

EVALUACIÓN DE LA OBTENCIÓN DE DIÉSEL A NIVEL LABORATORIO
MEDIANTE PIRÓLISIS A PARTIR DE RESIDUOS PLÁSTICOS PROVENIENTES
DEL PROCESO DE EMPACADO EN LA EMPRESA ATLANTIC FS S.A.S.

ANGIE KATHERINE MORENO TORRES
PAULA CRISTINA SÁENZ CASTAÑEDA

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2018

EVALUACIÓN DE LA OBTENCIÓN DE DIÉSEL A NIVEL LABORATORIO
MEDIANTE PIRÓLISIS A PARTIR DE RESIDUOS PLÁSTICOS PROVENIENTES
DEL PROCESO DE EMPACADO EN LA EMPRESA ATLANTIC FS S.A.S.

ANGIE KATHERINE MORENO TORRES
PAULA CRISTINA SÁENZ CASTAÑEDA

Proyecto integral de grado para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO

Director
Gerardo Sierra
Ingeniero de Alimentos

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2018

Nota de aceptación:

Diego Rodríguez

Felipe Correa

Alexander López

Bogotá D.C., agosto 2018

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 DÍAZ-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Decano de la Facultad de Ingenierías

Dr. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa de Ingeniería Química

Dr. LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIÉRREZ

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

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a mi mamá, quien me ha apoyado a lo largo de mi vida y me ha enseñado que es necesario actuar con esfuerzo y pasión para lograr nuestros sueños.

A Sebastián, que siempre se ha esforzado por colaborar en todo lo que he necesitado y me ha brindado su amor incondicional.

A mi abuela, mi madrina y Cristina, porque sin ellas no hubiese podido llegar hasta acá.

A todas las personas que de una u otra manera me enriquecieron personal y profesionalmente para hacer de mí la persona que soy ahora.

Paula Cristina Sáenz Castañeda

DEDICATORIA

Primero agradezco a Dios, por haberme permitido llegar a este punto.

A mis padres, por darme el amor, la confianza y el apoyo incondicional durante este proceso.

A mis abuelos, por siempre estar ahí confortándome con sus grandes consejos.

A mi compañera de trabajo, por su paciencia y apoyo desde el momento que la conocí.

A cada una de las personas que hicieron parte de mi formación profesional, pues con ellos sigo en construcción como persona

Angie Katherine Moreno Torres

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al ingeniero Pablo Reyes por permitirnos desarrollar este trabajo en la empresa.

Al ingeniero Gerardo Sierra por colaborarnos con la obtención del material y estar pendiente del desarrollo del trabajo.

Al doctor Felipe Calderón Sáenz, por permitirnos el uso de sus laboratorios y colaborarnos con todos los aspectos técnicos.

A Teresa Martínez por enseñarnos con paciencia y estar pendiente de lo que fuese necesario para llevar a cabo la fase experimental.

A todos aquellos amigos y familiares que estuvieron aportando para el desarrollo de este trabajo.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	27
OBJETIVOS	28
1. CARACTERIZACIÓN DE PLÁSTICOS	29
1.1 PLÁSTICOS	29
1.1.1 Tipos de plástico.	30
1.1.1.1 Polietileno (PE).	30
1.1.1.2 Polipropileno (PP).	31
1.1.1.3 Poliamida (PA).	32
1.1.2 Plásticos multicapa.	32
1.2 PRUEBAS DE IDENTIFICACIÓN DE PLÁSTICOS	33
2. RECICLAJE DE RESIDUOS PLÁSTICOS POR PIRÓLISIS	36
2.1 MÉTODOS DE RECICLAJE PARA EL PLÁSTICO	36
2.1.1 Pirólisis.	39
2.1.1.1 Pirólisis térmica.	41
2.1.1.2 Pirólisis catalítica.	42
3. IDENTIFICACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS DE LA EMPRESA	44
3.1 RESIDUOS SÓLIDOS PLÁSTICOS DE LA EMPRESA	44
3.1.1 Recolección y pretratamiento de la materia prima.	45
3.2 PRUEBAS DE IDENTIFICACIÓN DE PLÁSTICOS RECOLECTADOS	45
3.2.1 Aspecto físico.	48
3.2.2 Prueba beilstein.	48
3.2.3 Efectos del calor.	49
3.2.4 Punto de fusión.	50
3.2.5 Solubilidad.	50
4. RECICLAJE POR PIRÓLISIS DE LOS RESIDUOS PLÁSTICOS RECOLECTADOS	52
4.1 EQUIPOS USADOS PARA EL RECICLAJE QUÍMICO	52
4.1.1 Marmita.	54
4.1.2 Condensador en húmedo.	54
4.1.3 Tea.	55
4.1.4 Manómetro tipo U.	56
4.1.5 Controlador de temperatura.	56
4.1.6 Termocupla.	57
4.1.7 Tubos y empaques.	57

4.2 IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN	58
4.2.1 Variables controladas.	58
4.2.1.1 Cantidad de materia prima.	58
4.2.1.2 Tiempo de residencia.	58
4.2.1.3 Factores.	60
4.2.2 Variables no controladas.	63
4.2.3 Variables dependientes.	63
4.2.3.1 Variable respuesta.	63
4.3 EFECTO DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN EN EL RENDIMIENTO DE ACEITE PIROLÍTICO	63
4.3.1 Hipótesis.	64
4.3.2 Diseño de experimentos.	65
4.3.3 Análisis estadístico de los datos.	67
4.3.4 Ajuste de datos experimentales a un modelo de regresión lineal.	68
4.4 RENDIMIENTO DE CARBONILLA Y CONVERSIÓN DEL MATERIAL	69
5. DESTILACIÓN ATMOSFÉRICA DE ACEITE PIROLÍTICO PARA LA OBTENCIÓN DE DIÉSEL	73
5.1 CURVAS DE DESTILACIÓN	73
5.2 PROPORCIÓN DE HIDROCARBUROS PRESENTES EN EL ACEITE	76
5.3 PROPIEDADES DEL ACEITE PIROLÍTICO	77
5.3.1 Densidad relativa.	77
5.3.2 Gravedad API.	78
5.3.3 Índice de cetano.	79
6. CARACTERIZACIÓN DEL DIÉSEL OBTENIDO	81
6.1 CURVA DE DESTILACIÓN	81
6.2 DENSIDAD RELATIVA	82
6.3 VISCOSIDAD	82
6.4 FLASH POINT	84
6.5 CLOUD POINT	84
6.6 CARBÓN CONRADSON	85
6.7 CENIZAS	86
6.8 ÍNDICE DE CETANO	86
6.9 CALIDAD DEL DIÉSEL OBTENIDO SEGÚN LA NORMATIVA VIGENTE	87
7. ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO GLOBAL DEL PROCESO	89
8. CONCLUSIONES	92
9. RECOMENDACIONES	93
BIBLIOGRAFÍA	95
ANEXOS	104

