3 Índice de Bromo. El índice de bromo permite tener una medida del grado de insaturación olefínica de los destilados del petróleo. Cuantitativamente es el número de miligramos de bromo consumidos por 100 g de muestra, y es equivalente a 1000 veces el número de bromo.

Este método permite calcular el porcentaje en peso de los hidrocarburos olefínicos⁷⁰ por medio de la norma ASTM D 1159⁷¹.

$$N Br = \frac{(V - Vb) * NKOH * 159,8 * 100}{W}$$

Donde:

V: Volumen del titulante usado ml

Vb: Volumen gastado del blanco de titulación ml

NKOH: Normalidad del KOH usado en la titulación.

W: Peso de la muestra en g

El índice de bromo calculado es de 15% porcentaje peso en la muestra, lo que denota una presencia muy baja de insaturaciones en el crudo.

3.1.7 Número De Neutralización. Un producto derivado del petróleo puede presentar características ácidas o básicas dependiendo de su origen, proceso de refinación, deterioro o cambios. Los datos referentes a la naturaleza de estas características se pueden conocer mediante el número de neutralización⁷².

En número de neutralización se determina con la norma ASTM D 974⁷³.

La **ecuación 16** permite conocer la cantidad de moles de KOH usadas en la titulación

⁷⁰ Ibid, WAUQUIER Jean-Pierre., p 83

⁷¹ ASTM D1159-07(2012), Standard Test Method for Bromine Numbers of Petroleum Distillates and Commercial Aliphatic Olefins by Electrometric Titration, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org

⁷² NIETO Alex Fabián, MOLINA José. Guías prácticas. Laboratorio de crudos y aguas. Universidad de América. Bogotá, Colombia. 2010., p 28

⁷³ ASTM D974-14e2, Standard Test Method for Acid and Base Number by Color-Indicator Titration, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org

Ecuación 16. Moles de KOH gastados

$$\text{Moles de KOH} = \frac{(\text{ml de KOH gastados} - \text{Factor de solvente}) * 0,1N}{1000}$$

La **ecuación 17** permite conocer el % de neutralización para el crudo

Ecuación 17. % de neutralización para el crudo

$$\% \text{ neutralización} = \frac{\text{moles de KOH} * 56\text{eq}}{\text{masa muestra}} * 100\%$$

Fuente: NIETO Alex Fabián, MOLINA José. Guías prácticas. Laboratorio de crudos y aguas. Universidad de América. Bogotá, Colombia. 2010

Se determina una cantidad de 0,00102 moles de KOH en la titulación, lo que significa un número de neutralización del 11,33 mg KOH / g muestra, esta cantidad muestra que se trata de un crudo corrosivo ya que porcentajes de neutralización mayores a 1,5⁷⁴ indican que existirá corrosión en las tuberías, equipos de almacenamiento y equipos de refinería.

3.1.8 Viscosidad Saybolt. La viscosidad es la medida de las características de flujo del fluido: entre mayor sea su viscosidad, mayor es su resistencia a fluir⁷⁵ y su producción resulta más difícil.

La medida de la viscosidad es importante para el cálculo de las pérdidas de carga en los oleoductos, tuberías y conducciones de la refinería, así como para especificar bombas e intercambiadores para su transporte⁷⁶. La variación de la viscosidad en función de la temperatura no es la misma para todos los crudos. Se determina según la norma ASTM D88⁷⁷

Los valores de viscosidad cinemática se presentan en cSt (centistokes).

Donde:

ν : viscosidad cinemática

SSU: viscosidad del fluido en segundos universales Saybolt

Para el crudo se determina una viscosidad de 31,94 SSU, que corresponde a una viscosidad cinemática de 1,37cSt. El resultado coincide con su gravedad API, mostrando que es un crudo fluido, indicador de un alto rendimiento en nafta o diésel,

⁷⁴ TRONCOSO Enrique. Procesamiento de crudos de elevada acidez nafténica en refinería Lujan de Cuyo. Mendoza, Argentina. Diciembre de 2009., p 15

⁷⁵ NIETO Alex Fabián, MOLINA José, Op cit., p 31

⁷⁶ WAUQUIER Jean-Pierre., Op Cit., p 315

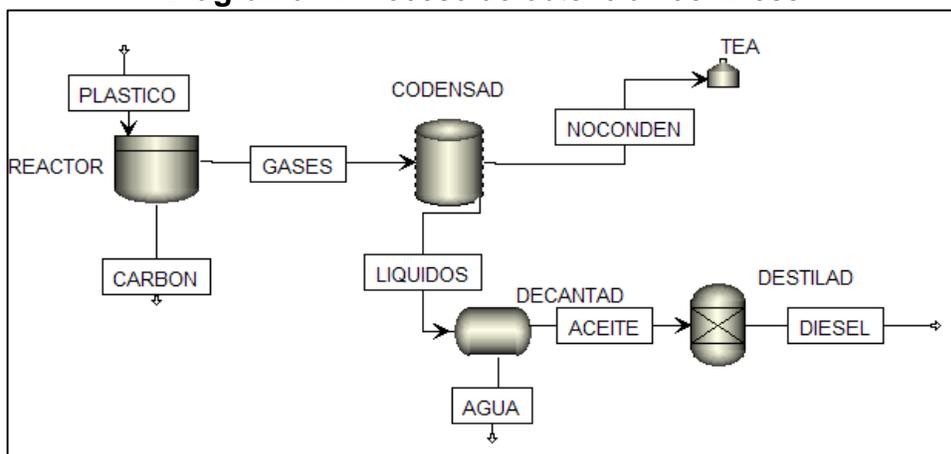
⁷⁷ ASTM D88-07(2013), Standard Test Method for Saybolt Viscosity, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org

debido a los datos arrojados de viscosidad, una aplicación del aceite pirolítico puede ser como disolvente de crudos pesados para facilitar su transporte, reemplazando la nafta.

3.2 CURVA DESTILACIÓN ATMOSFÉRICA DEL ACEITE PIROLÍTICO

El proceso completo de la pirolisis de plásticos para obtención de Diésel por medio de la destilación del aceite pirolítico se observa en el **diagrama 14**, donde una vez obtenidas las condiciones de operación para la pirolisis donde se generen mayores rendimientos del producto deseado, se somete a un proceso de destilación atmosférica (ASTM D86) con el fin de conocer las diferentes fracciones que puede contener, siendo de mayor interés la fracción de diésel.

Diagrama 1. Proceso de obtención del Diésel



La curva de destilación atmosférica, realizada bajo la norma ASTM D86⁷⁸, es un proceso de separación física basado en la diferencia de volatilidad de los distintos componentes de una mezcla de hidrocarburos. El objetivo es separar los diferentes componentes con base en las diferencias entre sus puntos de ebullición las fracciones se obtuvieron de acuerdo a los rangos establecidos en la **tabla 24**:

Tabla 24. Puntos de ebullición de los hidrocarburos generados durante el proceso

Punto de Ebullición	Número de Carbono	Producto
30-205°C	C ₄ -C ₁₀	Gasolina
180-370°C	C ₁₂ -C ₂₇	Diésel
>370	>C ₂₇	Residuo

Fuente: El petróleo Crudo cuba educa encontrado en: <http://educaciones.cubaeduca.cu/medias/pdf/2428.pdf>

⁷⁸ ASTM D86-15, Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products and Liquid Fuels at Atmospheric Pressure, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org

El equipo de destilación ASTM D86 se encuentra en la **figura 20** este análisis refleja la composición del producto, además de brindar utilidad como control fiscal para la caracterización de los crudos, ya que, según los resultados obtenidos, permiten la regulación de las torres de destilación en los fraccionamientos sucesivos.

Figura 20. Equipo de laboratorio para la determinación de la curva de destilación ASTM D86.

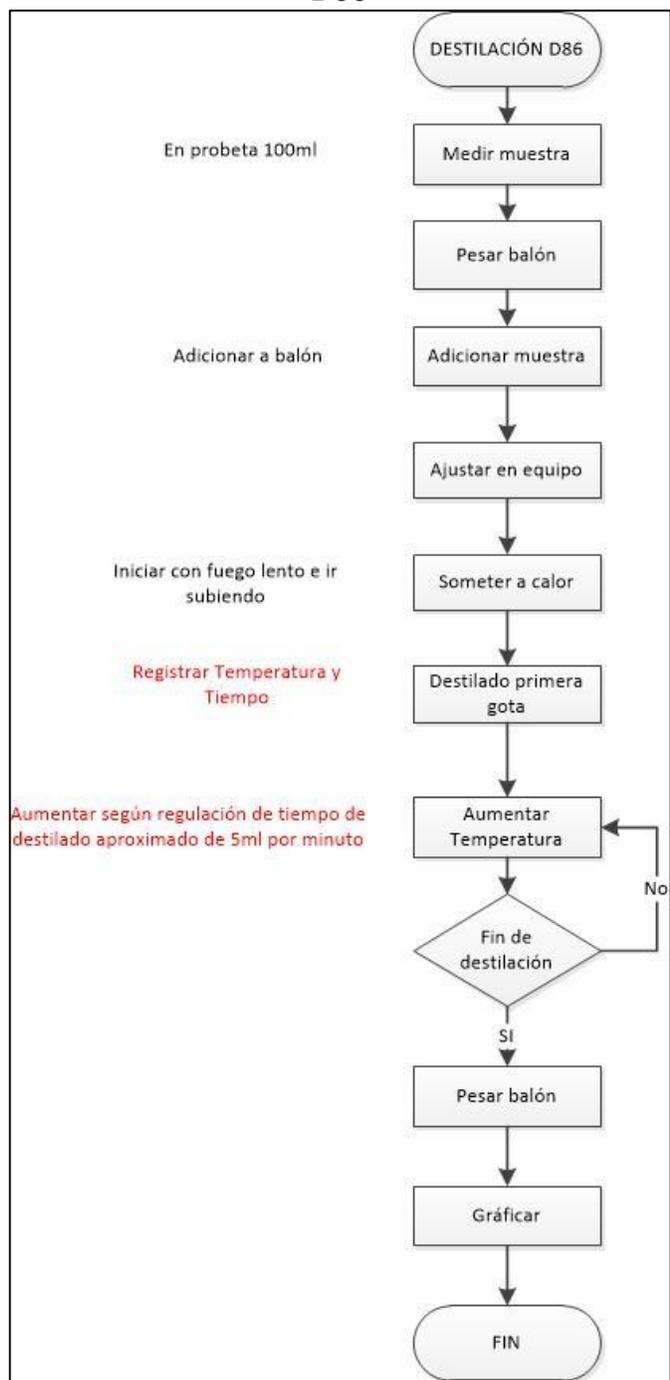


Este método de ensayo cubre la destilación atmosférica de los productos de petróleo utilizando una unidad de destilación de laboratorio (ver **anexo 9**) para determinar cuantitativamente las características de rango de ebullición de productos tales como: gasolinas naturales, destiladas medias y livianas, combustibles diésel con contenido de azufre regular, queroseno y fuel oíl grado 1 y grado 2.⁷⁹

El procedimiento para llevar a cabo la curva de destilación atmosférica ASTM D 86 se muestra en el **diagrama 1**.

⁷⁹ Ibid., ASTM D86-15

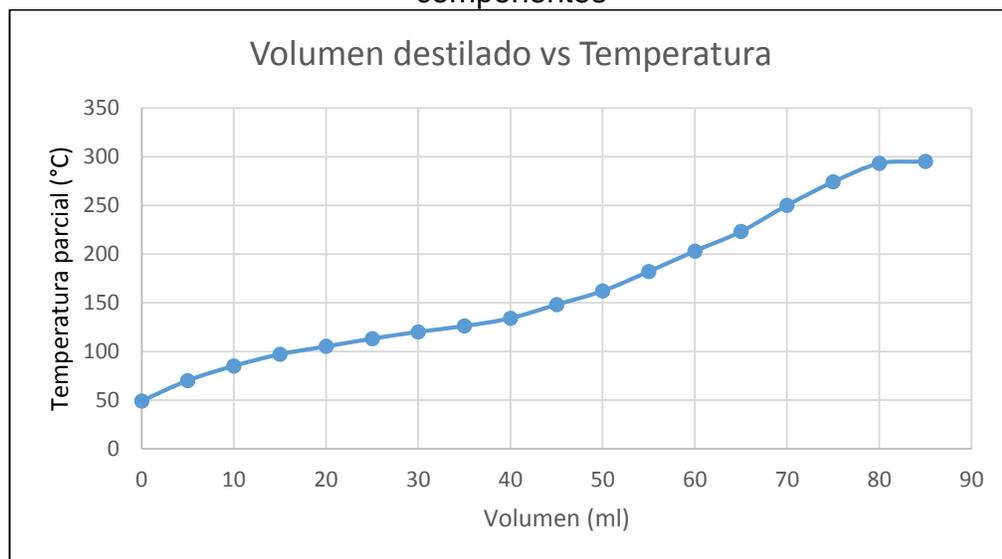
Diagrama 1. Procedimiento para la realización de la curva de destilación ASTM D86



Los resultados obtenidos para el aceite pirolítico se presentan a continuación:

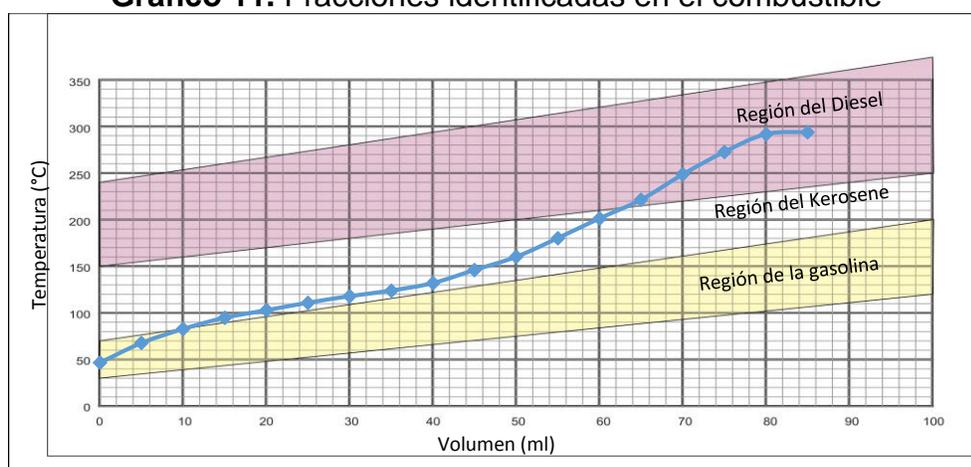
En el **grafico 10**, se muestra la relación que existe entre el volumen destilado y el punto de ebullición de los componentes:

Gráfico 10. Relación del volumen destilado con los puntos de ebullición de los componentes



En el **gráfico 11** se muestra la distribución de las fracciones presentes en el aceite pirolítico durante la destilación:

Gráfico 11. Fracciones identificadas en el combustible



Fuente: CALDERÓN SAENZ Felipe. Laboratorios Dr Calderón. Bogotá, Colombia

En la **gráfica 11**, se observa que el aceite pirolítico está compuesto principalmente por productos de bajo punto de ebullición, entre los 50 y 150°C, estas fracciones corresponden a combustibles como gasolinas, kerosene, alcanos como hexano, heptano y octano. La región de diésel se identifica por encima de los 150°C, lo que significa que a partir del aceite pirolítico, se obtienen bajos rendimientos para este producto.

El rendimiento del diésel por cada 100 ml de muestra, se indica en la **ecuación 19**:

Ecuación 18. Rendimiento de diésel por cada 100 ml de muestra

$$\text{Rendimiento diesel} = \frac{27\text{ml}}{100\text{ ml}} * 100 = 27\%$$

Se tiene un rendimiento del 27% volumen de diésel por cada 100 ml de muestra de crudo, el cual es un rendimiento bajo con respecto a los productos de menor punto de ebullición.

En la **figura 21**, se muestra la diferencia entre las fracciones obtenidas en la destilación: la probeta de la derecha corresponde a la fracción de diésel y la probeta de la izquierda corresponde a la fracción de productos de bajo punto de ebullición, lo cual genera una recomendación para futuros análisis, evaluar el rendimiento del aceite pirolítico para obtener combustibles de bajo punto de ebullición.

Figura 21. Productos finales de la destilación atmosférica



4. CARACTERIZACIÓN DEL DIÉSEL OBTENIDO POR DESTILACIÓN DEL ACEITE PIROLITICO

En el presente capítulo, se muestran las características del combustible obtenido mediante técnicas de caracterización NTC y ASTM, permitiendo identificar las aplicaciones que el combustible puede tener mediante la comparación con la norma ASTM D 2709 y la norma para Diésel y biomezclas para Colombia.

4.1 CARACTERIZACION DEL DIÉSEL

A continuación, se describen cada una de las pruebas realizadas y los resultados para cada una de ellas.