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Aspecto físico de las muestras de plástico	48
Tabla 2. Efectos del calor en las muestras de plástico	49
Tabla 3. Punto de fusión de las muestras de plástico	50
Tabla 4. Tipos de plástico en la materia prima	51
Tabla 5. Corrientes del plano P&ID para el proceso de pirólisis	53
Tabla 6. Composición química promedio de la zeolita y la pumita	62
Tabla 7. Valores definidos para las variables controladas	63
Tabla 8. Resultados diseño de experimentos 2x3	65
Tabla 9. ANOVA	67
Tabla 10. Resumen del modelo de regresión lineal	68
Tabla 11. Coeficientes para la ecuación de regresión lineal	68
Tabla 12. Proporción de hidrocarburos en el aceite	77
Tabla 13. Densidad relativa del aceite pirolítico	78
Tabla 14. Gravedad API del aceite pirolítico	79
Tabla 15. Índice de cetano del aceite pirolítico	79
Tabla 16. Viscosidad cinemática del diésel obtenido	83
Tabla 17. Cloud point del diésel obtenido	84
Tabla 18. Carbón conradson del diésel obtenido	85
Tabla 19. Cenizas del diésel obtenido	86
Tabla 20. Índice de cetano del diésel obtenido	87
Tabla 21. Comparación del diésel obtenido con la normatividad vigente	88
Tabla 22. Propiedades y usos de los plásticos más comunes	105
Tabla 23. Características físicas de los polímeros más comunes	106
Tabla 24. Efectos del calor en los plásticos más comunes.	107
Tabla 25. Punto de fusión de los plásticos más comunes	109
Tabla 26. Datos experimentales de pirólisis con 600°C y 5%p/p	114
Tabla 27. Datos experimentales de pirólisis con 600°C y 10%p/p	116
Tabla 28. Datos experimentales de pirólisis con 600°C y 15%p/p	117
Tabla 29. Datos experimentales de pirólisis con 650°C y 5%p/p	118
Tabla 30. Datos experimentales de pirólisis con 650°C y 10%p/p	119
Tabla 31. Datos experimentales de pirólisis con 650°C y 15%p/p	120
Tabla 32. pH del agua y el aceite en todas las pirólisis	126
Tabla 33. Resultados del peso de aceite pirolítico	126
Tabla 34. Resultados del peso de carbonilla	126
Tabla 35. Resultados del rendimiento de carbonilla	126
Tabla 36. Resultados de la conversión del material en aceite y gases	127
Tabla 37. Datos destilación ASTM D-86 para aceite con 600°C y 5%p/p	132
Tabla 38. Datos destilación ASTM D-86 para aceite con 600°C y 10%p/p	132
Tabla 39. Datos destilación ASTM D-86 para aceite con 600°C y 15%p/p	133

Tabla 40. Datos destilación ASTM D-86 para aceite con 650°C y 5%p/p	134
Tabla 41. Datos destilación ASTM D-86 para aceite con 650°C y 10%p/p	135
Tabla 42. Datos destilación ASTM D-86 para aceite con 650°C y 15%p/p	135
Tabla 43. Resultados del peso de hidrocarburos en el aceite pirolítico	137
Tabla 44. Clasificación de crudos según gravedad API	137
Tabla 45. Datos destilación ASTM D-86 para diésel con 600°C y 5%p/p	138
Tabla 46. Datos destilación ASTM D-86 para diésel con 600°C y 10%p/p	139
Tabla 47. Datos destilación ASTM D-86 para diésel con 600°C y 15%p/p	139
Tabla 48. Datos destilación ASTM D-86 para diésel con 650°C y 5%p/p	140
Tabla 49. Datos destilación ASTM D-86 para diésel con 650°C y 10%p/p	141
Tabla 50. Datos destilación ASTM D-86 para diésel con 650°C y 15%p/p	142
Tabla 51. Peso del picnómetro con diésel para hallar densidad	144
Tabla 52. Densidad del diésel	144
Tabla 53. Tiempo que demoran 25mL de diésel en salir por aguja de 18G	144
Tabla 54. Viscosidad dinámica del diésel	145
Tabla 55. Peso crisol con residuo de carbón	148
Tabla 56. Peso crisol con cenizas	151
Tabla 57. Peso de los productos obtenidos mediante el reciclaje químico	152

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Estructura molecular del polietileno de baja densidad	30
Figura 2. Estructura molecular del polietileno de alta densidad	31
Figura 3. Estructura molecular del polipropileno	32
Figura 4. Estructura molecular de la poliamida	32
Figura 5. Plástico multicapa	33
Figura 6. Códigos de identificación de plásticos	33
Figura 7. Ciclo de vida de los plásticos	37
Figura 8. Proporción de residuos sólidos inorgánicos	37
Figura 9. Porcentajes de disposición de residuos sólidos plásticos	38
Figura 10. Mecanismo de reacción de craqueo térmico	40
Figura 11. Mecanismo de reacción de craqueo catalítico	43
Figura 12. Materia prima pretratada	45
Figura 13. Prueba beilstein para las muestras de plástico	49
Figura 14. Equipo pirolítico en que se realiza el reciclaje	52
Figura 15. Marmita	54
Figura 16. Condensador en húmedo	55
Figura 17. Tea	55
Figura 18. Manómetro tipo U	56
Figura 19. Resistencia de calentamiento y controlador de temperatura	56
Figura 20. Pantalla de la termocupla	57
Figura 21. Tubos y empaques	57
Figura 22. Aceites pirolíticos obtenidos mediante pirólisis	70
Figura 23. Equipo para la destilación atmosférica ASTM D-86	73
Figura 24. Keroseno y diésel del aceite pirolítico a 600°C y 15%p/p	76
Figura 25. Muestras de residuos plásticos recogidos	106
Figura 26. Efectos del calor en las muestras de plástico	108
Figura 27. Aceite pirolítico con 5%p/p de catalizador	124
Figura 28. Aceite pirolítico con 10%p/p de catalizador	125
Figura 29. Aceite pirolítico con 15%p/p de catalizador	125
Figura 30. Interacción de factores nula	127
Figura 31. Interacción de factores negativa	127
Figura 32. Interacción de factores positiva	128
Figura 33. Interacción de factores inversa	128
Figura 34. Diésel y keroseno separados por destilación atmosférica	136
Figura 35. Picnómetro con diésel	143
Figura 36. Equipo Pensky-Martens de copa cerrada	147
Figura 37. Disminución de temperatura para determinar el cloud point	148
Figura 38. Instrumento utilizado para hallar carbón conradson	150

LISTA DE GRÁFICOS

	pág.
Gráfica 1. Pre experimento para determinar el tiempo de residencia	60
Gráfica 2. Pre experimento para determinar los niveles de temperatura	61
Gráfica 3. Efecto de la interacción de factores en la variable respuesta	66
Gráfica 4. Rendimiento carbonilla y conversión material en aceite y gases	71
Gráfica 5. Curvas de destilación de los aceites obtenidos a 600°C	74
Gráfica 6. Curvas de destilación de los aceites obtenidos a 650°C	75
Gráfica 7. Curvas de destilación para las fracciones de diésel obtenidas	81
Gráfica 8. Rendimiento de los tres productos principales en cada pirólisis	89
Gráfica 9. Rendimiento de los hidrocarburos del aceite en cada pirólisis	90
Gráfica 10. Temperatura de vapores pirolíticos con 600°C y 5%p/p	121
Gráfica 11. Temperatura de vapores pirolíticos con 600°C y 10%p/p	121
Gráfica 12. Temperatura de vapores pirolíticos con 600°C y 15%p/p	122
Gráfica 13. Temperatura de vapores pirolíticos con 650°C y 5%p/p	122
Gráfica 14. Temperatura de vapores pirolíticos con 650°C y 10%p/p	123
Gráfica 15. Temperatura de vapores pirolíticos con 650°C y 15%p/p	123
Gráfica 16. Temperatura de la resistencia controlada en las pirólisis	124

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Rendimiento de aceite pirolítico obtenido	59
Ecuación 2. Conversión del material en gases incondensables y aceite	59
Ecuación 3. Ajuste de datos mediante el modelo de regresión lineal	69
Ecuación 4. Rendimiento de carbonilla producida	71
Ecuación 5. Corrección para obtener la densidad relativa a 15.6°C	77
Ecuación 6. Gravedad API	78
Ecuación 7. Índice de cetano	79
Ecuación 8. Densidad relativa	82
Ecuación 9. Viscosidad dinámica	83
Ecuación 10. Porcentaje de carbón conradson	85
Ecuación 11. Porcentaje de cenizas	86
Ecuación 12. Balance de masa del proceso de pirólisis	89
Ecuación 13. Rendimiento global de los hidrocarburos pirolíticos líquidos	90
Ecuación 14. Factor A para corrección AET según norma ASTM D-2892	130
Ecuación 15. Temperatura corregida por AET a 760mmHg	130
Ecuación 16. Temperatura media ponderada en volumen AET	131
Ecuación 17. Índice de caracterización Kw	131
Ecuación 18. Corrección AET por Kw según norma ASTM D-2892	131
Ecuación 19. Temperatura corregida por ASTM D-2892	131
Ecuación 20. Conversión de viscosidad dinámica a cinemática	144

LISTA DE DIAGRAMAS

	pág.
Diagrama 1. Proceso para la caracterización de plásticos	47
Diagrama 2. P&ID del equipo de reciclaje químico por pirólisis	53
Diagrama 3. Proceso para determinar efectos del calor en plásticos	108
Diagrama 4. Proceso para hallar punto de fusión en las muestras de plástico	109
Diagrama 5. Proceso para desarrollar la prueba beilstein	110
Diagrama 6. Proceso para analizar la solubilidad de las muestras de plástico	111
Diagrama 7. Proceso de pirólisis	112
Diagrama 8. Proceso de destilación atmosférica según norma ASTM D-86	129
Diagrama 9. Proceso para calcular la densidad relativa del diésel	143
Diagrama 10. Proceso para calcular la viscosidad del diésel	145
Diagrama 11. Proceso para hallar el flash point del diésel	146
Diagrama 12. Proceso para hallar el cloud point del diésel	147
Diagrama 13. Proceso para determinar el carbón conradson del diésel	149
Diagrama 14. Proceso para determinar las cenizas del diésel	150

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Caracterización de plásticos	105
Anexo B. Pirólisis de residuos plásticos	112
Anexo C. Destilación atmosférica del aceite pirolítico	129
Anexo D. Caracterización del diésel	138
Anexo E. Productos obtenidos mediante el reciclaje químico	152

ABREVIATURAS Y UNIDADES

°C: grados Celsius.

%p/p: porcentaje en peso.

α : alpha. Representa los tratamientos en relación a la temperatura.

β : betta. Representa los tratamientos en relación a la concentración de catalizador.

$\alpha\beta$: representa los tratamientos en relación a la interacción de factores.

ρ : densidad.

ρ_{rel} : densidad relativa.

AET: *Atmospheric Equivalent Temperature*. Temperatura Equivalente Atmosférica.

API: *American Petroleum Institute*. Instituto Americano del Petróleo.

B: columna de coeficientes para la ecuación de regresión lineal.

C: concentración de catalizador en porcentaje para la ecuación de regresión lineal.

C₃H₈: propano.

C₄H₁₀: butano.

CH₄: metano.

cmH₂O: centímetros de columna de agua.

CO: monóxido de carbono.

CO₂: dióxido de carbono.

cP: centipoise.

cSt: centistokes.

Desv. Error: error de la desviación estándar.

E: error en la ecuación de regresión lineal.

EVOH: etilen-vinil-alcohol.

F: parámetro de la tabla ANOVA mediante el cual se hace el análisis sobre los efectos de los factores en la variable respuesta del diseño de experimentos.

Factor A: coeficiente requerido para hallar la temperatura corregida en las curvas de destilación.

g: gramos.

gl: grados de libertad en la tabla ANOVA.

H₂: hidrógeno diatómico.

HCl: ácido clorhídrico.

HCN: ácido cianhídrico.

HDPE: *High Density Polyethylene*. Polietileno de Alta Densidad.

H_i: hipótesis alterna.

H_o: hipótesis nula.

IBM SPSS: software para el análisis estadístico.

kg: kilogramos.

Kw: índice de caracterización para hacer la corrección de temperatura en las curvas de destilación.

l: litros.

LDPE: *Low Density Polyethylene*. Polietileno de Baja Densidad.

LLDPE: *Linear Low Density Polyethylene*. Polietileno Lineal de Baja Densidad.

m³: metros cúbicos.

min: minutos.

mL: mililitros.

mmHg: milímetros de mercurio.

NH₃: amoníaco.

NO_x: óxidos de nitrógeno.

NTC: Norma Técnica Colombiana.

P: presión.

P&ID: *Piping and Instrumentation Diagram*. Diagrama de tuberías e instrumentación.

PA: poliamida.

PE: polietileno.

PEAD: Polietileno de Alta Densidad.

PEBD: Polietileno de Baja Densidad.

PET: Polietileno Tereftalato.

pH: índice de acidez o basicidad de una solución.

PI: *Pressure Indicator*. Indicador de presión.

PP: polipropileno.

PS: poliestireno.

PT: *Pressure Transmitter*. Transmisor de presión.

PSV: *Pressure Safety Valve*. Válvula de seguridad de presión.

PVC: policloruro de vinilo.

PX7: referencia del dispositivo que mide la temperatura en el fondo del reactor pirolítico.

R: coeficiente de correlación para la regresión lineal.

Sig: parámetro que permite analizar si se acepta o se rechaza la hipótesis nula.

SO_x: óxidos de azufre.

T: temperatura.

TC4Y: referencia de la termocupla que registra la temperatura de los vapores pirolíticos.

TI: *Temperature Indicator*. Indicador de temperatura.

TIC: *Temperature Controller with Indicator*. Controlador de temperatura con indicador.

TMPV: Temperatura Media Ponderada en Volumen.

TT: *Temperature Transmitter*. Transmisor de temperatura.

UAESP: Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos.

UHMWPE: *Ultra High Molecular Weight Polyethylene*. Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular.

GLOSARIO

ACEITE PIROLÍTICO: hidrocarburo líquido formado en el proceso de pirólisis a partir de materiales plásticos, contiene compuestos combustibles.

ANOVA: método de análisis estadístico de varianza, se utiliza en diseño de experimentos para conocer si los factores tienen efecto en la variable respuesta.

ASTM: organización que desarrolla estándares técnicos internacionales para amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios; sus siglas corresponden a su nombre en inglés, *American Society for Testing and Materials*.

CARBÓN CONRADSON: prueba de laboratorio que determina la cantidad de residuo de carbón presente en los productos derivados del petróleo.

CARBONILLA: fracción pesada que no se alcanza a convertir en vapor durante la reacción de pirólisis, está compuesta por hidrocarburos de cadenas largas.

CATALIZADOR: sustancia que acelera o reduce la velocidad de una reacción sin participar en ella, esto se logra mediante la modificación de la energía de activación.

CLOUD POINT: temperatura en la que precipitan las ceras de los aceites lubricantes o de los combustibles, obstruyendo los equipos y tuberías por los que se transportan; también llamado punto de nube.

COMBUSTIBLES: materiales con la capacidad de liberar energía cuando sufren un proceso de oxidación violenta, en el cual hay desprendimiento de calor.

CRAQUEO: proceso que se realiza a altas temperaturas con el objetivo de descomponer hidrocarburos de moléculas grandes, obteniendo así compuestos hidrocarbonados de cadenas más cortas.

DEGRADACIÓN: proceso mediante el cual las moléculas de cadenas largas se desestabilizan dando lugar a compuestos de cadenas cortas; puede ser térmica o catalítica.