4.1.1 Densidad. La densidad para el Diésel, se determina de acuerdo a la norma NTC 336⁸⁰ bajo el principio de la medida de la masa a una temperatura específica de un volumen de aceite líquido en un picnómetro calibrado a 15°C.

La densidad se determina de acuerdo a la **ecuación 20**

Ecuación 19. Determinación de la densidad

$$\rho = \frac{(Masa\ picnómetro + muestra) - masa\ picnómetro}{volumen\ picnómetro}$$

Fuente: NTC 336. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Grasas y Aceites Vegetales y Animales. Método de la determinación de la densidad (Masa por volumen convencional). Bogotá, Colombia

Los valores obtenidos para la densidad se encuentran en la **tabla 25**:

Tabla 25. Valores para determinar la densidad en el Diésel.

Peso picnómetro (g)	Volumen Picnómetro (ml)	Número de análisis	Peso Picnómetro+ muestra	Densidad (g/ml)
321,278	252,858	1	530,007	0,8255
		2	530,105	0.8259
Promedio			---	0,8257

La densidad del Diésel obtenido es de 0,8257 g/ml. Las variaciones en este valor implican cambios en la potencia del motor y en el tiempo de inyección, por lo tanto, dado que el valor se encuentra muy cercano al límite inferior pueden llegar a existir falencias en su potencia, existiendo un mayor consumo en volumen del producto limitando su mezcla con productos menos densos.

⁸⁰ NTC 336. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Grasas y Aceites Vegetales y Animales. Método de la determinación de la densidad (Masa por volumen convencional). Bogotá, Colombia

4.1.2 Curva de destilación atmosférica. La curva de destilación atmosférica para el diésel se determina bajo la norma ASTM D86⁸¹.

El inicio de ebullición presenta un punto más bajo respecto a la curva de destilación **gráfico 12** esto pudiendo ser producido por un corte muy temprano en la destilación del aceite pirolítico. La temperatura máxima alcanzada es de 318°C y se encuentra al 90% de recuperado, indicando la presencia de componentes más livianos en el diésel evitando tiempos de combustión elevados y menor consumo por su buena automatización. El residuo presentado en el balón (**tabla 25**) corresponde al 3,66% peso mostrando la tendencia de formación de depósitos.

Gráfico 12. Relación temperatura - volumen de los productos de destilación del Diésel

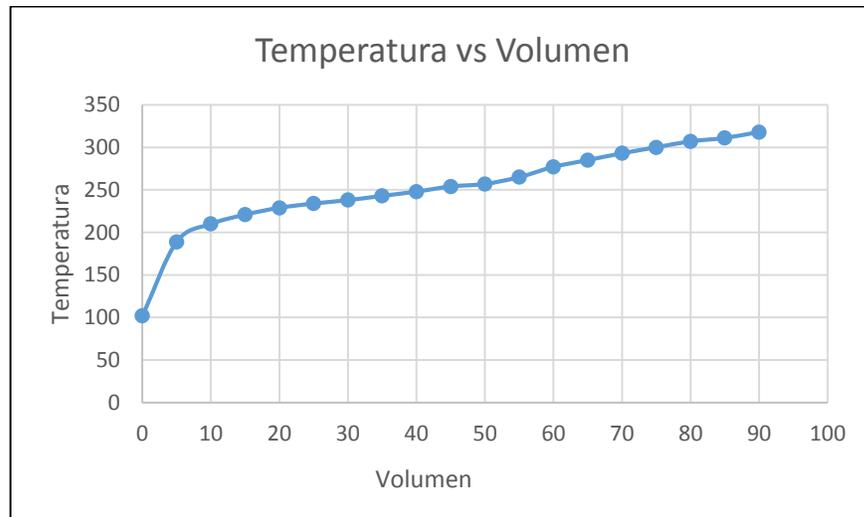


Tabla 26. Residuo de la destilación atmosférica.

Peso balón vacío (g)	Peso balón lleno (g)	Peso balón+ residuo (g)
63	145	66

4.1.3 Contenido de agua. El contenido de agua para el Diésel se determina de acuerdo a la norma ASTM D4006.

El contenido de agua presente en el diésel es mínimo por lo que no se prevén problemas por oxidación en las sales presentes en el agua (**tabla 26**).

Tabla 27. Resultados para el contenido de agua en el diésel

Cantidad de muestra (ml)	Volumen de agua(ml)
50	No detectable

⁸¹ ASTM D88-07(2013), Standard Test Method for Saybolt Viscosity, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org

4.1.4 Viscosidad. La viscosidad para el Diésel se determina de acuerdo a la norma ASTM D88, por el viscosímetro saylbot universal a 40°C y se calcula en cSt.

La viscosidad promedio de los datos para dos análisis se encuentra registrada en la **tabla 27**. El valor promedio se encuentra por encima del general de un combustible donde viscosidades menores que 2,4 cSt genera gripado, es decir, alta fricción y posterior desgaste en la bomba de inyección, por lo cual teniendo en cuenta que la viscosidad disminuye al aumentar la temperatura, climas cálidos superiores a los 40°C, aumentarán el riesgo de presentar problemas de viscosidad menores. En caso de ser muy alto puede ocasionar que el combustible no se quemé completamente.

Tabla 28. Datos para determinar la viscosidad del diésel.

Número de análisis	Viscosidad (cSt)
1	2,56
2	2,60
Promedio	2,58

4.1.5 Contenido de azufre. La muestra de crudo es analizada por la empresa PROASEM SA, ubicada en Barrancabermeja, departamento de Santander, Colombia, de acuerdo a la norma ASTM D2622⁸² por espectrometría de rayos X.

Los resultados entregados por la empresa PROASEM se encuentran en la **tabla 28**.

Dado que el origen del diésel es del plástico se esperaría un valor mínimo de la cantidad de azufre presente, sin embargo, es significativo respecto a anteriores estudios con pirolisis de plásticos 0,004%, esto puede presentarse debido a la presencia de azufre en la contaminación añadida al proceso.

Tabla 29. Contenido de azufre en la muestra de diésel

Norma	Azufre (ppm)	Azufre (%)
ASTM D2622	338	0,0338

El contenido de azufre descrito en la tabla, puede generar problemas corrosión acelerando el desgaste del motor, además de emisiones contaminantes en forma de Óxidos de azufre SO_x (g).

4.1.6 Flash Point. El método, según la norma ASTM D 93⁸³, cubre la determinación del punto de chispa de productos petroleros en un rango de temperaturas entre 40

⁸² ASTM D2622-16, Standard Test Method for Sulfur in Petroleum Products by Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org

⁸³ ASTM D93-15a, Standard Test Methods for Flash Point by Pensky-Martens Closed Cup Tester, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org

y 360 °C, haciendo uso de la copa cerrada Pensky Martens. Se basa en la generación de una chispa mediante aplicación de una fuente de ignición que se dirige hacia la copa a intervalos regulares.

La **tabla 29** muestra los resultados obtenidos en la determinación del Flash Point en tres muestras por la diferencia de resultados su valor promedio. La corrección de por presión se determinó mediante la **ecuación 21**

Ecuación 20. Corrección para la temperatura de flash Point

$$\text{Flash Point corregido} = C + 0.033 * (760 - P)$$

Donde:

C: Temperatura reportada de flash point, °C

P: Presión ambiental. En Bogotá 560 mmHg

Tabla 30. Análisis de flash Point en el Diésel.

Número de análisis	Flash Point sin corregir (°C)	Flash Point Corregido (°C)
1	57	63,6
2	62	68,6
3	58	64,6
Promedio	-	65,6

El punto en el cual el diésel forma vapores capaces de inflamarse por presencia de aire y una fuente de ignición es a los 65,6°C, temperaturas mayores a estas puede generar riesgos de explosión o incendios, esta consideración ha de ser tenida en cuenta en su almacenamiento y transporte. Se presenta además fracciones de hidrocarburos con puntos de ebullición menores como el keroseno por la destilación simple del aceite pirolítico.

4.1.7 Cloud Point. El procedimiento para llevar a cabo la determinación del punto de nube del crudo de acuerdo a la norma ASTM D 2500⁸⁴ donde la muestra se congela a una velocidad específica y se examina periódicamente. La primera temperatura a la cual se observa una nube en el fondo del tubo de ensayo se toma como el punto de nube del crudo.

Los resultados obtenidos para la determinación del punto de nube se muestran en la **tabla 31**

⁸⁴ ASTM D2500-16, Standard Test Method for Cloud Point of Petroleum Products, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org

Tabla 31. Resultados para la prueba de punto de nube

Número de análisis	Punto de Nube (°C)
1	3
2	3
Promedio	3

El punto de nubosidad se registra a los 3°C, a temperaturas menores a esta se puede causar taponamiento del filtro de combustible afectando el buen funcionamiento del motor, para un mejor funcionamiento se pueden instalar calentadores de combustible o aditivos que modifican el cristal de la cera⁸⁵. Por lo tanto su almacenamiento y uso genérico comercial en camiones de motor diésel es especialmente adecuado en climas cálidos.

4.1.8 Carbón Conradson. La prueba se lleva a cabo de acuerdo a la norma ASTM D 189⁸⁶. Donde La muestra cuantificada, se deposita en el crisol y es sometida posteriormente a calentamiento durante un periodo fijo donde se forma el residuo carbono.

El cálculo para determinar el porcentaje de carbón en la muestra de Diésel se encuentra en la **ecuación 22**:

Ecuación 21. Cálculo del contenido de carbón.

$$\%Carbón = \frac{C - A}{B - C} * 100$$

Donde B: Peso de crisol más muestra (g)

C: peso de crisol más carbón (g)

A: peso del crisol (g)

La **tabla 32**, muestra los resultados obtenidos para la prueba de carbón Conradson para el diésel

⁸⁵ THE HARTFORD STEAM BOILER. Mantenimiento de motores diesel para una operación confiable. Conneticut, EEUU. 2002., p 5. En: https://www.munichre.com/site/hsb/get/documents_E1549332401/hsb/assets.hsb.group/Documents/Knowledge%20Center/Equipment%20Care/449-SP%20%20Mantenimiento%20de%20Motores%20Diesel%20para%20una%20Operaci%C3%B3n%20Confiable.pdf

⁸⁶ ASTM D189-06(2014), Standard Test Method for Conradson Carbon Residue of Petroleum Products, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org

Tabla 32. Resultados prueba de carbón Conradson

Número de análisis	Peso Crisol (g)	Peso crisol+ muestra (g)	Peso crisol+ carbón (g)	Carbón (%)
1	180,577	230,841	181,015	0,8714
2	190,425	240,530	190,875	0.8981
			Promedio	0,8847

La tendencia de formación de residuos de carbón en la cámara de combustión del motor viene dada por el porcentaje del 0,8847%, siendo más crítica para motores de alta velocidad que los industriales de baja velocidad, dificultando el buen funcionamiento de estos por incrustaciones.

4.1.9 Cenizas. La determinación del contenido de cenizas se realiza de acuerdo a la norma ASTM D 482⁸⁷. Donde la muestra es sometida a calor hasta quedar un residuo carbonoso, que posteriormente se calienta en mufla a altas temperaturas hasta reducción total de cenizas.

El porcentaje de cenizas se calcula mediante la **ecuación 23**:

Ecuación 22. Cálculo del porcentaje de cenizas

$$\%cenizas = \frac{R - P}{A - P} * 100$$

Donde:

A: Peso del crisol más muestra, g

R: Peso de crisol más ceniza, g

P: Peso del crisol, g

La **tabla 33** muestra los valores de porcentaje de cenizas promedio para las muestras analizadas

Tabla 33. Resultado promedio del contenido de cenizas para el crudo

Número de análisis	Peso Crisol (g)	Peso crisol+ muestra (g)	Peso crisol+ cenizas (g)	Cenizas (%)
1	428,765	628,775	428,890	0,0625
2	497,634	697,639	497,764	0.065
			Promedio	0,0637

Para el caso de la ceniza indicado por la presencia de componentes inorgánicos, no se cumple con el valor máximo permitido del 0,01% puesto que se tiene cerca de seis veces más del dato, este factor puede acelerar el desgaste y puede dañar componentes del sistema de inyección como el pistón y sus anillos.

⁸⁷ ASTM D482-13, Standard Test Method for Ash from Petroleum Products, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org

4.1.10 Corrosión al cobre. De acuerdo a la norma ASTM D130⁸⁸, donde la lámina de cobre se sumerge en la muestra a 40°C durante 3 horas, el resultado es determinado por su coloración.

Para la muestra de Diésel analizada, se observa una coloración naranja oscuro, correspondiente a la designación 1b.

Por parte del método de lámina de cobre se evidencia presencia de agentes ácidos o corrosivos como el azufre, que pueden atacar el sistema de combustión fabricados en cobre o bronce además el diésel puede ser corrosivo durante tiempos de almacenamiento prolongados con temperaturas fluctuantes.

4.1.11 Índice De Cetano. El contenido presentado a continuación está basado en el estándar ASTM D976. Donde se calcula a partir de la **ecuación 24**

Ecuación 23. Cálculo del índice de cetano.

$\begin{aligned} \text{Índice de Cetano} \\ = 454,74 - 1641,416\rho + 774,74 \cdot \rho^2 - 0,554 \cdot T_{50} + 97,083 \cdot (\log T_{50})^2 \end{aligned}$
--

Fuente: WAUQUIER Jean-Pierre. El refinado del petróleo. Petróleo crudo. Productos petrolíferos. Esquemas de fabricación. Editorial Diaz de Santos. Madrid, España. 2004

Donde:

ρ : Densidad a 15°C en g/ml,

T_{50} : Temperatura en (°C) correspondiente al 50% del destilado según ASTM D86.

Tabla 34. Resultados de la prueba de índice de Cetano para el diésel

Temperatura de 50% destilado (°C)	Índice de Cetano
257	49,08

El combustible Diésel debe ser capaz de tener una rápida vaporización y encendido sin llama o chispa, determinado por el índice de Cetano; el valor de 49,08 indica que es un grado aceptable: superior a los 55 se habla de un valor de óptima calidad para vehículos de motor diésel en carretera; cuánto mayor sea su valor se producirán menos emisiones, por lo que su nivel mínimo dependerá de la región donde se use.

El número de cetano es un indicador del tiempo que transcurre entre la inyección del carburante y el comienzo de su combustión, es decir que, de acuerdo al valor obtenido, se asegura que su uso es un motor no dificultará su arranque.

⁸⁸ ASTM D130-12, Standard Test Method for Corrosiveness to Copper from Petroleum Products by Copper Strip Test, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org

4.2 TABLA COMPARATIVA

La norma ASTM D 975⁸⁹ presenta la clasificación del Diésel conforme a su volatilidad, y cantidad de azufre en siete grados brindando sus posibles aplicaciones, es así como en relación con la temperatura registrada del 90% del destilado del Diésel obtenido por pirolisis de plásticos (318 °C) se cataloga como grado 2- D y de acuerdo a su contenido de azufre en S500.

En la **tabla 35** se muestra el resumen de las caracterizaciones para el diésel obtenido por pirolisis de plásticos y el diésel 2-D S 500 que es usado para motores tipo diésel que requieren combustible con una cantidad de azufre máxima de 500 ppm, siendo especialmente adecuado para uso en aplicaciones con condiciones de variación de la velocidad y la carga, además se compara con las especificaciones del Diésel y su mezcla con biocombustibles de la resolución 90963⁹⁰

Tabla 35. Comparación de las características del diésel obtenido con las características del Diésel 2 D y Diésel en mezcla con Biodiesel.

Característica	Diésel (pirolisis)	Diésel 2D ASTM D 975	Cumple	Diésel y mezcla con Biodiesel	Cumple
Densidad g/ml	0,8257	No especifica	-----	No especifica	-----
Curva destilación	318	Mín. 282			
90% recuperado	ASTM D86	Máx.338	SI	Máx. 360	SI
Agua %	No detectable ASTM D4006	Máx.0,05%(V/V) ASTM D2709	SI	0,05%	-----
Viscosidad cSt	2,58 ASTM D88	Mín. 1,9 Máx.4,10 ASTM D445	SI	Mín. 1,9 Max 5,0	SI
Azufre %	0,0338 ASTM D2622	Máx 0,05%p ASTM D2622	SI	Máx. 0,005%	NO
Flash Point °C	65,6 ASTM D93	Mín.52 ASTM D93	SI	Mín. 52	SI
Cloud Point °C	3 ASTM D 2500	No reporta ASTM D2500	----	No reporta	-----
Carbón Conradson %	0,8847 ASTM D 189	Máx.0,35%P ASTM D524	NO	Máx. 0,2%	NO
Cenizas %	0,0637 ASTM D 482	Máx. 0,01 %P ASTM D 482	NO	Máx. 0,01%	NO
Corrosión cobre	1b ASTM D130	1b ASTM D130	SI	Clase 2	SI
Índice de Cetano	49,08 ASTM D 976	Mín. 40 ASTM D976	SI	Mín. 45	SI

El Diésel obtenido cumple las condiciones dadas para diésel 2D, siempre y cuando se reduzcan los valores para contenido de carbón (0,8847 %) y ceniza (0,0637%)

⁸⁹ ASTM D975-15c, Standard Specification for Diesel Fuel Oils, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org

⁹⁰ MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍAS. Resolución 90963. Septiembre 11 de 2014. En: http://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/resolucion_minminas_90963_2014.htm

presentes en el mismo pues incumplen con la normatividad tanto para el 2D como para la mezcla con biodiesel; el porcentaje de agua fue no identificable, sin embargo, se tiene presente que la norma D 975 se encuentra establecida por la caracterización ASTM D 2709, por lo cual no se precisa el dato de cumplimiento.