DESTILACIÓN: proceso de separación basado en el punto de ebullición para mezclas líquidas, se realiza mediante vaporización y condensación.

DIÉSEL: hidrocarburo líquido que se compone de parafinas y es utilizado principalmente como combustible en motores diésel y calefacción.

FACTOR: variable cuyo efecto se quiere estudiar en un diseño de experimentos.

FLASH POINT: temperatura en la que una sustancia produce vapores que se inflaman si se aplica una fuente de calor; también llamado punto de ignición.

GRAVEDAD API: medida de la densidad que, en comparación con el agua a temperaturas iguales, determina que tan pesado o liviano es un hidrocarburo líquido.

HALÓGENOS: elementos químicos no metálicos que forman sales minerales cuando se unen con un metal (cloro, yodo, bromo, flúor y ástato).

HDPE: polietileno de alta densidad, es un polímero termoplástico olefínico formado por unidades repetitivas de etileno, HDPE por sus siglas en inglés *High Density Polyethylene*.

KEROSENO: combustible destilado del petróleo, hace parte de las fracciones ligeras de hidrocarburos líquidos.

LDPE: polietileno de baja densidad, polímero termoplástico que posee una estructura muy ramificada, siendo más flexible a comparación del polietileno de alta densidad. LDPE por sus siglas en inglés *Low Density Polyethylene*.

MARMITA: recipiente metálico usado en el proceso de pirólisis para introducir el material plástico; permite el calentamiento a altas temperaturas, aprovechando los vapores pirolíticos.

NIVELES: condiciones a evaluar en un factor para un diseño de experimentos.

OLEFINAS: más conocidos como alquenos, son compuestos químicos que contienen como mínimo un enlace doble *carbono-carbono*, pertenecen al grupo de los hidrocarburos insaturados.

PARAFINAS: más conocidos como alcanos, son compuestos químicos con estructura lineal simple, cuando tienen ramificaciones se les denomina iso-alcanos o iso-parafinas.

PET: polietileno tereftalato; es un polímero termoplástico lineal con alto grado de cristalinidad, se obtiene a partir de una reacción de policondensación entre el etilenglicol y el ácido tereftálico.

PIRÓLISIS: degradación térmica o catalítica de todo tipo de materiales a excepción de vidrio y metales; se caracteriza por desarrollarse en ausencia de oxígeno y a altas temperaturas, lo cual ocasiona cambios en la composición química y el estado físico del material.

POLIAMIDA: polímero sintético formado por la reacción química entre una di-amina y un ácido di-carboxílico, la poliamida más conocida es en nylon.

POLÍMERO: macromolécula formada por la unión de unidades simples, llamadas monómeros, mediante enlaces covalentes; son compuestos de largas cadenas que se unen entre sí, motivo por el cual tienen altos pesos moleculares.

POLIOLEFINAS: termoplásticos obtenidos por la polimerización de olefinas; se distinguen por su buena estabilidad química y sus propiedades de aislamiento.

POLIPROPILENO: termoplástico obtenido por la polimerización del propileno. Se utiliza para empaques de alimentos, equipos de laboratorio, componentes automotrices, entre otros.

PRUEBA BEILSTEIN: método simple utilizado para determinar la presencia de un halógeno en una muestra de plástico.

PUMITA: roca volcánica de gran porosidad, se usa como catalizador en el proceso de pirólisis porque es similar a la zeolita en su composición y a la riolita en su naturaleza.

RECICLAJE MECÁNICO: procesos desarrollados con el objetivo de reducir el tamaño de los plásticos para usarlos en aplicaciones diferentes.

RECICLAJE QUÍMICO: procesos en los que la temperatura, la presión, los reactivos y el catalizador juegan un papel importante en la despolimerización de un plástico, convirtiéndolo en un producto diferente.

RENDIMIENTO: cálculo de la cantidad de producto obtenido en relación a la cantidad de materia prima ingresada.

RESIDUOS SÓLIDOS PLÁSTICOS: forman parte de los residuos sólidos urbanos que se generan en casas, instituciones, áreas públicas e industrias; son materiales que tardan mucho tiempo en degradar.

RIOLITA: roca volcánica originada por el enfriamiento del magma ácido, se utiliza como catalizador en algunas pirólisis.

SPI: sus siglas en inglés corresponden a *Society of the Plastics Industry*; es un código mediante el cual se identifican los plásticos más comunes, con el fin de facilitar su recolección y reciclaje.

TERMOPLÁSTICOS: polímeros que se funden a temperaturas superiores a las del rango de transición vítrea, por lo que pueden ser moldeados y se endurecen cuando se enfrían.

VISCOSIDAD: propiedad física que mide la resistencia de un fluido a las deformaciones que son producidas por tensiones de tracción y tensiones cortantes.

ZEOLITA: mineral micro poroso con estructura cristalina, está compuesto por unidades primarias de aluminosilicatos. Es útil como catalizador porque sus mallas moleculares controlan el tipo de moléculas que tienen acceso a sus sitios activos.

RESUMEN

Inicialmente se recogen los residuos plásticos transparentes de la empresa Atlantic FS S.A.S. y se llevan a un proceso de pretratamiento que consiste en lavar, secar y disminuir el tamaño del material. Luego se caracteriza la materia prima mediante métodos fisicoquímicos, identificando que se compone de polietileno, polipropileno y poliamida. Las condiciones de operación para cada proceso de reciclaje químico se fijan en 280 minutos de tiempo de residencia y 1 kg de materia prima; de igual manera, los niveles de temperatura a evaluar se establecen en 600 y 650°C, mientras que para la concentración de catalizador se escogen niveles de 5, 10 y 15%p/p.

Los datos del diseño de experimentos 2x3 se estudian mediante un análisis estadístico de varianza ANOVA, con el cual se afirma que tanto los factores temperatura y concentración de catalizador, como la interacción entre ellos, tienen efecto en la conversión del material a aceite pirolítico. El valor del rendimiento de aceite más alto obtenido experimentalmente fue de 74% con una temperatura de 650°C y una concentración de catalizador del 5%p/p. Para predecir el rendimiento de este hidrocarburo de acuerdo a las condiciones de operación, se ajustan los datos a un modelo de regresión lineal.

Con el objetivo de conocer los hidrocarburos presentes en los aceites se realizan destilaciones atmosféricas, mediante las cuales se observa que el diésel, el keroseno y algunos compuestos pesados están presentes en esta fase pirolítica líquida. La proporción más alta de diésel fue de 51% y se obtuvo en el aceite producido a 600°C y 15%p/p. Adicionalmente, se hacen pruebas para caracterizar el diésel, encontrando que es de buena calidad ya que cumple con la normatividad vigente para el diésel corriente. Por último, se calcula el rendimiento global del proceso, donde se encuentra un 31% para el diésel obtenido con el reciclaje químico a 650°C y 5%p/p de catalizador.

Palabras Clave: Aceite pirolítico, Catalizador, Diésel, Pirólisis catalítica, Residuos sólidos plásticos, Temperatura.

INTRODUCCIÓN

La producción de materiales plásticos ha incrementado en los últimos años como consecuencia del aumento en la demanda, pues se trata de materiales muy versátiles y económicos que se usan en gran variedad de aplicaciones. Debido a su excesiva producción, este material polimérico está siendo desechado al medio ambiente de manera indiscriminada, ocasionando contaminación de suelos y cuerpos acuíferos; además, los rellenos sanitarios ya no son una solución eficiente para la disposición de plásticos porque estos materiales tardan cientos de años en degradarse. Es por esto que se han buscado alternativas de reciclaje que permitan reducir el tamaño del material para darle un uso diferente o convertirlo en otro producto mediante un proceso químico.

Atlantic FS S.A.S. es una empresa del sector de alimentos que desecha grandes cantidades de residuos sólidos plásticos a causa del proceso de empaque que se lleva a cabo al interior de la planta. El corto tiempo de vida útil que tiene el material dentro del proceso hace que este se convierta en un problema para esta industria, razón por la cual se busca una alternativa de reciclaje que permita disponer de los empaques plásticos de una forma en que la empresa no contribuya a las problemáticas ocasionadas por este tipo de residuos.

El reciclaje químico por pirólisis catalítica es uno de los métodos más estudiados porque permite aprovechar la capacidad energética del material mediante la obtención de un producto combustible. Por consiguiente, se plantea realizar este proceso de reciclaje para generar gases incondensables, aceite pirolítico y carbonilla como productos finales a partir de poliolefinas, puesto que es probable encontrar una mezcla de gasolina, keroseno y diésel en la fase pirolítica líquida, obteniendo así una solución para disponer del material sin generar contaminación al mismo tiempo que se obtiene un producto combustible que puede ser usado energéticamente bien sea al interior de la empresa o fuera de ésta.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la obtención de diésel a nivel laboratorio mediante pirólisis usando residuos plásticos provenientes del proceso de empaclado en la empresa Atlantic FS S.A.S.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el tipo de plástico usado en el proceso de empaque en la empresa.
- Evaluar las condiciones de operación del proceso de pirólisis en relación a la conversión.
- Obtener Diésel mediante la destilación del aceite pirolítico.
- Caracterizar el producto obtenido con un análisis fisicoquímico.
- Determinar las tasas de rendimiento del producto obtenido con respecto a la materia prima.

1. CARACTERIZACIÓN DE PLÁSTICOS

Los plásticos son materiales que cada vez tienen mayor impacto a nivel mundial, pues su gran versatilidad ha permitido que sea un recurso económico y fácil de usar industrialmente para diferentes aplicaciones. La industria de alimentos ha aprovechado este material para el empaque de sus productos, por lo que se ha aumentado su producción y, por ende, ha incrementado la cantidad de desechos sólidos plásticos como consecuencia del corto tiempo de vida útil que tienen¹, ya que dejan de cumplir su función una vez llegan al consumidor.

En este capítulo se explican los conceptos principales para entender la primera parte del desarrollo experimental de este trabajo, que consiste en la caracterización de los plásticos recolectados en la empresa, con el objetivo de comprender la influencia de este material en el proceso de reciclaje químico por pirólisis que se llevará a cabo, considerando que la materia prima es un factor que puede convertirse en un obstáculo cuando no se encuentra debidamente identificada.

1.1 PLÁSTICOS

Los plásticos en esencia son polímeros, que son largas cadenas compuestas por la unión de varias moléculas a las que se les denomina monómeros. Según sus monómeros y la forma de polimerización el material tiene propiedades distintas, es por ello que los polímeros tienen amplia gama de aplicaciones, pues mientras algunos tienen alta resistencia mecánica, otros se caracterizan por su transparencia o facilidad de moldeo.

Los polímeros más usados son los termoplásticos, ya que éstos pueden calentarse hasta un punto en el que fluyen y se dejan moldear, propiedad que industrialmente es bastante útil para crear diferentes productos como bolsas, juguetes, empaques, sillas, materiales de construcción, entre muchos otros². Por otro lado, hay polímeros termoestables, que no se funden por efecto del calor y son en su mayoría resinas que sirven como adhesivos, aislantes eléctricos y lacas; mientras que hay otros a los que se les denomina elastómeros, que se caracterizan porque pueden sufrir grandes deformaciones sin que haya ruptura³.

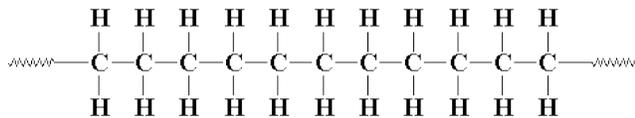
¹ WARING, R. H.; HARRIS, R. M. y MITCHELL, S. C. *Plastic contamination of the food chain: A threat to human health*. En: Maturitas. Junio, 2018. Vol. 115. p. 64-68.

² COLLYER, A. A. *A practical guide to the selection of high-temperature engineering thermoplastics*. [s.l.]. Elsevier Advanced Technology. 1990. 101 p.

³ KRICHELDORF, Hans. *Handbook of polymer synthesis. Part B*. Nueva York. Marcel Dekker. 1992. 1808 p.

➤ **Polietileno de Alta Densidad (PEAD).** *HDPE* por sus siglas en inglés *High Density Polyethylene*. Se identifica con el número dos (2) del sistema de identificación de Plásticos SPI. Tiene una estructura lineal como se observa en la figura 2, que le da muy buenas propiedades mecánicas y lo hace un excelente material para la fabricación de tuberías, mesas y cascos⁵.

Figura 2. Estructura molecular del polietileno de alta densidad



Fuente: BELTRÁN RICO, Maribel y MARCILLA GOMIS, Antonio. Tecnología de polímeros. Procesado y propiedades. Universidad de Alicante. 2012. p. 19-22

También existe el polietileno lineal de baja densidad (*Linear Low Density Polyethylene*; LLDPE) y el polietileno de ultra alto peso molecular (*Ultra High Molecular Weight Polyethylene*; UHMWPE).

El polietileno es el polímero más usado a nivel mundial, pues con este material se producen desde bolsas muy delgadas hasta elementos de construcción que requieren una resistencia mecánica alta. Su gran versatilidad ha hecho que sea un material de gran competencia en el mercado, ya que es una alternativa más económica y con propiedades iguales o mejores que las de otros materiales usados para las mismas aplicaciones; tanto así que actualmente se producen aproximadamente 60 millones de toneladas anuales de este material, lo que equivale al 32% de la producción total de plásticos en todo el mundo⁶.

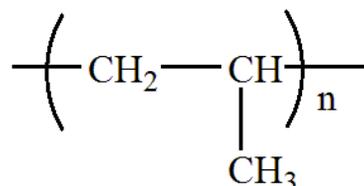
1.1.1.2 Polipropileno (PP). Es un termoplástico que se obtiene mediante la polimerización del propileno, se identifica con el número seis (6) del sistema de identificación de plásticos SPI y su estructura se observa en la figura 3. Se trata de un material compatible con la mayoría de las técnicas de procesamiento, por lo que es bastante usado en la industria; además, por su alta resistencia al calor es perfecto para aplicaciones en las que se requiere esterilización o pasteurización. También se usa en la industria textil, automotriz, de construcción, de alimentos, en medicina y en equipos de laboratorio por su excelente resistencia química y mecánica⁷.

⁵ ORTUÑO, Ángel. *Petroleoquímica*. En: Introducción a la química industrial. España. Reverté. 2006. p. 341-380.

⁶ Ibid, p. 349-351.

⁷ INTRATEC SOLUTIONS. *Technology Economics: Polypropylene production via gas phase process*. 2013. 70 p.

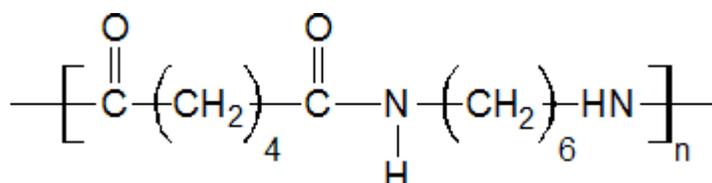
Figura 3. Estructura molecular del polipropileno



Fuente: BELTRÁN RICO, Maribel y MARCILLA GOMIS, Antonio. Tecnología de polímeros. Procesado y propiedades. Universidad de Alicante. 2012. p. 19.