El uso del diésel de plástico de acuerdo a su categoría 2D es especial para motores tipo diésel con cargas relativamente altas o que no requieren combustible con mayor volatilidad, ideal para tractores, o maquinarias fuera de la zona urbana por su S500. Sin embargo su uso en Colombia no cumple para la mezcla con biodiesel donde el máximo permitido es 50 ppm siendo este menos contaminante y corrosivo, por lo cual es necesario realizar hidrotreamiento previo para disminuir el contenido de azufre en el hidrocarburo en la forma sulfuro de hidrógeno y aprovechar su posterior uso en maquinaria de obras públicas, locomotoras, explotación minera así como en la generación de energía eléctrica, quemadores de hornos, secadores y calderas compitiendo con el diésel corriente actualmente comercial B2/B4 de Ecopetrol.

La condición de seguridad por posible ignición por presencia de aire y fuente de calor se cumple para ambas especificaciones ya que está por encima del mínimo (65,6°C), facilitando su manipulación, siendo un combustible relativamente fácil de almacenar y transportar por las temperaturas registradas en su punto de chispa y su punto de nube. El valor de corrosión se encuentra al límite de la norma (1b) para el caso del Diésel 2D sin embargo la mezcla con el Biodiesel abarca un mayor rango clase 2 siendo más permisivo en las sustancias corrosivas.

Tabla 36. Características Diésel Marino

Característica	Diésel Marino	Cumple
Azufre ppm	Máx. 50	NO
Cenizas g/gmuestra	Máx. 0,01	SI
Densidad 15°C g/ml	Máx. 0,890	SI
Índice de Cetano	Mín. 40	SI
Punto de Inflamación	Mín. 60	SI
Residuo Carbón, 10% fondos	Máx. 0,2	NO
Viscosidad cinemática cSt	Mín. 2,0	SI
	Máx. 6,0	

Fuente: ECOPETROL. Catálogo de productos combustibles. Diésel Marino.

El Diésel obtenido también puede ser usado para los motores tipo Diésel de embarcaciones se emplean mezclas de hidrocarburos, no necesariamente en adición de biodiesel, donde las características del denominado Diésel Marino se encuentran en la **tabla 36**.

5. CONCLUSIONES

- Se identificaron las variables que afectan directamente el proceso, la temperatura es la variable de mayor influencia; a 650°C se obtuvo el mayor rendimiento para el producto de interés (aceite pirolítico). La presencia de catalizador, por otra parte, no generó un cambio significativo en la distribución de los productos finales, especialmente en las fracciones líquida y gaseosa. Estos factores se identificaron gracias a un análisis de varianza en el que se buscaba establecer las mejores condiciones de operación para obtener el mayor rendimiento.
- El rendimiento obtenido del aceite pirolítico fue bajo (37 %) con respecto a los rendimientos que se han obtenido en investigaciones previas sobre el mismo tema, la principal diferencia radica en la condición de los plásticos: cuando los plásticos tienen trazas de contaminantes, no se aseguran buenos rendimientos ya que estos compuestos pueden interferir en el desarrollo de la pirolisis, desviando la producción a productos secundarios como el agua.
- El análisis fisicoquímico PONA permitió identificar los porcentajes de carbonos para el aceite pirolítico; % C aromáticos: 12,22 %C nafténicos: 34,03, %C parafínicos: 53,75%, donde la mayor proporción se encuentra en carbonos parafínicos existiendo problemas en formación de ceras.
- La fracción del destilado del aceite pirolítico, presenta mayor favorabilidad hacia producto de bajo peso molecular ya sea gasolinas o keroseno. Los rendimientos para el Diésel son bajos (27%).
- Las características del Diésel obtenido por pirolisis de plásticos lo permiten calificar como Diésel 2D- S500, adecuado para motores de carga mediana a pesada y velocidad constante.
- El Diésel obtenido por pirolisis de plásticos no cumple los parámetros de azufre, carbón y ceniza para ser comercializado en Colombia, como combustible de automóviles, calderas, hornos o embarcaciones marinas

6. RECOMENDACIONES

- Evaluar los posibles usos energéticos de la carbonilla depositada en el reactor, así como la separación del aluminio para su posterior recuperación.
- Caracterizar el gas no condensable con salida a la tea, con el fin de evaluar su uso como combustible en el mismo proceso.
- Evaluar métodos de tratamiento para realizar la remoción de sedimentos en el aceite pirolítico con el fin de obtener una Materia Prima de mejor calidad para la obtención del diésel.
- De acuerdo a los valores obtenidos del número de neutralización para el aceite pirolítico se recomienda el uso de materiales apropiados para su procesamiento principalmente acero inoxidable, pues es de naturaleza altamente corrosivo.
- Evaluar el aceite pirolítico obtenido de la pirolisis de plásticos como disolvente de crudos pesados, como mejorador de viscosidad para el transporte y como sustituto de nafta.
- Establecer factores que influyen en la presencia de azufre en el Diésel, con el fin de remover desde la etapa inicial las interferencias, evitando adición de procesos de tratamiento.
- Valorar Técnicas de disminución de contenido de carbón y cenizas presentes en el Diésel obtenido por destilación de aceite pirolítico.
- Aumentar el rango de trabajo para la temperatura de la etapa de pirolisis de plásticos, mayor a 650°C.
- Estudiar la influencia del catalizador en una fase diferente al contacto directo con el plástico, ya sea como lecho fluidizado o aglutinarlo para contacto en fase vapor.
- Realizar el análisis Técnico y financiero del proceso, estableciendo la viabilidad económica con el Diésel comercial.

BIBLIOGRAFIA

ADRADOS A, LOPEZ A, TORES A. Pyrolysis of plastic packaging waste: A comparison of plastic residuals from material recovery facilities with simulated plastic waste. Escuela de Ingeniería de Bilbao, Bilbao, España. Diciembre 20 de 2010.

ADRADOS A, LOPEZ A, TORES A. Catalitic pyrolysis of plastic wastes with two different types of catalysts: ZSM-5 zeolite and Red Mud. Escuela de ingeniería de Bilbao. Bilbao, España. Enero 11 de 2011

ARACIL SAEZ Ignacio. Formación de contaminantes y estudio cinético en la pirolisis y combustión de plásticos (PE, PVC y PCP). Universidad de Alicante. Alicante, España. Julio de 2008

ARANDES José M, BILBAO Javier, LOPEZ Danilo. Reciclado de residuos plásticos. En <http://www.ehu.es/reviberpol/pdf/MAR04/Danilo2004.pdf>

ARENAS RUEDA Félix, TORRES LOPEZ Mario. Guía de laboratorio de fluidos. Punto de fluidez. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Santander, Colombia. 2009.

ASTM D86-15, Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products and Liquid Fuels at Atmospheric Pressure, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org

ASTM D88-07(2013), Standard Test Method for Saybolt Viscosity, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org

ASTM D93-15a, Standard Test Methods for Flash Point by Pensky-Martens Closed Cup Tester, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org

ASTM D97-16, Standard Test Method for Pour Point of Petroleum Products, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org

ASTM D189-06(2014), Standard Test Method for Conradson Carbon Residue of Petroleum Products, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org

ASTM D482-13, Standard Test Method for Ash from Petroleum Products, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org

ASTM D611-12, Standard Test Methods for Aniline Point and Mixed Aniline Point of Petroleum Products and Hydrocarbon Solvents, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org

ASTM D974-14e2, Standard Test Method for Acid and Base Number by Color-Indicator Titration, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org

ASTM D975-15c, Standard Specification for Diesel Fuel Oils, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org

ASTM D1159-07(2012), Standard Test Method for Bromine Numbers of Petroleum Distillates and Commercial Aliphatic Olefins by Electrometric Titration, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org

ASTM D1218-12, Standard Test Method for Refractive Index and Refractive Dispersion of Hydrocarbon Liquids, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org

ASTM D1250-04 Temperature and Pressure Volume Correction Factors for Generalized Crude Oils, Refined Products and Lubricating Oils. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004, www.astm.org

ASTM D1298-12b, Standard Test Method for Density, Relative Density, or API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products by Hydrometer Method, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org

ASTM D2500-16, Standard Test Method for Cloud Point of Petroleum Products, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org

ASTM D4006-11(2012) e1, Standard Test Method for Water in Crude Oil by Distillation, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org

ASTM D4007-11e1, Standard Test Method for Water and Sediment in Crude Oil by the Centrifuge Method (Laboratory Procedure), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, www.astm.org

ASTM D4294-16e1, Standard Test Method for Sulfur in Petroleum and Petroleum Products by Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org

ASTM D7611 / D7611M-13e1, Standard Practice for Coding Plastic Manufactured Articles for Resin Identification, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org

BEYER Richard. Manual on Food Packaging for Small and Medium Size Enterprises in Samoa. Apia, Samoa. 2012 p 9. Tomado de http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/sap/docs/Food%20Packaging%20Manual.pdf

BUEKENS Alfons G. Technical methods in plastics pyrolysis. Department of chemical engineering and Industrial Chemistry. Bruselas, Belgium. 1998

CASTELLS Elías, VELO Enric. La pirólisis. España: Ediciones Díaz de Santos, 2012. Febrero 13, 2016. ProQuest ebrary

CISAN. Consejo para la información sobre seguridad de alimentos y nutrición. Los plásticos biodegradables en la industria alimentaria. En: http://cisan.org.ar/adjuntos/20110210125752_.pdf

CONESA FERRER Juan Antonio. Estudio de la Pirolisis de residuos plásticos de polietileno. Universidad de Alicante. Departamento de Ingeniería Química. Alicante, España. 1996

CONTRERAS Camilo. Manejo integral de aspectos ambientales – residuos sólidos. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. 2006. En: http://www.javeriana.edu.co/ier/recursos_user/IER/documentos/OTROS/Pres_Residuos_CamiloC.pdf

CONTRERAS CANTEROS Francisco Eduardo. Estudio de la pirolisis catalítica de polietileno en un reactor Semi-batch. Universidad de Chile. Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología. Santiago de Chile, Chile. Enero de 2014

DIXON, John. ILSI Europe. Packaging materials. Multilayer packaging for food and beverages. Julio de 2011. Bruselas, Bélgica

EBNESAJJAD Sina. Plastic films in food packaging Materials, technology and applications. Chadds Ford, PA, USA. 2013

EGIDO Sergio David. Procedimiento catalítico de pirolisis flash para la obtención de bio-oil o biofuel a partir de materias poliméricas carbonadas. Patent WO 2014041212 A1. Google Patents. Marzo 20 de 2014. Obtenido de: <http://www.google.com/patents/WO2014041212A1?cl=es>

ESPINOZA MERCHAN Johanna Elizabeth, NARANJO CABRERA Tania Marisol. Estudio de viabilidad técnica preliminar para la obtención de combustibles mediante la pirolisis de residuos plásticos generados en la Universidad Politécnica Salesiana. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. 2014

GAO Feng. Pyrolysis of Waste Plastics into Fuels. University of Canterbury. Nueva Zelanda. 2010

GARCIA MARTINEZ Eva, Determinación de la humedad de un alimento por un método gravimétrico indirecto por desecación. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España. Mayo de 2015

GARY James H., HANDWERK Glenn E. Refino del petróleo. Tecnología y economía. Editorial Reverté SA, 1980. Barcelona, España

GOBIN Karishma, MANOS George. Catalytic degradation of plastic waste to liquid fuel over commercial cracking catalysts: Effect of polymer to catalyst ratio/acidity content. University College London, Londres, UK. Enero 21 de 2015

HERNANDEZ FERREZ Maria del Remedio. Evaluación de la pirólisis térmica y catalítica de polietileno en lecho fluidizado como técnica de reciclado. Influencia de las variables sobre los productos generados. Universidad de Alicante. Alicante, España. Marzo de 2007

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC 282. Norma Técnica Colombiana. Industrias Alimentarias. Harinas de trigo. Métodos de ensayo. Bogotá, Colombia. Noviembre 7 de 2002

_____. Norma Técnica Colombiana. Cereales y Productos Cereales. Determinación del contenido de Humedad, p 1. Bogotá, Colombia. Noviembre 30 de 2010. NTC 529.

_____. Norma Técnica Colombiana. Documentación, presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. Bogotá, Colombia. Sexta actualización. 2008. NTC 1486

_____. Norma Técnica Colombiana. Referencias documentales para fuentes de información electrónicas. Bogotá, Colombia. 1998. NTC 4490.

_____. Norma Técnica Colombiana. Referencias bibliográficas. Contenido, forma y estructura. Bogotá, Colombia. 2008. NTC 5613.

ISO 649-1. Laboratory glassware. Density hydrometers for general purposes. Part 1: Specification. 1981. En <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:649:-1:ed-1:v1:en>

ISO 4803:1978 Laboratory glassware. Borosilicate glass tubing. 1978. En: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:4803:ed-1:v1:en>

KAMINSKY Walter, SCHEIRS John. Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics: converting waste plastics into diesel and other fuels. West Sussex UK, 2006

KUMAGAI Shogo, HASEGAWA Itaru. Thermal decomposition of individual and mixed plastics in the presence of CaO. Tohoku University, Tokio, Japan. Abril 20 de 2015

LEIVA Y NUNCIO Miguel A., RODRIGUEZ M. Nicolás. El diésel. Refinería PEMEX. México. Recuperado el 16 de mayo de 2016. En: <http://www.ref.pemex.com/octanaje/24DIESEL.htm>

MARTINEZ BENCARDINO Ciro. Estadística y muestreo. Décimo tercera edición. 1997

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Principales procesos básicos de transformación de la industria plástica y manejo, aprovechamiento y disposición de residuos plásticos post-consumo. Bogotá, Colombia. Julio de 2004. En: http://www.siame.gov.co/siame/documentos/Guias_Ambientales/Gu%C3%ADas%20Resoluci%C3

MINITAB 17. ANOVA. Recuperado el 9 de mayo de 2016 de: <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/anova/basics/what-is-anova/>

MONTERO J. Minerales y rocas. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 2007. En: <http://www.docentes.unal.edu.co/jmmonteroo/docs/4-5%20Minerales%20-Rocas.pdf>

NTE. Norma Técnica Ecuatoriana. Productos derivados del petróleo. Determinación del punto de anilina y punto de anilina mixto. Instituto Ecuatoriano de Normalización. Quito, Ecuador. Diciembre 6 de 2002., p 1

ODC. Oleoducto de Colombia. Requerimientos mínimos de calidad de crudo. Mayo 19 de 2016. En: <http://www.oleoductodecolombia.com/bto/Paginas/REQUERIMIENTOS-MINIMOS-DE-CALIDAD-DEL-CRUDO.aspx>

PANDA Achyut. Thermolysis of waste plastic to liquid fuel. A suitable method for plastic waste management and manufacture of value added products -A world perspective. National Institute of Technology, Rourkela, India. Abril 16 de 2009

REMILLARD F. Identification of plastics and elastomers. Centre de Conservation du Quebec. 2007. Quebec, Canadá p 8. Tomado de http://www.ccq.gouv.qc.ca/fileadmin/images/img_centre-ress/microtest_ang.pdf

RODENAS PASTOR Mercedes. Los materiales plásticos en tecnología industrial I. Prácticas de identificación. Diciembre de 2008. Tomado de https://docs.google.com/document/d/1HcvK9slks_S3_KVg2ZRXXALjafE7CVGaWQYmpVWh2i0/edit?pref=2&pli=1

TORRES EGAS Alexandra Elizabeth. Caracterización y evaluación del crudo carga de la refinería estatal de Esmeraldas. Universidad Central del Ecuador. Quito, Ecuador. 2013

UNEP. Converting Waste Plastics into a Resource: Compendium of technologies. Osaka, Japón. 2009

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL. Análisis de productos derivados del petróleo. Rosario, Argentina. 2014

VAZQUEZ M Alethia, ESPINOZA V Rosa María. El reciclaje de los plásticos. Universidad Autónoma Metropolitana. Azcapotzalco, México. Recuperado el 15 de mayo de 2016. En: <http://www.anipac.com/reciclajeplasticosuam.pdf>

WAUQUIER Jean-Pierre. El refino del petróleo. Petróleo crudo. Productos petrolíferos. Esquemas de fabricación. Editorial Díaz de Santos. Madrid, España. 2004

ZURITA SALTOS Daniel Andréé. Gasificación térmica y catalítica de residuos sólidos de PET. Universidad Central del Ecuador. Quito, Ecuador. Mayo de 2013

ANEXOS

ANEXO A.

CARACTERÍSTICAS DE LA MATERIA PRIMA

Código de identificación de los plásticos.

Resin	Resin Identification Code-Option A	Resin Identification Code-Option B
Poly(ethylene terephthalate)	 1 PETE	 01 PET
High density polyethylene	 2 HDPE	 02 PE-HE
Poly(vinyl chloride)	 3 V	 03 PVC
Low density polyethylene	 4 LDPE	 04 PE-LD
Polypropylene	 5 PP	 05 PP
Polystyrene	 6 PS	 06 PS
Other resins	 7 OTHER	 07 0

Fuente: ASTM D7611 / D7611M-13e1, Standard Practice for Coding Plastic Manufactured Articles for Resin Identification, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org

Muestras de materia prima para el proceso de pirolisis



Muestras de plástico metalizado



Muestras de plástico no metalizado



Lotes de residuos plásticos recolectados



Prueba de cenizas para la materia prima



Humedad en la materia prima



Resultados para la combustión de cada tipo de plástico.

Tipo de plástico	Cantidad y color del humo	Color de la llama	Combustibilidad	Tipo de fusión	pH del humo	olor
PEAD	Muy poco, blanco	Amarilla, centro azul	Continúa ardiendo tras quitar el mechero	Funde rápido y gotea	Neutro	A vela recién apagada
PEBD	Muy poco, blanco	Amarilla, centro azul	Continúa ardiendo tras quitar el mechero	Funde rápido y gotea	Neutro	A vela recién apagada
PP	Sin humo	Amarilla, centro azul	Continúa ardiendo tras quitar el mechero	Funde rápido y gotea	Neutro	Intenso a vela recién apagada
PVC	Bastante blancuzco	Contorno verde	Llama autoextinguible	Se ablanda	Ácido	Intenso, asfixiante
PS	Negro con hollín	Amarilla	Continúa ardiendo tras quitar el mechero	Se vuelve pastoso.	Neutro	Gas natural
PA-6	Muy poco, blanco	Azulada	Se autoextingue, arde mal	Pocas gotas, se descompone, efervescente	Básico	Pelo quemado
POM	Poco humo	Azulada	Continúa ardiendo tras quitar el mechero.	Gotea rápidamente y se descompone	Neutro	Formol
PET	Humo Negro con hollín	Amarillo-anaranjado	Continúa ardiendo tras quitar el mechero.	Gotea	Ácido	Dulzón
PC	Negro	Amarilla	Autoextinguible con el tiempo	Funde y se descompone	Ácido débil	Papel quemado
RF	Blanco	Amarillo, borde azul	Cuesta prender, Autoextinguible con el tiempo	Se carboniza	Neutro	Fenol

Fuente: RODENAS PASTOR Mercedes. Los materiales plásticos en tecnología industrial I. Prácticas de identificación. Diciembre de 2008. Tomado de https://docs.google.com/document/d/1HcvK9slks_S3_KVg2ZRXXALjafE7CVGaWQYmpVWh2i0/edit?pref=2&pli=1

ANEXO B.

DATOS PARA EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO EN LAS PIROLISIS TÉRMICA Y CATALÍTICA

Datos tomados en las pirólisis térmicas

- Pirolisis a 550°C. Carga: 500 g de plástico + 25 g de contaminación

Tiempo(mn)	Tin	tcy4	P(mmH2O)
0	20	26	0
10	119	27	5
20	284	27	5
30	416	28	6
40	498	49	6
50	562	69	9
60	556	77	9
70	550	82	9
80	550	86	9
90	551	88	9
100	551	91	9
110	551	98	9
120	550	100	9
130	550	107	18
140	550	129	18
150	550	152	18
160	550	165	18
170	551	174	18
180	550	177	18
190	550	179	18
200	550	182	18
210	550	181	18
220	550	181	18
230	550	181	18
240	549	180	18

Tiempo(mn)	Tin	tcy4	P(mmH2O)
0	25	32	0
10	61	32	5
20	188	32	5
30	328	32	5
40	440	64	5
50	519	78	10
60	564	84	10
70	553	86	10
80	549	88	11
90	551	89	11
100	550	91	11
110	551	98	11
120	551	111	11
130	550	126	11
140	550	126	11
150	550	132	11
160	551	155	11
170	550	162	11
180	551	170	12
190	550	172	12
200	550	177	12
210	550	177	12
220	550	178	12
230	550	178	12
240	550	180	12

Salida	Gramos	Rendimiento %
Agua	120	22.82
Aceite P	70	13.33
Carbonilla	227	43.24
Gases	108	20.61

Salida	Gramos	Rendimiento %
Agua	100	19.02
Aceite P	113	21.52
Carbonilla	200	38.10
Gases	112	21.37

- Pirolisis a 600 °C. Carga 500 g de plástico + 25 g de contaminación

Tiempo(mn)	Tin	tcy4	P(mmH2O)
0	20	32	0
10	119	32	10
20	285	32	10
30	413	32	10
40	508	68	10
50	588	78	10
60	613	83	11
70	602	87	11
80	600	88	11
90	601	91	16
100	601	119	16
110	600	133	17
120	600	149	17
130	600	158	17
140	600	166	17
150	600	171	17
160	601	177	17
170	600	179	18
180	600	175	18
190	600	175	18
200	600	180	18
210	601	183	21
220	600	189	21
230	600	189	22
240	601	190	23

Tiempo(mn)	Tin	tcy4	P(mmH2O)
0	23	38	0
10	139	38	11
20	278	38	11
30	388	39	13
40	467	54	14
50	529	77	15
60	581	86	17
70	564	90	17
80	554	91	17
90	600	101	17
100	607	122	17
110	597	124	17
120	601	134	17
130	602	160	17
140	599	175	17
150	600	184	17
160	600	186	17
170	600	189	17
180	600	196	17
190	600	200	17
200	599	204	17
210	597	209	17
220	599	212	17
230	603	214	17
240	602	210	17

Salida	Gramos	Rendimiento %
Agua	50	9.51
Aceite P	152	28.95
Carbonilla	126	24.00
Gases	197	37.54

Salida	Gramos	Rendimiento %
Agua	100	19.02
Aceite P	160	30.48
Carbonilla	128	24.38
Gases	137	26.13

- Pirolysis a 650°C. Carga 500 g de plástico + 25 g de contaminación

Tiempo(min)	Tin	tcy4	P(mmH2O)
0	19	21	0
10	79	23	10
20	270	25	10
30	383	27	10
40	480	28	10
50	568	37	11
60	604	42	11
70	639	48	11
80	657	97	17
90	655	112	17
100	651	130	17
110	652	149	17
120	650	164	18
130	650	178	18
140	650	188	18
150	651	196	18
160	650	198	18
170	652	198	18
180	651	196	18
190	650	193	18
200	649	193	17
210	651	193	16
220	650	201	18
230	650	203	17
240	650	203	17

Tiempo(min)	Tin	tcy4	P(mmH2O)
0	19	35	0
10	114	38	10
20	278	38	10
30	395	38	10
40	476	75	10
50	539	77	10
60	580	82	10
70	615	86	10
80	647	91	12
90	657	111	18
100	654	139	18
110	650	143	18
120	651	152	18
130	649	165	18
140	651	175	18
150	650	183	18
160	651	189	18
170	650	194	18
180	649	203	18
190	652	207	18
200	650	210	18
210	650	208	18
220	649	206	18
230	650	202	18
240	650	202	18

Salida	Gramos	Rendimiento %
Agua	50	9.51
Aceite P	184	35.05
Carbonilla	62	11.81
Gases	229	43.64

Salida	Gramos	Rendimiento %
Agua	40	7.61
Aceite P	200	38.10
Carbonilla	67	12.76
Gases	218	41.54

Datos tomados en las pirólisis catalíticas

- Pirolisis a 550°C. Carga: 500 g de plástico + 25 g de contaminación + 50 g de catalizador

Tiempo(min)	Tin	tcy4	P(mmH2O)
0	24	32	0
10	128	33	11
20	298	33	12
30	422	43	14
40	490	73	15
50	551	86	16
60	561	89	16
70	550	89	17
80	549	90	17
90	552	92	17
100	551	96	17
110	550	100	17
120	551	102	17
130	550	108	17
140	550	119	17
150	551	135	17
160	550	143	17
170	549	150	17
180	550	160	17
190	550	176	17
200	550	185	17
210	549	185	17
220	550	186	17
230	550	188	17
240	550	189	17

Tiempo(min)	Tin	tcy4	P(mmH2O)
0	22	25	0
10	97	26	10
20	268	27	10
30	378	28	10
40	473	65	10
50	538	80	10
60	562	86	10
70	550	88	10
80	550	89	10
90	552	90	10
100	550	91	11
110	551	96	11
120	551	106	11
130	550	118	11
140	551	131	11
150	550	140	11
160	549	148	11
170	551	155	11
180	549	163	11
190	550	170	11
200	550	173	12
210	549	178	13
220	550	181	13
230	550	184	13
240	550	184	14

Salida	Gramos	Rendimiento %
Agua	70	13.31
Aceite P	142	27.05
Carbonilla	180	34.29
Gases	133	25.36

Salida	Gramos	Rendimiento %
Agua	70	13.31
Aceite P	151	28.76
Carbonilla	154	29.33
Gases	150	28.59

- Pirolisis a 600°C. Carga 500 g de plástico + 25 g de contaminación + 50 g de catalizador

Tiempo(min)	Tin	tcy4	P(mmH2O)
0	22	34	0
10	95	36	12
20	252	36	12
30	378	36	14
40	476	67	16
50	535	83	16
60	584	89	16
70	612	89	16
80	603	91	16
90	599	97	17
100	600	107	17
110	601	122	18
120	600	131	18
130	598	142	18
140	604	154	18
150	601	168	18
160	600	185	18
170	601	194	18
180	600	200	18
190	600	203	18
200	601	210	18
210	600	213	18
220	600	214	18
230	601	217	18
240	600	217	18

Tiempo(min)	Tin	tcy4	P(mmH2O)
0	26	35	0
10	161	37	11
20	301	37	11
30	415	37	11
40	506	74	13
50	566	82	15
60	580	85	16
70	605	89	16
80	599	89	16
90	601	91	17
100	601	97	17
110	601	112	17
120	600	124	17
130	600	137	17
140	601	148	17
150	600	162	17
160	600	170	17
170	600	173	17
180	601	170	17
190	600	190	17
200	600	198	17
210	600	198	17
220	601	197	17
230	600	197	17
240	599	196	17

Salida	Gramos	Rendimiento %
Agua	50	9.51
Aceite P	157	29.90
Carbonilla	108	20.57
Gases	210	40.02

Salida	Gramos	Rendimiento %
Agua	60	11.41
Aceite P	146	27.81
Carbonilla	105	20.00
Gases	214	40.78

- Pirolisis a 650°C. Carga 500 g de plástico + 25 g de contaminación + 50 g de catalizador

Tiempo(min)	Tin	tcy4	P(mmH2O)
0	17	24	0
10	47	25	10
20	206	27	10
30	341	28	10
40	440	29	10
50	509	67	10
60	569	80	10
70	610	86	11
80	649	88	14
90	657	95	16
100	650	107	16
110	649	128	16
120	652	150	17
130	650	162	17
140	650	175	17
150	650	180	17
160	650	192	17
170	650	197	17
180	650	200	17
190	650	202	18
200	651	204	18
210	649	204	18
220	650	204	18
230	650	205	18
240	651	202	18

Tiempo(min)	Tin	tcy4	P(mmH2O)
0	17	24	0
10	47	25	10
20	206	27	10
30	341	28	10
40	440	29	10
50	509	67	10
60	569	80	10
70	610	86	11
80	649	88	14
90	657	95	16
100	650	107	16
110	649	128	16
120	652	150	17
130	650	162	17
140	650	175	17
150	650	180	17
160	650	192	17
170	650	197	17
180	650	200	17
190	650	202	18
200	651	204	18
210	649	204	18
220	650	204	18
230	650	205	18
240	651	202	18

Salida	Gramos	Rendimiento %
Agua	50	9.51
Aceite P	193	36.76
Carbonilla	73	13.90
Gases	209	39.83

Salida	Gramos	Rendimiento %
Agua	30	5.70
Aceite P	199	37.90
Carbonilla	75	14.29
Gases	221	42.11

ANEXO C.

CARACTERIZACIONES DEL ACEITE PIROLITICO Y EL DIESEL OBTENIDO

Temómetros correspondientes a cada rango de temperatura para la determinación del cloud point.

TERMÓMETRO	RANGO	ASTM	IP
Alto cloud y pour	-38 a 50 °C	5C	1C
Bajo cloud y pour	-80 a 20 °C	6C	2C
Punto medio	32 a 127 °C	61C	63C

Fuente: ARENAS RUEDA Félix, TORRES LOPEZ Mario. Guía de laboratorio de fluidos. Punto de fluidez. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Santander, Colombia. 2009, p 3

Mezclas refrigerantes usadas de acuerdo a la temperatura requerida para la determinación del cloud point

MEZCLAS REFRIGERANTES	TEMPERATURAS ABAJO DE
Hielo y agua.	9 °C
Hielo molido y cristales de cloruro de sodio.	-12 °C
Hielo molido y cristales de cloruro de calcio.	-27 °C
Acetona ó nafta helada con una mezcla hielo-sal para dar la temperatura deseada	-57 °C

Fuente: ARENAS RUEDA Félix, TORRES LOPEZ Mario. Guía de laboratorio de fluidos. Punto de fluidez. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Santander, Colombia. 2009, p 3

Temperaturas de referencia para las lecturas del punto de fluidez.

CRUDO A:	LLEVAR A UN BAÑO MANTENIDO A :
+27 °C	0 °C
+9 °C	-18 °C
-6 °C	-33 °C
-24 °C	-51 °C
-42 °C	-69 °C

Fuente: ARENAS RUEDA Félix, TORRES LOPEZ Mario. Guía de laboratorio de fluidos. Punto de fluidez. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Santander, Colombia. 2009, p 5