1.1.1.3 Poliamida (PA). Es un polímero que se produce de manera sintética mediante la reacción entre una di-amina y un di-ácido carboxílico, compuestos que son inmiscibles entre sí pero que reaccionan en su interfase⁸. Es un material que tiene gran versatilidad y por lo tanto puede ser usado en amplia gama de aplicaciones; adicionalmente, al ser un termoplástico semicristalino tiene excelentes propiedades mecánicas que lo hacen eficaz en el sector automotriz, electrónico, textil e industrial.

Figura 4. Estructura molecular de la poliamida



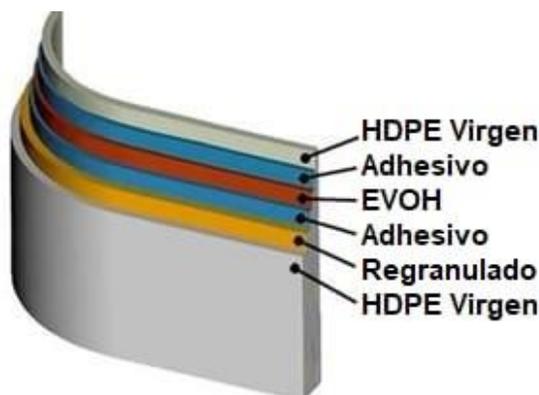
Fuente: BELTRÁN RICO, Maribel y MARCILLA GOMIS, Antonio. Tecnología de polímeros. Procesado y propiedades. Universidad de Alicante. 2012. p. 20.

1.1.2 Plásticos multicapa. Las bolsas plásticas para empaques de alimentos cárnicos por lo general no son de un solo polímero, sino que tienen capas de varios polímeros, adhesivos y recubrimientos, como se muestra en la figura 5. Esta serie de componentes hacen que los materiales sean más resistentes a agentes químicos, lumínicos y oxidantes, ya que les permite tener las propiedades que se requieren para conservar el alimento en excelentes condiciones⁹.

⁸ PÉREZ RODRÍGUEZ, Ángel, *et al.* *Synthesis, characterization and properties of the 5,m nylons*. En: Revista cubana de química. Septiembre, 2014. Vol. 26, no. 3.

⁹ CID FRANCO, Paula. Caracterización microscópica de polímeros multicapa para envasados de alimentos. Trabajo de grado ingeniería de tecnologías industriales. España. Universidad politécnica de Madrid. 2016. 98 p.

Figura 5. Plástico multicapa



Fuente: WALBRO. *Walbro increases its global production capacity for multilayer fuel tanks to meet growing demand.* Agosto, 2011.

1.2 PRUEBAS DE IDENTIFICACIÓN DE PLÁSTICOS

La mayoría de materiales plásticos tienen impreso un número que corresponde al sistema de identificación de plásticos SPI, que es un código que establece números del uno (1) al siete (7) para los polímeros más usados mundialmente con el fin de facilitar su disposición y reciclaje¹⁰; esta clasificación se especifica en la figura 6.

Figura 6. Códigos de identificación de plásticos

PETE	HDPE	PVC	LDPE	PP	PS	OTHER
Polietileno Tereftalato	Polietileno de Alta Densidad	Policloruro de Vinilo	Polietileno de Baja Densidad	Polipropileno	Poliestireno	Otros

Fuente: CABILDO MIRANDA, María del Pilar, *et al.* Reciclado y tratamiento de residuos. España. UNED. 2008. 390 p.

Aquellos plásticos que se identifican con el número siete (7) correspondiente a “otros”, pueden estar compuestos por una combinación de dos tipos de polímero o simplemente ser un plástico diferente a los otros seis.

¹⁰ VÁZQUEZ MORILLAS, Alethia, *et al.* Generación, legislación y valorización de residuos plásticos en Iberoamérica. *En:* Revista internacional de contaminación ambiental. Diciembre, 2016. Vol. 32. p. 63-76.

Algunos materiales plásticos no tienen impreso su código de identificación y por lo tanto deben realizarse pruebas específicas que permitan conocer el tipo de polímero del que están compuestos; estas suelen ser muy sencillas, pues con una observación del comportamiento físico del material es suficiente para discernir el tipo de polímero que se está analizando. No obstante, cuando se desea tener mayor certeza sobre los resultados obtenidos, pueden realizarse pruebas más especializadas como una calorimetría diferencial de barrido o una cromatografía de capa fina, que son métodos costosos.

En algunas pruebas no se obtiene como resultado el tipo de polímero que compone a la muestra sino un grupo de polímeros que comparten las mismas características, lo cual es útil para descartar componentes que no hacen parte del plástico. Luego de esas pruebas, se realizan otras que dan un resultado específico para corroborar así el tipo de polímero que se encuentra en el material¹¹. Los métodos de identificación de plástico que se desarrollan en este trabajo son:

- **Aspecto físico.** La observación inicial del aspecto físico del material permite tener una idea preliminar sobre el polímero que lo compone porque generalmente los plásticos tienen características especiales como su nivel de transparencia y cristalinidad, que pueden ser observadas a simple vista. Puede ocurrir que un polímero que se caracteriza por ser muy transparente, se vea bastante opaco debido a la aplicación en la que se encuentra¹², es por ello que este análisis se realiza teniendo en cuenta tanto el aspecto original del polímero como el que este tiene cuando se usa específicamente para bolsas y empaques en el sector de alimentos¹³.
- **Prueba beilstein.** Es un método simple que permite identificar la presencia de un halógeno en la muestra; consiste en calentar un alambre de cobre, ponerlo en contacto con el plástico y, de forma inmediata, colocarlo nuevamente a la llama¹⁴. Mediante esta prueba es posible afirmar que la muestra de plástico contiene halógenos cuando se obtiene una coloración verdosa al colocar el alambre impregnado de polímero en la llama¹⁵.

¹¹ SIERRA, Noralba, *et al.* Protocolo para el control de calidad de envases de plástico, utilizados en la industria farmacéutica, de cosméticos y de alimentos. En: Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas. Octubre, 2010. Vol. 39, no. 2. p. 149-167.

¹² INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Envases plásticos. Uso general. NTC 5511. [s.l.]. ICONTEC Internacional. 2007. 15 p.

¹³ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Materiales, compuestos y artículos plásticos para uso en contacto con alimentos y bebidas. NTC 5023. [s.l.]. ICONTEC. 2001. 19 p.

¹⁴ ASOCIACIÓN DE LABORATORIOS FARMACÉUTICOS DE INVESTIGACIÓN. Manual para el control de calidad de materiales de empaque en la industria farmacéutica en Colombia. [s.l.]. AFIDRO. 1986. p. 400-444.

¹⁵ SIERRA. Op. cit., p. 154-156.