Tabla de corrección por temperaturas para determinación de los grados API

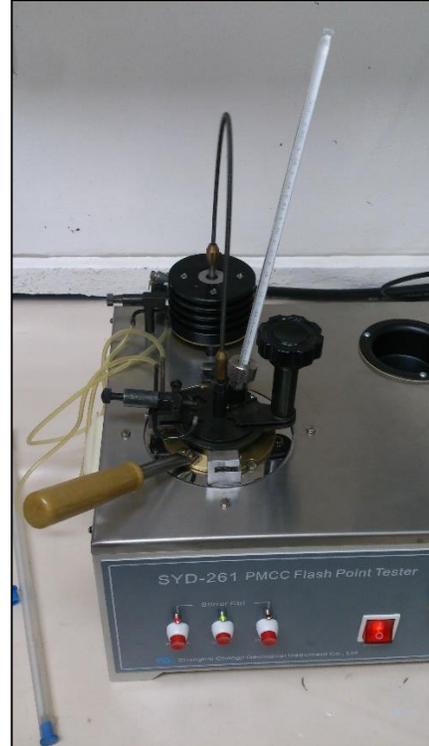
TABLE 5A, GENERALIZED CRUDE OILS
API CORRECTION TO 60 F

TEMP. F	48.0	48.1	48.2	48.3	48.4	48.5	48.6	48.7	48.8	48.9	TEMP. F
API GRAVITY AT OBSERVED TEMPERATURE CORRESPONDING API GRAVITY AT 60 F											
50	49.0	49.1	49.2	49.3	49.4	49.5	49.6	49.7	49.8	49.9	50
51	48.9	49.0	49.1	49.2	49.3	49.4	49.5	49.6	49.7	49.8	51
52	48.8	48.9	49.0	49.1	49.2	49.3	49.4	49.5	49.6	49.7	52
53	48.7	48.8	48.9	49.0	49.1	49.2	49.3	49.4	49.5	49.6	53
54	48.6	48.7	48.8	48.9	49.0	49.1	49.2	49.3	49.4	49.5	54
55	48.5	48.6	48.7	48.8	48.9	49.0	49.1	49.2	49.3	49.4	55
56	48.4	48.5	48.6	48.7	48.8	48.9	49.0	49.1	49.2	49.3	56
57	48.3	48.4	48.5	48.6	48.7	48.8	48.9	49.0	49.1	49.2	57
58	48.2	48.3	48.4	48.5	48.6	48.7	48.8	48.9	49.0	49.1	58
59	48.1	48.2	48.3	48.4	48.5	48.6	48.7	48.8	48.9	49.0	59
60	48.0	48.1	48.2	48.3	48.4	48.5	48.6	48.7	48.8	48.9	60
61	47.9	48.0	48.1	48.2	48.3	48.4	48.5	48.6	48.7	48.8	61
62	47.8	47.9	48.0	48.1	48.2	48.3	48.4	48.5	48.6	48.7	62
63	47.7	47.8	47.9	48.0	48.1	48.2	48.3	48.4	48.5	48.6	63
64	47.6	47.7	47.8	47.9	48.0	48.1	48.2	48.3	48.4	48.5	64
65	47.5	47.6	47.7	47.8	47.9	48.0	48.1	48.2	48.3	48.4	65
66	47.4	47.5	47.6	47.7	47.8	47.9	48.0	48.1	48.2	48.3	66
67	47.3	47.4	47.5	47.6	47.7	47.8	47.9	48.0	48.1	48.2	67
68	47.2	47.3	47.4	47.5	47.6	47.7	47.8	47.9	48.0	48.1	68
69	47.1	47.2	47.3	47.4	47.5	47.6	47.7	47.8	47.9	48.0	69
70	47.0	47.1	47.2	47.3	47.4	47.5	47.6	47.7	47.8	47.9	70
71	46.9	47.0	47.1	47.2	47.3	47.4	47.5	47.6	47.7	47.8	71
72	46.8	46.9	47.0	47.1	47.2	47.3	47.4	47.5	47.6	47.7	72
73	46.7	46.8	46.9	47.0	47.1	47.2	47.3	47.4	47.5	47.6	73
74	46.6	46.7	46.8	46.9	47.0	47.1	47.2	47.3	47.4	47.5	74
75	46.5	46.6	46.7	46.8	46.9	47.0	47.1	47.2	47.3	47.4	75
76	46.4	46.5	46.6	46.7	46.8	46.9	47.0	47.1	47.2	47.3	76
77	46.3	46.4	46.5	46.6	46.7	46.8	46.9	47.0	47.1	47.2	77
78	46.2	46.3	46.4	46.5	46.6	46.7	46.8	46.9	47.0	47.1	78
79	46.1	46.2	46.3	46.4	46.5	46.6	46.7	46.8	46.9	47.0	79
80	46.0	46.1	46.2	46.3	46.4	46.5	46.6	46.7	46.8	46.9	80
81	45.9	46.0	46.1	46.2	46.3	46.4	46.5	46.6	46.7	46.8	81
82	45.8	45.9	46.0	46.1	46.2	46.3	46.4	46.5	46.6	46.7	82
83	45.7	45.8	45.9	46.0	46.1	46.2	46.3	46.4	46.5	46.6	83
84	45.6	45.7	45.8	45.9	46.0	46.1	46.2	46.3	46.4	46.5	84
85	45.5	45.6	45.7	45.8	45.9	46.0	46.1	46.2	46.3	46.4	85
86	45.4	45.5	45.6	45.7	45.8	45.9	46.0	46.1	46.2	46.3	86
87	45.3	45.4	45.5	45.6	45.7	45.8	45.9	46.0	46.1	46.2	87
88	45.2	45.3	45.4	45.5	45.6	45.7	45.8	45.9	46.0	46.1	88
89	45.1	45.2	45.3	45.4	45.5	45.6	45.7	45.8	45.9	46.0	89
90	45.0	45.1	45.2	45.3	45.4	45.5	45.6	45.7	45.8	45.9	90
91	44.9	45.0	45.1	45.2	45.3	45.4	45.5	45.6	45.7	45.8	91
92	44.8	44.9	45.0	45.1	45.2	45.3	45.4	45.5	45.6	45.7	92
93	44.7	44.8	44.9	45.0	45.1	45.2	45.3	45.4	45.5	45.6	93
94	44.6	44.7	44.8	44.9	45.0	45.1	45.2	45.3	45.4	45.5	94
95	44.5	44.6	44.7	44.8	44.9	45.0	45.1	45.2	45.3	45.4	95
96	44.4	44.5	44.6	44.7	44.8	44.9	45.0	45.1	45.2	45.3	96
97	44.3	44.4	44.5	44.6	44.7	44.8	44.9	45.0	45.1	45.2	97
98	44.2	44.3	44.4	44.5	44.6	44.7	44.8	44.9	45.0	45.1	98
99	44.1	44.2	44.3	44.4	44.5	44.6	44.7	44.8	44.9	45.0	99
100	44.0	44.1	44.2	44.3	44.4	44.5	44.6	44.7	44.8	44.9	100

API GRAVITY = 48.0 TO 48.9

* DENOTES EXTRAPOLATED VALUE

Especificaciones del equipo Pensky Martens para la determinación del Flash Point.



Equipo Pensky Martens de copa cerrada referencia SYD – 261

Equipo	
Fuente de Alimentacion	AC (220 ±10%) V, 50 Hz
Potencia	0 a 600 W
Velocidad de calentamiento	1 a 2 °C/min, controlable y ajustable
Agitación	Mezclador eléctrico, motor con eje.
Tamaño del motor	8 * 40 mm
Taza de aceite estandar	
Diámetro interior	50.8 mm
Profundidad	56 mm
Profundidad de la línea de capacidad	34.2 mm
Capacidad de aceite	70 mL
Termómetro	
Material	Vidrio
Fluido	Mercurio
Unidades	Grados centigrados (°C)
Escala 1	100 a 300 °C

Termómetros para análisis de cloud point según norma ASTM D 2500

Thermometer	Temperature Range	Thermometer Number	
		ASTM	IP
High cloud and pour	-38 to +50°C	5C	1C
Low cloud and pour	-80 to +20°C	6C	2C

Fuente: ASTM D2500-16, Standard Test Method for Cloud Point of Petroleum Products, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org

Temperatura de los baños de enfriamiento de acuerdo a las temperaturas de la muestra.

TABLE 1 Bath and Sample Temperature Ranges

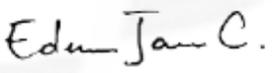
Bath	Bath Temperature Setting, °C	Sample Temperature Range, °C
1	0 ± 1.5	Start to 9
2	-18 ± 1.5	9 to -6
3	-33 ± 1.5	-6 to -24
4	-51 ± 1.5	-24 to -42
5	-69 ± 1.5	-42 to -60

Fuente: ASTM D2500-16, Standard Test Method for Cloud Point of Petroleum Products, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org

Resultados de la prueba de contenido de azufre en el crudo entregados por PROASEM

		LABORATORIO DE ENSAYOS FÍSICOQUÍMICOS PROASEM S.A.								
NIT: 830.087219-0										
SEDE: BARRANCABERMEJA INFORME DE RESULTADOS										
INFORME No: B-LAB-1005005244-0			FECHA DE INFORME: 2010-05-10							
ID MUESTRA: CLIENTE: CONTACTO/CORREO: GRUPO TIPO MUESTRA: TIPO MUESTRA: TANQUE: LOTE: CENTRO:	031605005244 Carol Ortiz Rodriguez carol.ortiz@estudiantes.uamerica.edu.co TANQUE COMPUESTA Crudo Fundaci Universidad Amica Fundación Universidad América	FECHA DE MUESTREO: HORA DE MUESTREO: FECHA RECIBIDO: HORA DE RECIBIDO: DIRECCIÓN DEL CLIENTE: PRODUCTO: TIPO DE ANÁLISIS: MUESTRA TOMADA POR:	2010-05-11 15:00 2010-05-10 00:00 Bogotá CRUDO Basico Carol Ortiz							
PARÁMETRO		UNIDAD	MÉTODO DE ANÁLISIS	RESULTADO DE ANÁLISIS	OBSERVACIÓN	ESPECIFICACIONES				
Azufre (%)		%masa	ASTM D4294	0.025	Cumple	<table border="1"> <tr> <td style="text-align: center;">Mínimo</td> <td style="text-align: center;">Máximo</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Reportar</td> <td style="text-align: center;">Reportar</td> </tr> </table>	Mínimo	Máximo	Reportar	Reportar
Mínimo	Máximo									
Reportar	Reportar									
Los resultados del presente informe son válidos únicamente para la muestra analizada y no deberán ser reproducidos ni asignados a otra muestra.										
COMENTARIOS: Crudo obtenido a partir de despolimerización de residuos plásticos.										
										
Aprobado por: Ederson Jaimes Cuberos Tarjeta Profesional: PQ 3219 Jefe de Laboratorio										
Calle 120 N° 45A-32 - Teléfonos: 612 8239 - 310 888 2899 - 316 484 4539- Email: gerencia@proasem.com - Bogotá, D.C., Colombia Carrera 1 No. 50-02 Sociedad Portuaria - Teléfonos: 3173649028 - Email: labpuerzoberrio@proasem1.com - Puerto Berrio, Colombia Parque Industrial del sol, Bodega 12 Carretera Gaira Km 7 - Teléfono: 318 345 8862 - Email: labsantamarra@proasem1.com - Santa Marta, Colombia Parque Industrial Alpo, Campo 14, Vereda el Centro- Teléfonos: 3168788676 - Email: labbarrancabermeja@proasem1.com - Barrancabermeja, Colombia										

Resultados de la prueba de contenido de azufre en el diésel entregados por PROASEM

		LABORATORIO DE ENSAYOS FISIQUÍMICOS PROASEM S.A.				
NIT: 830.087219-0						
SEDE: BARRANCABERMEJA INFORME DE RESULTADOS						
INFORME No: B-LAB-1005005245-0			FECHA DE INFORME: 2016-05-10			
ID MUESTRA:	031005005245	FECHA DE MUESTREO:	2016-05-11			
CLIENTE:	Carol Ortiz Rodriguez	HORA DE MUESTREO:	15:00			
CONTACTO/CORREO:	carol.ortiz@estudiantes.uamerica.edu.co	FECHA RECIBIDO:	2016-05-10			
GRUPO TIPO MUESTRA:	TANQUE	HORA DE RECIBIDO:	09:10			
TIPO MUESTRA:	COMPUESTA	DIRECCIÓN DEL CLIENTE:	Bogotá D.C.			
TANQUE:	diésel	PRODUCTO:	ACPM ECOLOGICO			
LOTE:	Diésel	TIPO DE ANÁLISIS:	Basico			
CENTRO:	Fundación Universidad América	MUESTRA TOMADA POR:	Carol Ortiz			
PARÁMETRO	UNIDAD	MÉTODO DE ANÁLISIS	RESULTADO DE ANÁLISIS	OBSERVACIÓN	ESPECIFICACIONES	
					Mínimo	Máximo
Azufre (ppm)	ppm	ASTM D2022	338	No Cumple		50
Los resultados del presente informe son válidos únicamente para la muestra analizada y no deberán ser reproducidos ni asignados a otra muestra.						
COMENTARIOS: Diésel, producto destilado del aceite pirolítico.						
						
Aprobado por: Ederson Jaimes Cuberos Tarjeta Profesional: PQ 3218 Jefe de Laboratorio						
Calle 120 N° 45A-32 • Teléfonos: 612 8239 - 310 888 2899 - 316 464 4539 • Email: gerencia@proasem.com • Bogotá, D.C., Colombia Carrera 1 No. 50-02 Sociedad Portuaria • Teléfonos: 3173649028 • Email: labpuertoberrio@proasem1.com • Puerto Berrio, Colombia Parque Industrial del sol, Bodega 12 Carretera Gaira Km 7 • Teléfono: 318 345 6662 • Email: labsantamarta@proasem1.com • Santa Marta, Colombia Parque Industrial Alpo, Campo 14, Vereda el Centro • Teléfonos: 3188788676 • Email: labbarrancabermeja@proasem1.com • Barrancabermeja, Colombia						

Clasificación de la corrosión sobre el cobre

Clasificación de la corrosión sobre cobre		
Clasificación	Designación	Descripción (*)
Lámina recientemente pulida	-----	(**)
1	Ligeramente manchada	a) Naranja claro, casi igual a la tira inicial b) Naranja oscuro
2	Moderadamente manchada	a) Rojo guinda b) Lila c) Multicoloreado con lila azulado o plateado sobre fondo guinda d) Plateado e) Bronceado o dorado
3	Manchado oscuro	a) Violeta oscuro sobre fondo bronceado b) Multicoloreado mostrando pintitas rojas y verdes pero no grises
4	Corrosión	a) Negro transparente, gris oscuro o marrón con pintitas verdes solamente b) Negro grafito o negro mate c) Negro brillante o azabache

Fuente: UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL. Análisis de productos derivados del petróleo. Rosario, Argentina. 2014, p 13

Prueba de corrosión en lámina de cobre



Desecador para la determinación de la prueba de carbón



Mufla para determinación de contenido de cenizas



Prueba de cenizas para el Diesel



Prueba de carbón Conradson



Curva de destilación atmosférica ASTM D86 para diésel.



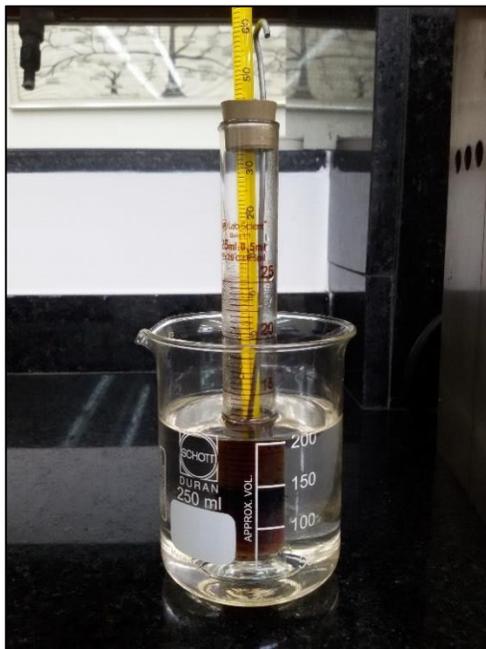
Prueba de pour point para el diésel



Equipo para la determinación de viscosidad Saybolt



Prueba de punto de anilina



Prueba de número de neutralización



Centrifuga para sedimentos



Especificaciones técnicas para la Centrifuga de Sobremesa Rotanta 460R

Características técnicas	
Tipo	Sobremesa
Capacidad máxima	4 x 750 ml
RPM máxima	15.000/min
RFC máxima	24400 dependiendo del rotor
Duración	1s a 99min
Temperatura de trabajo	-20 a 40°C
Dimensiones	
Ancho	770 mm
Altura	456 mm
Fondo	707 mm
Consumo eléctrico	1800 W
Conexión eléctrica	230 V, 50/60 Hz
Peso neto	52 kg

Prueba de sedimentos para el crudo



Prueba de contenido de agua



Prueba de viscosidad para el diésel



ANEXO D.

DIAGRAMAS DE PROCESO PARA CADA UNA DE LAS CARACTERIZACIONES

Diagrama de proceso para determinar el contenido de humedad en la materia prima

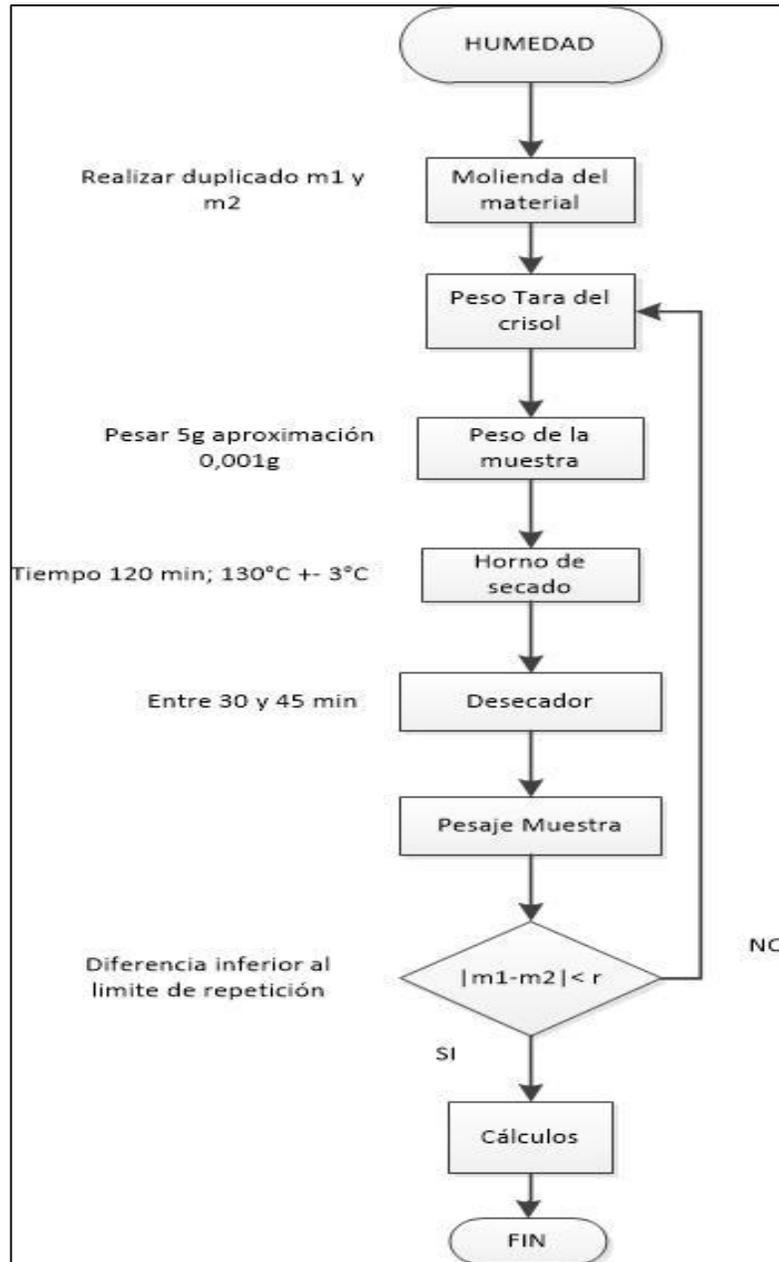


Diagrama de proceso para determinar el contenido de cenizas en la materia prima

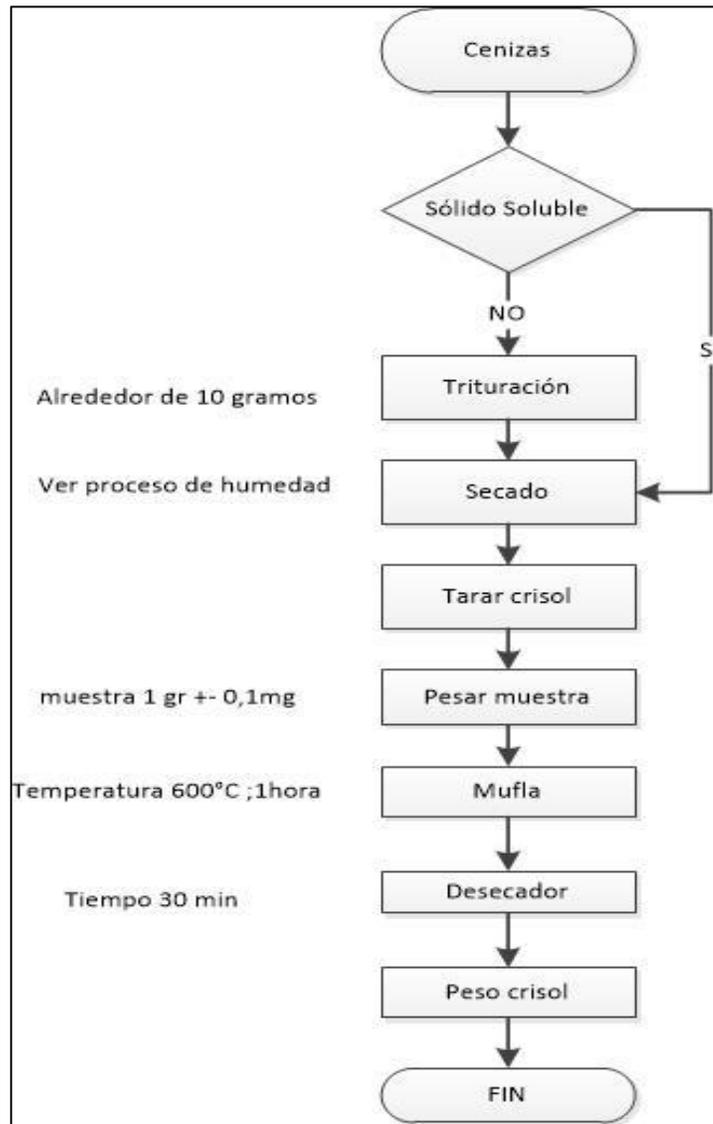


Diagrama de proceso para identificar los tipos de plástico por combustión

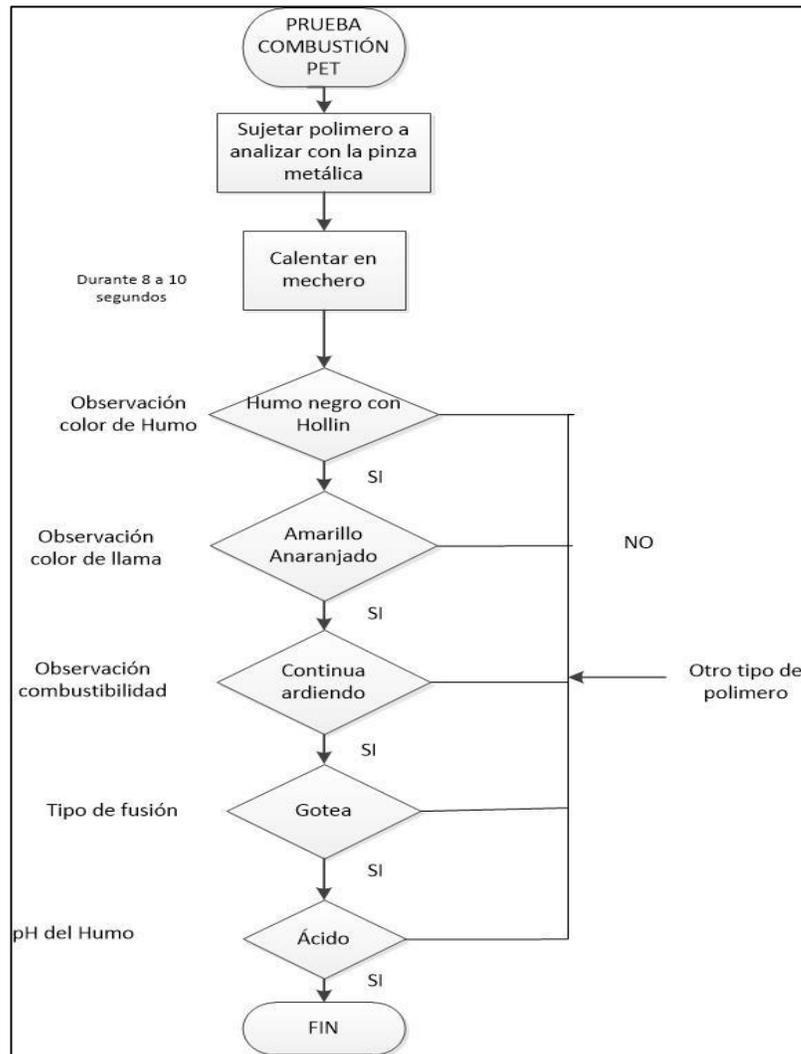


Diagrama de proceso para determinar la densidad específica del crudo de acuerdo a la norma ASTM D1298

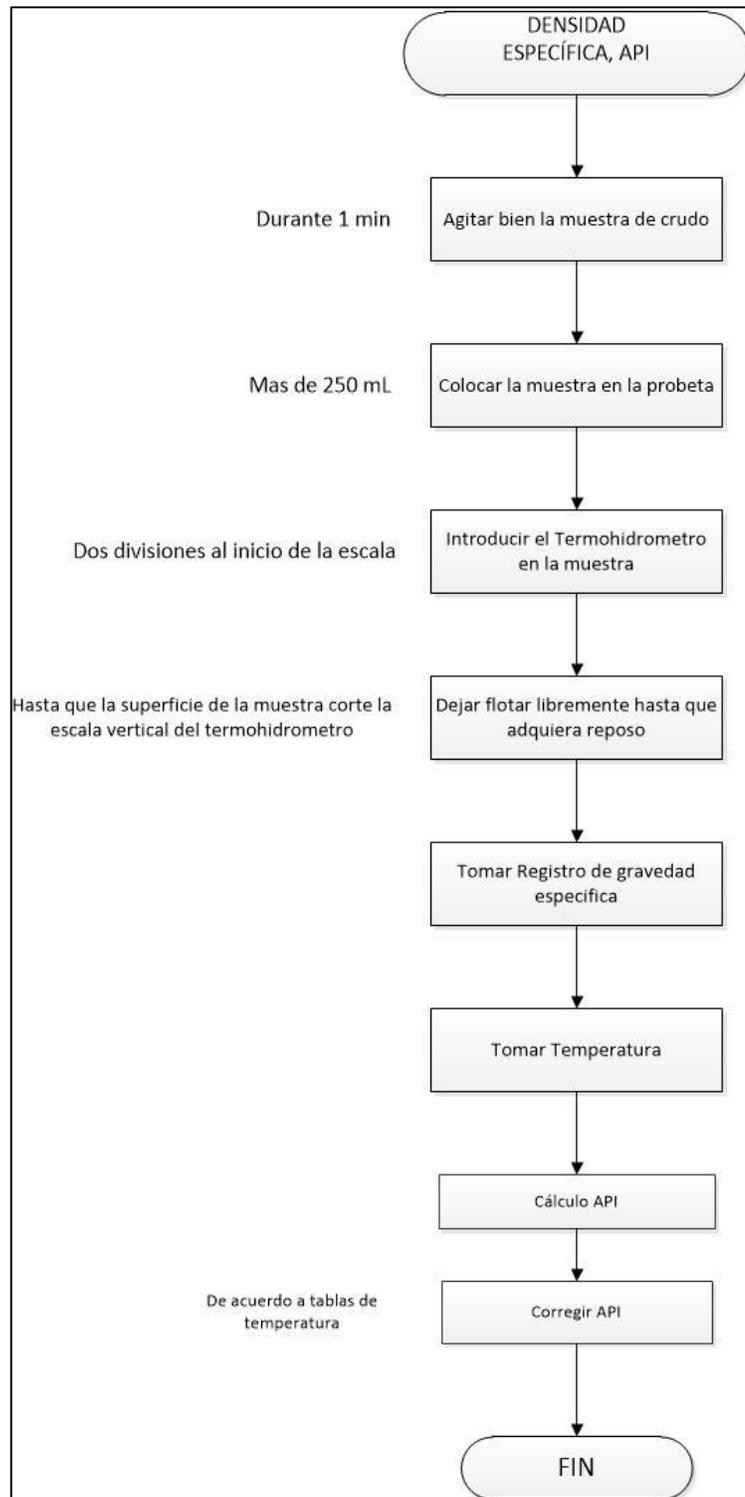


Diagrama de proceso para determinar el contenido de sedimentos en el crudo según la norma ASTM D4007

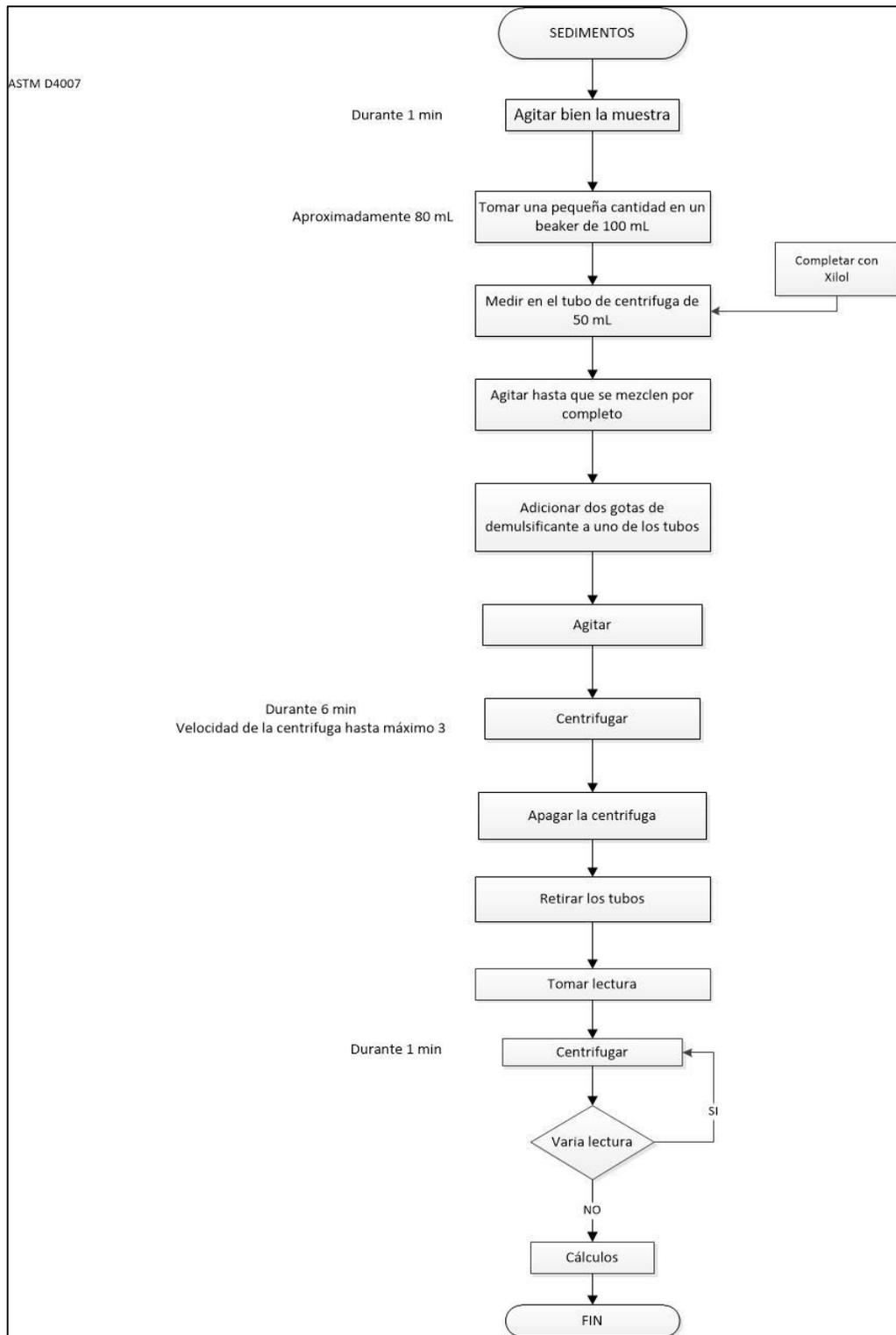


Diagrama de proceso para determinar el contenido de agua según la norma ASTM D4006

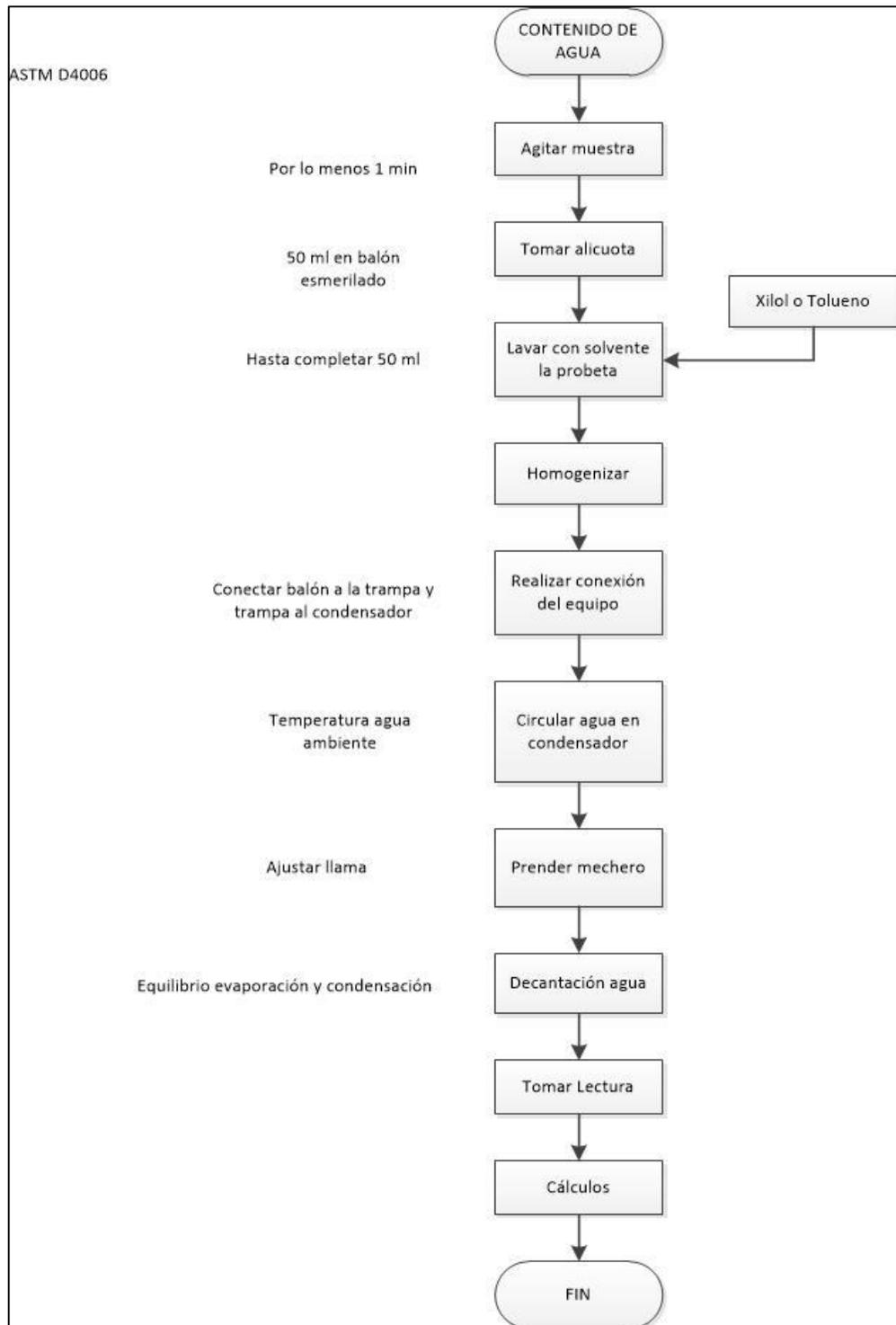


Diagrama de proceso para la determinación del punto de fluidez de acuerdo a la norma ASTM D97