- **Efectos del calor.** Los termoplásticos se comportan de forma diferente entre sí cuando están en presencia de calor por las propiedades específicas que les otorga su estructura molecular, es decir que cada tipo de plástico tiene su forma particular de quemarse, por ejemplo, mientras la llama del policloruro de vinilo es de color verde claro, la del polietileno es azul¹⁶. Actualmente se conoce la forma en que los polímeros más comunes se queman, lo cual permite identificar diferentes plásticos mediante la comparación de ciertas características observables como el color de la llama, del humo, su olor, el goteo, si la llama se auto extingue y la velocidad con que se consume¹⁷.
- **Punto de fusión.** En los polímeros existe la temperatura de transición vítrea, que corresponde al punto térmico en el que el polímero puede reptar, es decir que tiene un comportamiento viscoelástico que le permite organizar sus cadenas de forma que se comporta como sólido o líquido según el esfuerzo que se le aplique¹⁸. Por otro lado, el punto de fusión es aquella temperatura superior a la de transición vítrea en la que el polímero es capaz de fluir. La medición de este parámetro es útil para identificar únicamente polímeros termoplásticos, ya que los termoestables no se funden¹⁹.
- **Solubilidad.** Los polímeros son solubles en solventes específicos según su naturaleza²⁰; por lo que estos compuestos pueden ser insolubles en los mismos componentes pero se diferencian entre sí por el solvente en el que pueden solubilizarse, por ejemplo, el polietileno y el polipropileno no se ven afectados por ácidos pero sí por solventes orgánicos calientes como el xileno, mientras que la poliamida se disuelve en ácidos como el HCl (ácido clorhídrico) pero no en los solventes orgánicos que disuelven al PE y al PP²¹.

¹⁶ ASOCIACIÓN DE LABORATORIOS FARMACÉUTICOS DE INVESTIGACIÓN. Op. cit., p. 400-444.

¹⁷ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard test method for determining the flammability characteristics of nonrigid solid plastics*. ASTM D-4804. West Conshohocken. ASTM Internacional. 2014. 6 p.

¹⁸ CALLISTER, William D. Características, aplicaciones y conformación de los polímeros. *En*: Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales 2. 3 ed. Barcelona. Reverté. 2007. p. 491-530.

¹⁹ INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION. *Determination of melting behavior (melting temperature or melting range) of semi-crystalline polymers*. ISO 3146. [s.l.]. ISO. 3 ed. 2000. 7 p.

²⁰ RAGAERT, Kim; DELVA, Laurens y VAN GEEM, Kevin. *Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste*. *En*: Waste Management. Julio, 2017. 35 p.

²¹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Plásticos. Determinación de los efectos de productos químicos líquidos, incluyendo el agua en los materiales plásticos. NTC 1027. [s.l.]. ICONTEC Internacional. 1997. 21 p.

2. RECICLAJE DE RESIDUOS PLÁSTICOS POR PIRÓLISIS

En el capítulo anterior se habló de la variedad de propiedades que tienen los plásticos y que debido a esto son materiales tanto eficaces como económicos para diferentes aplicaciones²²; no obstante, el incremento en la producción de estos polímeros ha comenzado a tener impactos negativos en la flora y fauna como consecuencia del mal manejo que se les está dando, razón por la cual se han empezado a buscar alternativas para la reutilización o reciclaje de estos compuestos.

Después de identificar los polímeros que componen la materia prima, la segunda etapa experimental consiste en el desarrollo del reciclaje químico por pirólisis con los residuos plásticos recolectados en la empresa, es por ello que en este capítulo se presentarán los conceptos fundamentales que permiten tener las bases para comprender dicha etapa.

2.1 MÉTODOS DE RECICLAJE PARA EL PLÁSTICO

El tiempo de vida útil de los materiales plásticos varía de acuerdo al producto que se obtenga con ellos, pues una silla hecha de polipropileno durará en uso mucho más tiempo que el empaque plástico de un alimento. En general, el ciclo de vida de estos materiales se ilustra en la figura 7 y consiste inicialmente en la obtención de la materia prima en forma de pellets, los cuales son de composición conocida y provienen del petróleo²³. Posteriormente, en la fase de producción, los pellets se convierten en productos que serán distribuidos al consumidor y, por último, el producto pasa al cliente, quien lo desechará una vez haya cumplido su función.

Durante el ciclo, cuando se usan los pellets de plástico se generan residuos que son relativamente fáciles de reciclar porque su composición es conocida, pero la cantidad más preocupante de residuos sólidos plásticos provienen directamente del consumidor, lo cual supone varios retos a la hora de reciclar porque estos productos por lo general contienen aditivos, otros plásticos o recubrimientos que, si bien permiten mejorar sus propiedades para que cumplan su función de manera satisfactoria, pueden convertirse en un obstáculo a la hora de llevar a cabo algunas técnicas de reciclaje²⁴.

²² SINGH, Narinder, *et al.* *Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications*. En: Composites Part B. Septiembre, 2016. Vol. 115. p. 409-422.

²³ RAGAERT. *Op. cit.*, 35 p.

²⁴ RAGAERT. *Op. cit.*, 35 p.

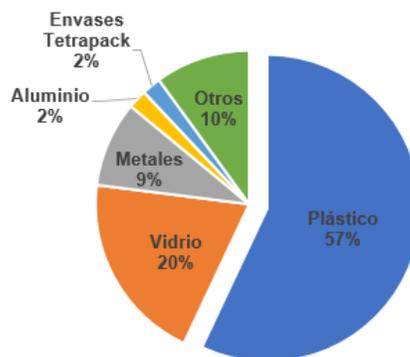
Figura 7. Ciclo de vida de los plásticos



Fuente: INTEREMPRESAS MEDIA. Envase y embalaje. El ecodiseño en los envases de plástico. 2011.

Más de la mitad de los desechos inorgánicos corresponden a materiales plásticos como se observa en la figura 8, lo cual está generando graves problemas ambientales, ya que este 57% de residuos inorgánicos poliméricos tarda mucho tiempo en degradarse y cuando se disponen de forma inadecuada tapan cañerías o alcantarillas, contribuyendo a inundaciones en las calles. Además, los animales que habitan en cuerpos acuáticos se ven afectados al interactuar con este material porque pueden quedar atrapados en él o morir en caso de ingerirlo²⁵.

Figura 8. Proporción de residuos sólidos inorgánicos

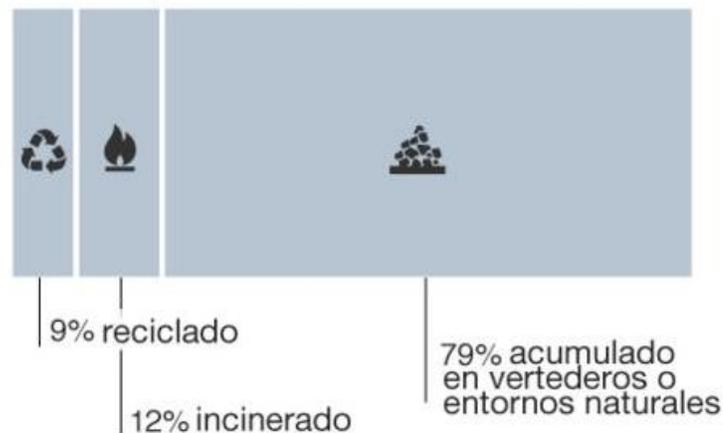


Fuente: AGUILAR VIRGEN, Quetzalli, *et al.* Potencial de recuperación de residuos sólidos domésticos dispuestos en un relleno sanitario. En: Revista de Ingeniería. Universidad de los Andes. Diciembre, 2010. No. 32. p. 16-27.

²⁵ AGUILAR VIRGEN, Quetzalli, *et al.* Potencial de recuperación de residuos sólidos domésticos dispuestos en un relleno sanitario. En: Revista de Ingeniería. Universidad de los Andes. Diciembre, 2010. No. 32. p. 16-27.

De la totalidad de residuos sólidos plásticos tan sólo el 9% es reciclado, tal y como puede verse en la figura 9. En busca de una alternativa que impida que estos residuos queden en el ambiente, el 12% es incinerado²⁶, generando emisiones de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x), cianuro de hidrógeno (HCN), benceno, fenol y otros compuestos que también contaminan el medio ambiente y pueden afectar la salud de los seres vivos en caso de ser inhalados²⁷.