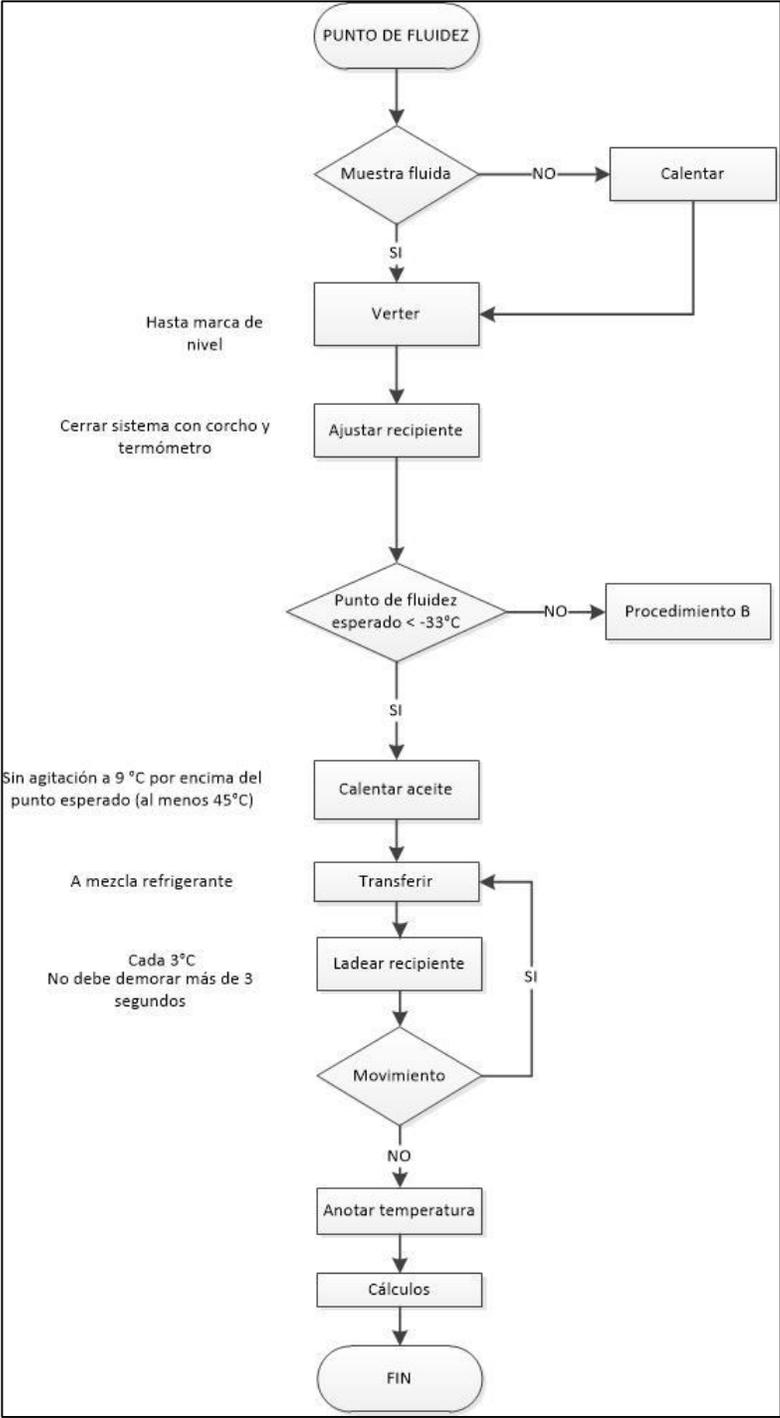


Diagrama de proceso para la determinación del punto de anilina según la norma ASTM D611

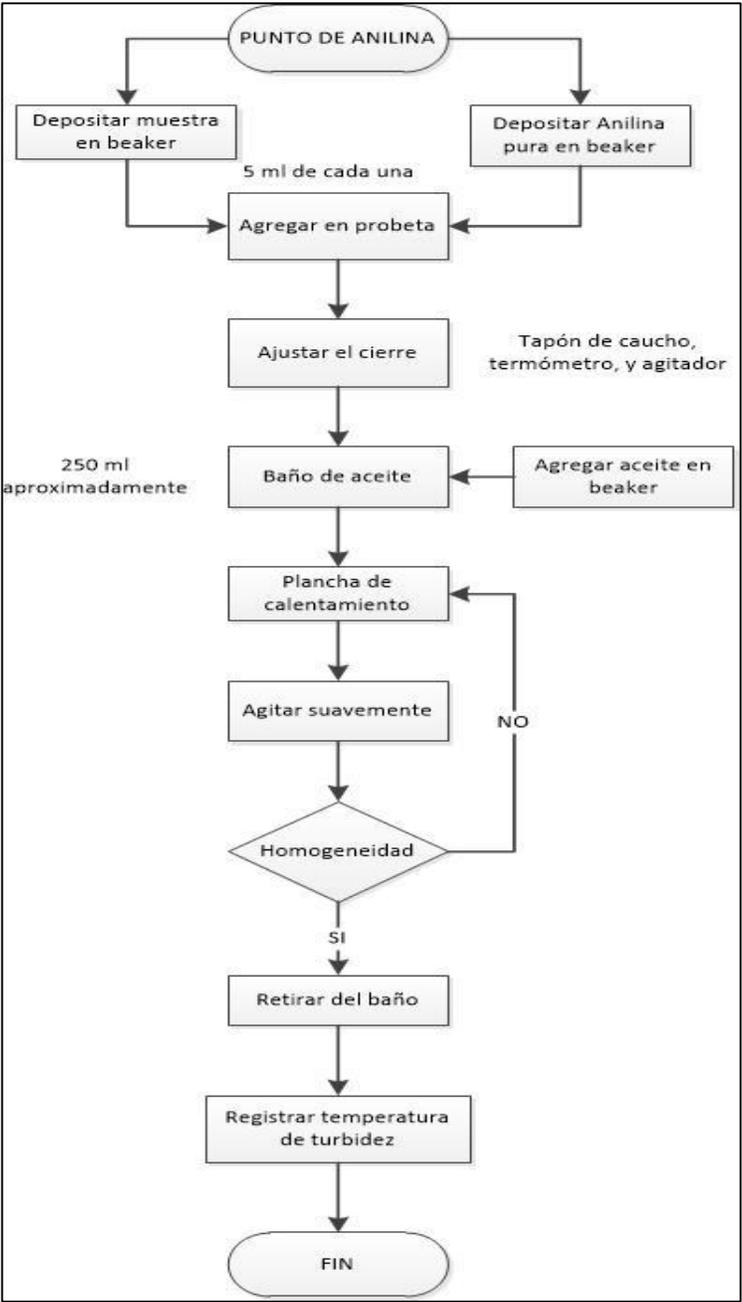


Diagrama de proceso para la determinación del índice de refracción según la norma ASTM D1218

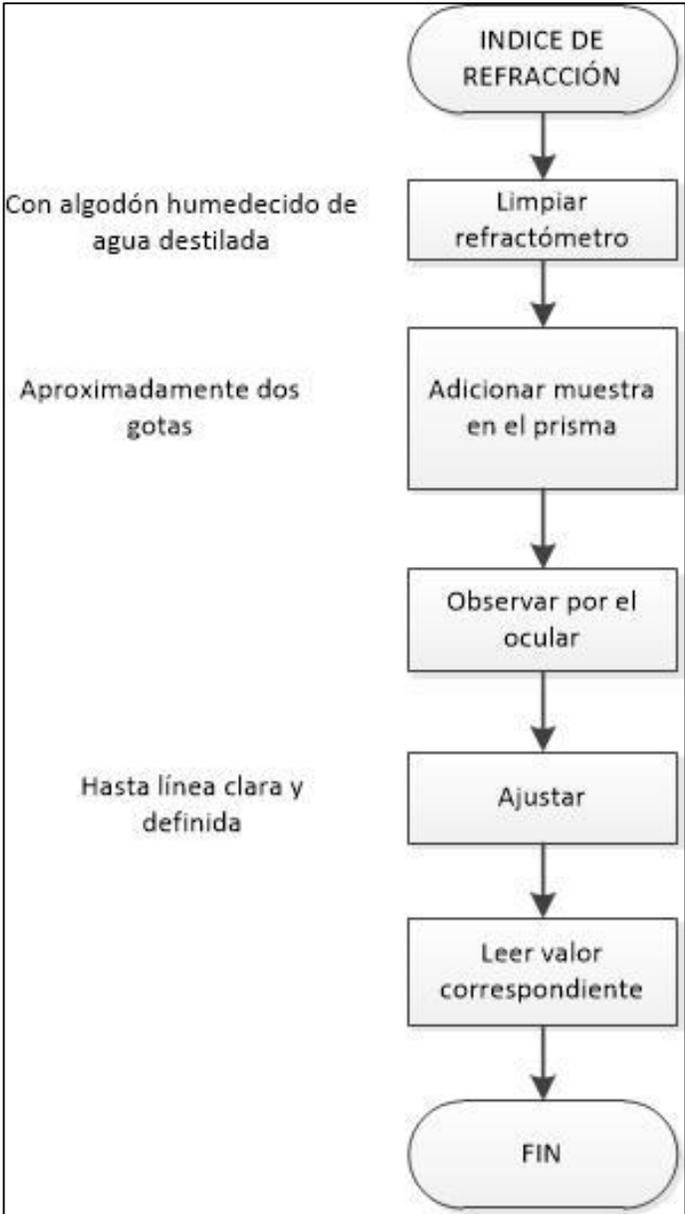


Diagrama de proceso para la determinación del índice de bromo según la norma ASTM D1159

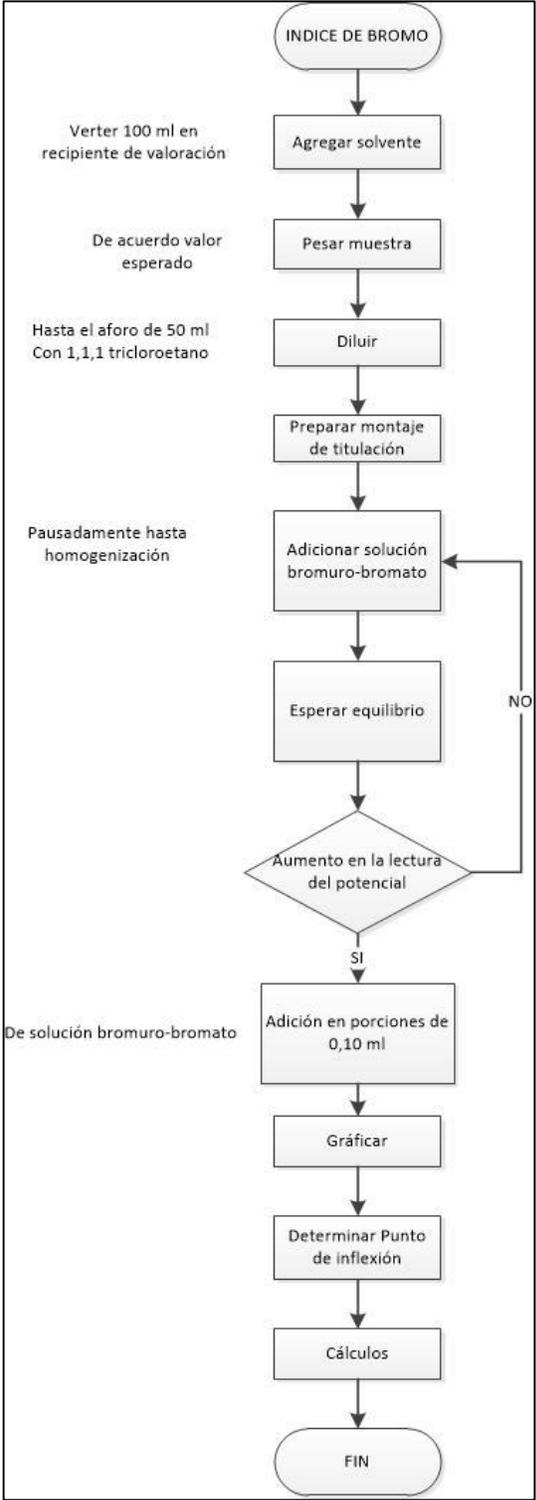


Diagrama de proceso para la determinación del número de neutralización según la norma ASTM D974

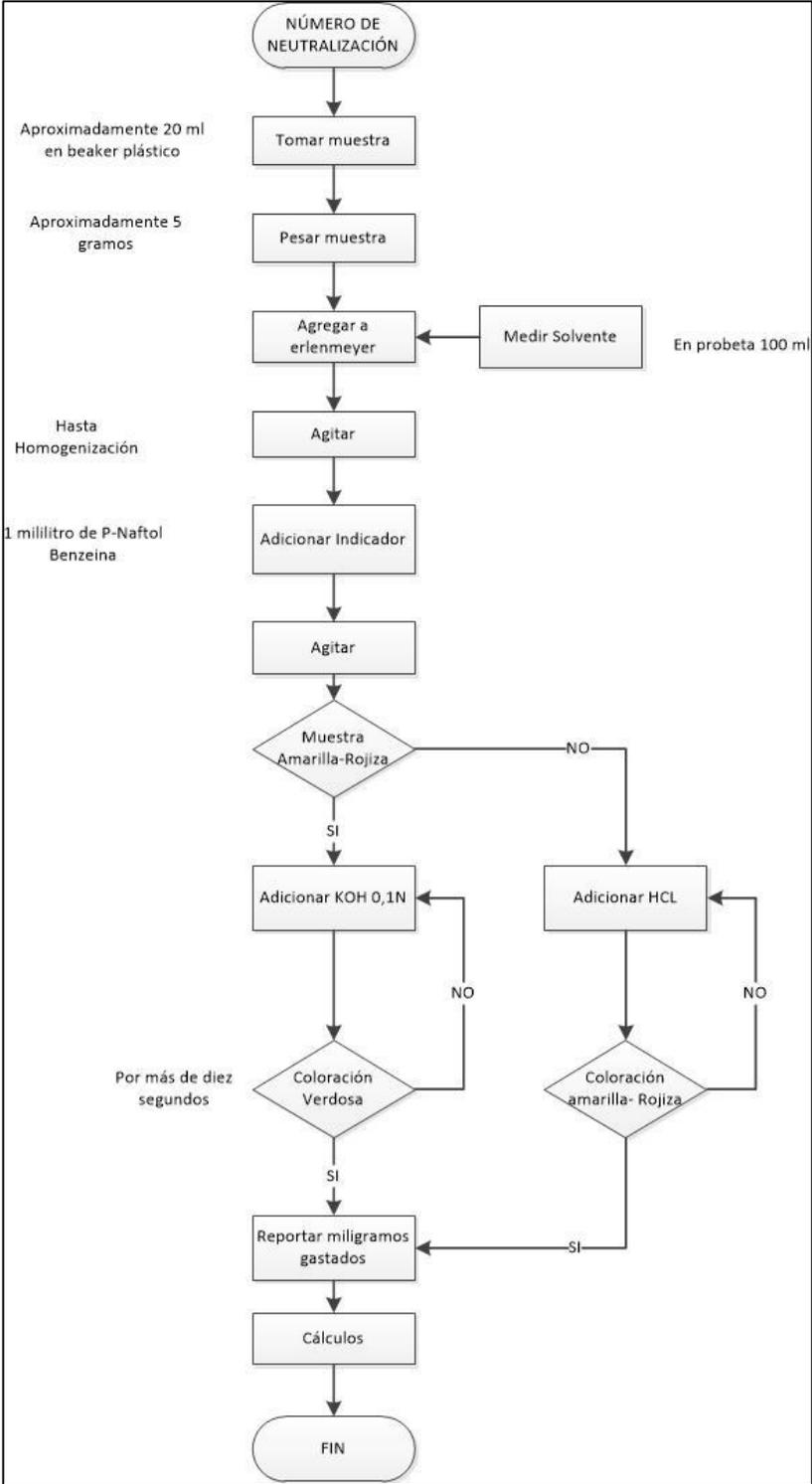


Diagrama de proceso para la determinación de la viscosidad de acuerdo a la norma ASTM D88

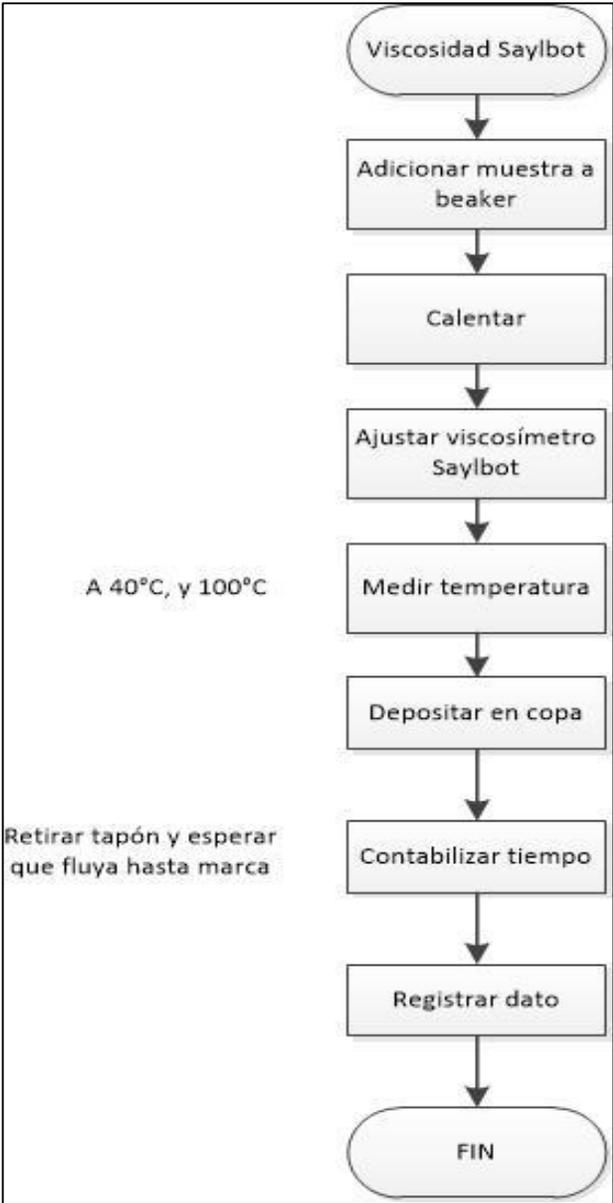


Diagrama de proceso para la determinación del flash point de acuerdo a la norma ASTM D93

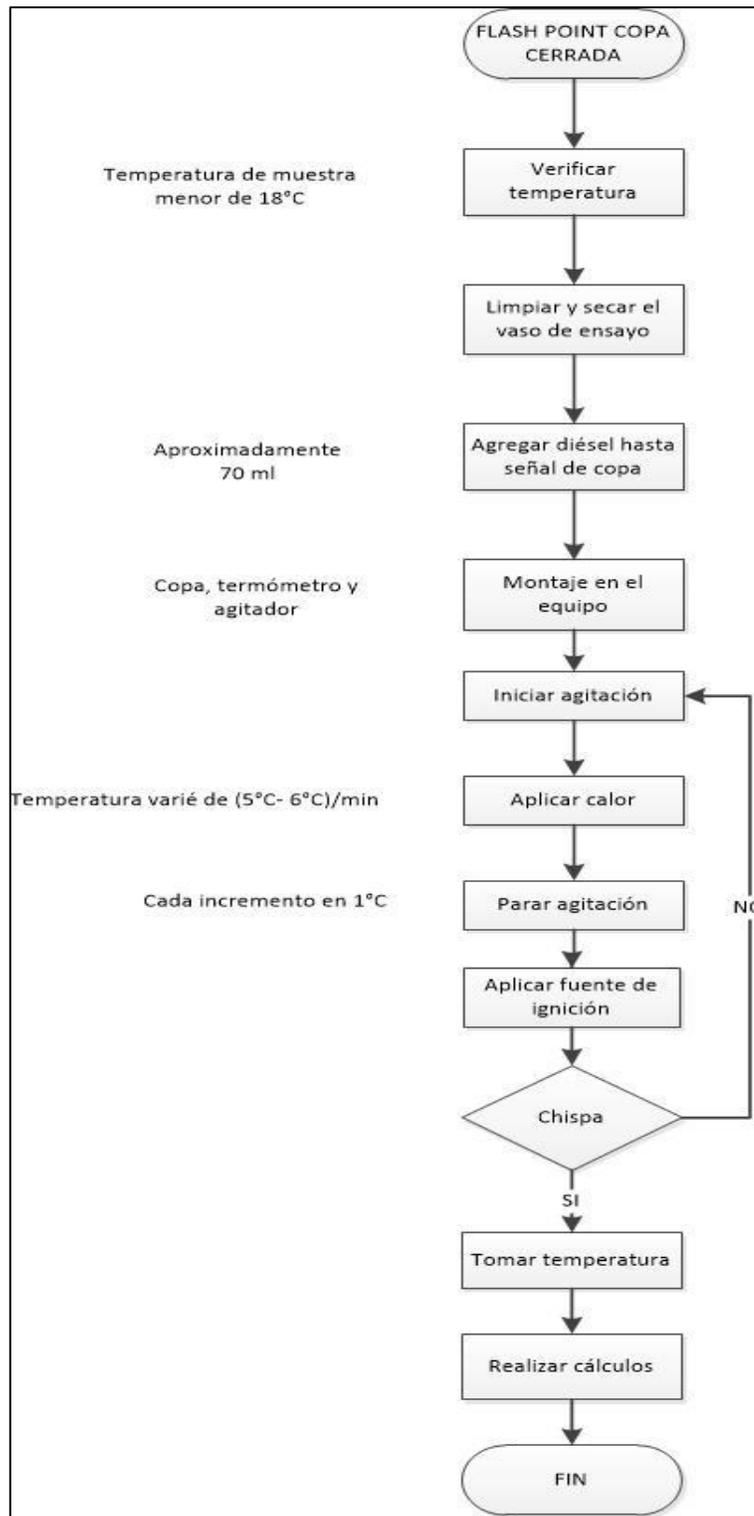


Diagrama de proceso para la determinación del cloud point de acuerdo a la norma ASTM D2500

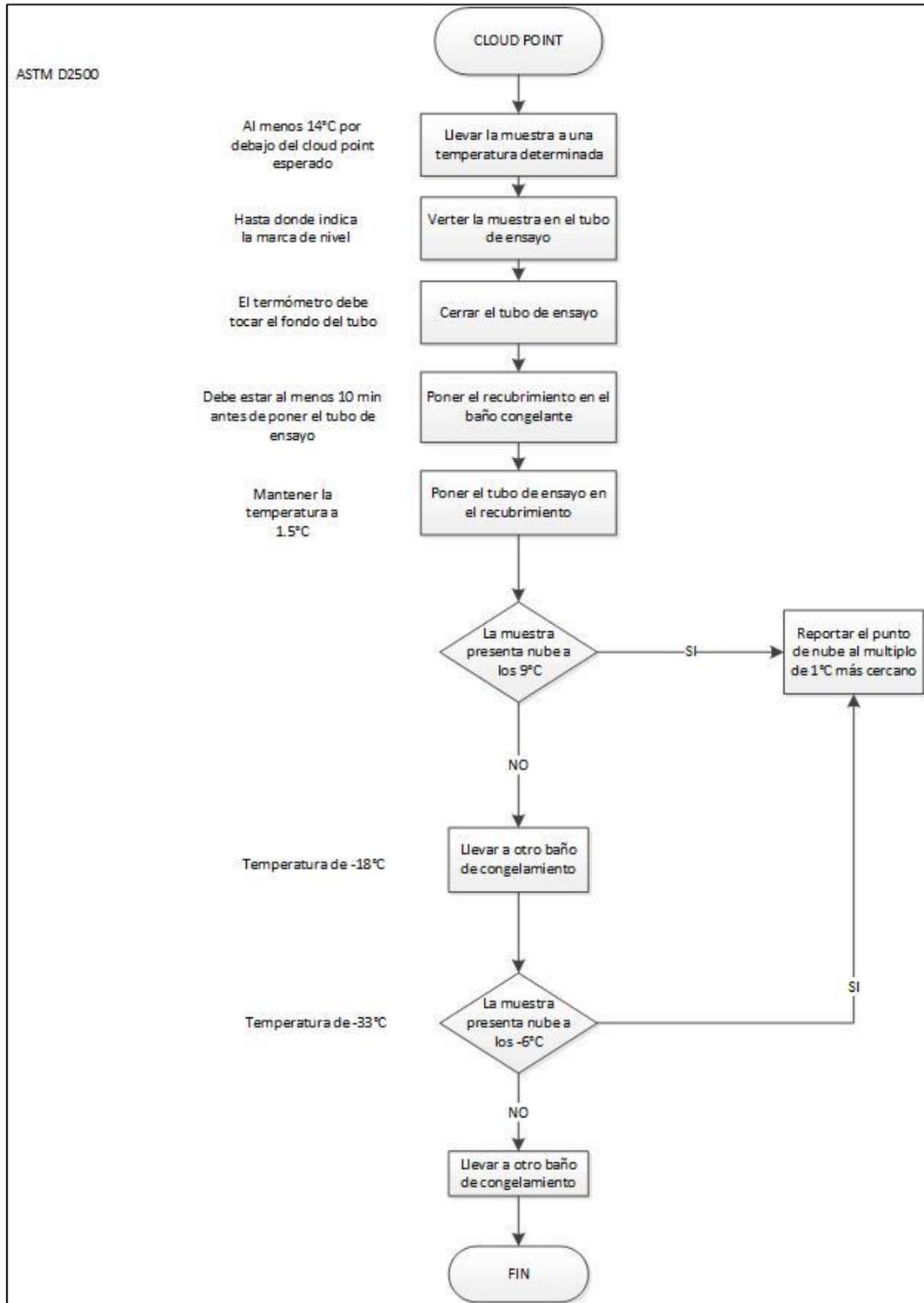


Diagrama de proceso para la prueba de carbón Conradson de acuerdo a la norma ASTM D189

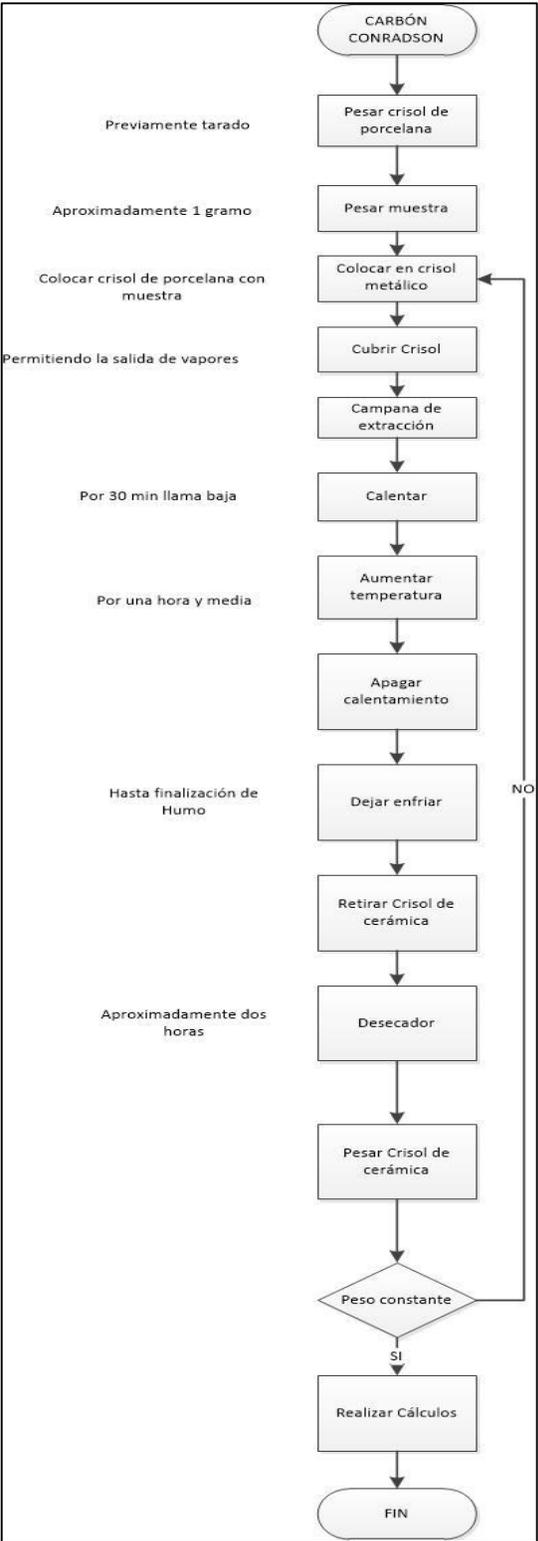


Diagrama de proceso para la determinación del contenido de cenizas según la norma ASTM D482

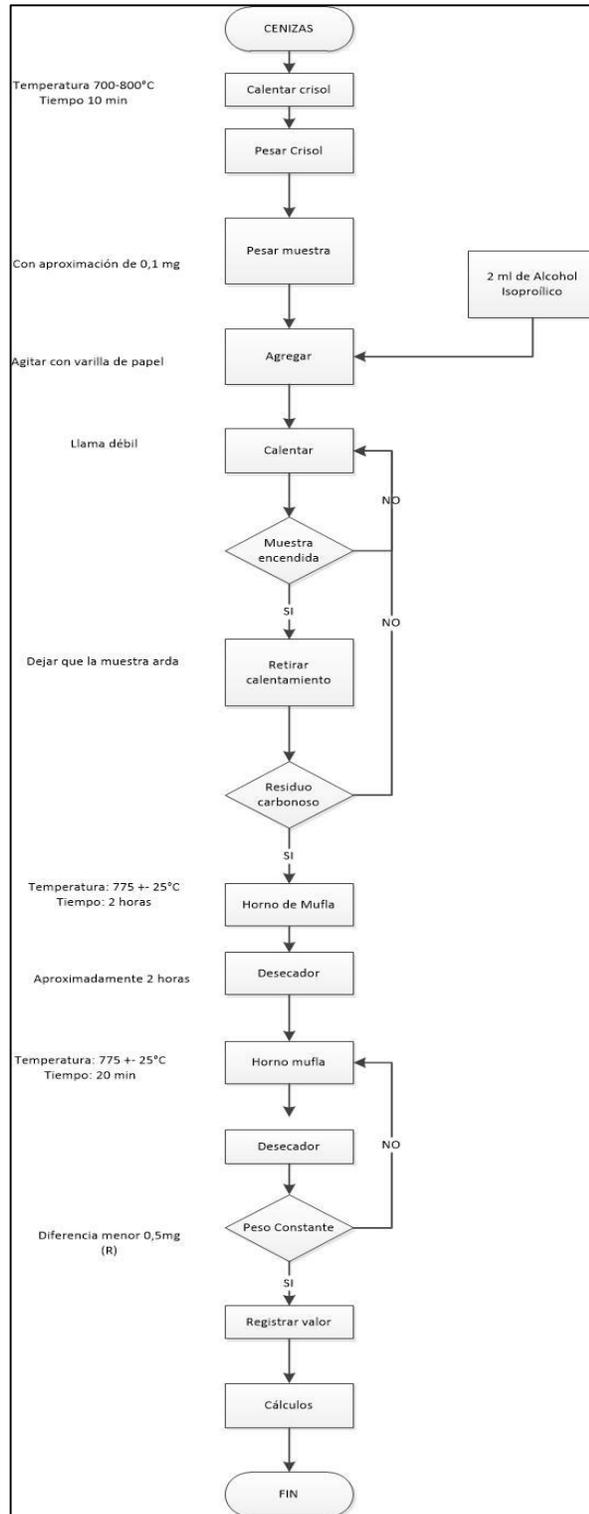


Diagrama de proceso para la prueba de corrosión en lámina de cobre según la norma ASTM D130.