Figura 9. Porcentajes de disposición de residuos sólidos plásticos



Fuente: GARCÍA, Jeannette M. y ROBERTSON, Megan L. *The future of plastics recycling*. En: Science. Noviembre, 2017. Vol. 358. p. 870-872.

El 79% de los desechos plásticos restantes es acumulado en vertederos o desechado en entornos naturales, razón por la que actualmente los rellenos sanitarios están saturados con estos residuos²⁸. El problema ambiental se ha vuelto tan crítico que se han evaluado diferentes formas para disponer de éste material mediante métodos alternativos que no sean contaminantes, obteniendo así nuevas técnicas de reciclaje que pueden ser químicas o mecánicas²⁹.

²⁶ GARCÍA, Jeannette M. y ROBERTSON, Megan L. *The future of plastics recycling*. En: Science. Noviembre, 2017. Vol. 358. p. 870-872.

²⁷ RAGAERT. Op. cit., 35 p.

²⁸ RAJASEKARAN, Divya y MAJI, Pradip K. *Recycling of plastic wastes with poly (ethylene-co-methacrylic acid) copolymer as compatibilizer and their conversion into high-end product*. En: Waste Management. Abril, 2018. Vol. 74. p. 135-143.

²⁹ MILIOS, Leonidas, et al. *Plastic recycling in the Nordics: A value chain market analysis*. En: Waste Management. Junio, 2018. Vol. 76. p. 180-189.

- **Reciclaje mecánico.** Hace referencia a toda operación que transforma físicamente el material plástico sin cambiar su estructura química, esto con el objetivo de darle un uso diferente; es decir que la disminución de tamaño o el calentamiento controlado para moldear un nuevo producto son técnicas de reciclaje que corresponden a esta categoría³⁰.
- **Reciclaje químico.** Es un método que consiste en disminuir el tamaño de las cadenas del polímero para que puedan obtenerse diversos productos, ya sea porque generan menor contaminación o porque se les puede dar un uso diferente en la industria³¹. Este proceso es más complejo que el mecánico debido a las reacciones que se dan durante el reciclaje como consecuencia de factores que son controlados.

2.1.1 Pirólisis. Es un método de reciclaje químico de plásticos que consiste en calentar la materia prima a altas temperaturas en ausencia de oxígeno con el objetivo de romper las moléculas poliméricas y convertirlas en compuestos de cadenas más cortas³², que corresponden a hidrocarburos combustibles. Este es uno de los métodos más estudiados ya que permite aprovechar la carga energética de los plásticos a reciclar.

El objetivo de las altas temperaturas es que la energía cinética de los enlaces moleculares incremente tanto, que estos se rompan y se obtengan así moléculas más pequeñas³³, que posteriormente serán condensadas para separar los compuestos gaseosos de los líquidos a temperatura ambiente.

La razón de que el proceso se realice en ausencia de oxígeno es porque no es deseable que éste reaccione con las moléculas que se van desprendiendo de la cadena, pues podría darse una reacción de combustión peligrosa y no se obtendrían los productos deseados³⁴, los cuales son posibles de obtener mediante poliolefinas como el PE, el PP e incluso el PS porque son cadenas poliméricas de carbono e hidrógeno que, al romperse, permiten la obtención de moléculas hidrocarbonadas más pequeñas³⁵, como se indica en la figura 10.

³⁰ MIANDAD, R, *et al.* *Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil.* En: International biodeterioration & biodegradation. Abril, 2017. Vol. 119. p. 239-252.

³¹ RAGAERT. Op. cit., 35 p.

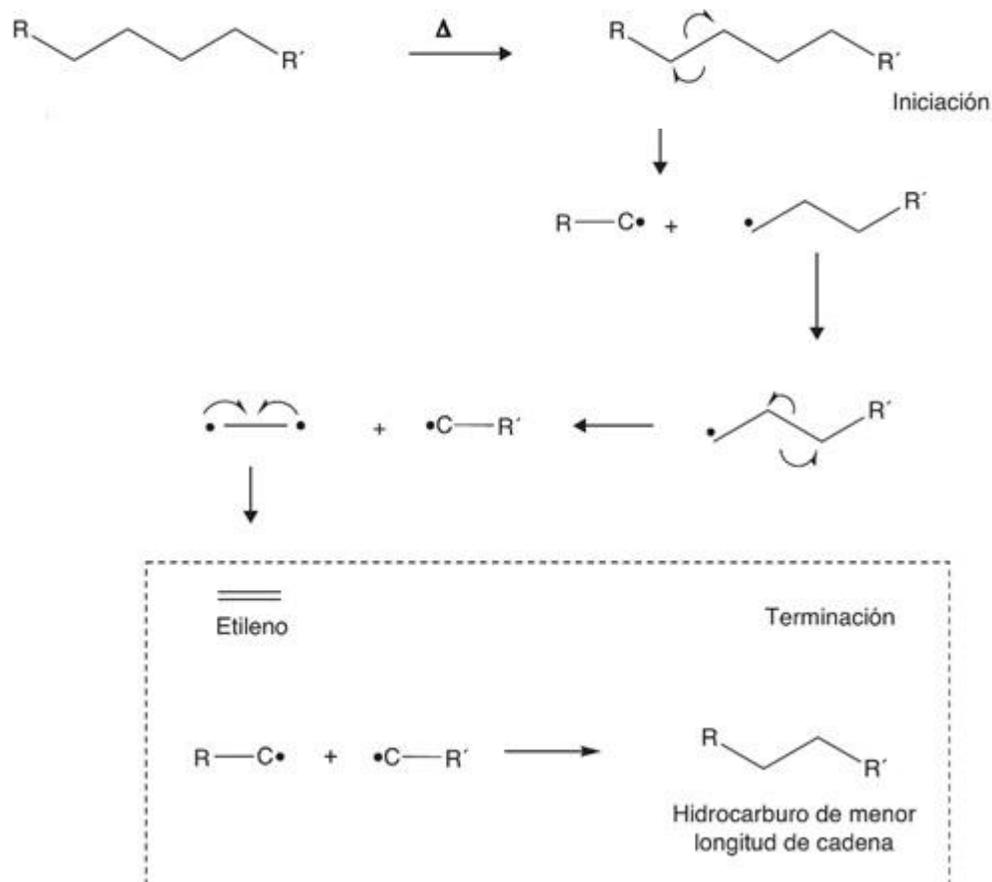
³² RAGAERT. Op. cit., 35 p.

³³ DE MORAIS ARAÚJO, Aruzza Mabel, *et al.* *Thermal and catalytic pyrolysis of sunflower oil using AIMCM-41.* En: Renewable Energy. Febrero, 2017. Vol. 101. p. 900-906.

³⁴ RAGAERT. Op. cit., 35 p.

³⁵ CASTELLS, Xavier Elías y VELO GARCÍA, Enric. *La pirólisis. Tratamiento y valorización energética de residuos.* Ediciones Díaz de Santos. España. 2013. 88 p.

Figura 10. Mecanismo de reacción de craqueo térmico



Fuente: ALVARADO, Jose Gregorio, *et al.* Rol de la química orgánica en los procesos de conversión de hidrocarburos. En: Educación química. Octubre, 2015. Vol. 26. p. 288-298.

Es importante tener en cuenta que en los productos finales siempre van a haber hidrocarburos con enlaces dobles debido a las reacciones de craqueo, como puede verse en la figura 10 con la molécula que se convierte en etileno. Mediante este proceso es posible obtener tres tipos de compuestos:

- **Gases incondensables.** Están conformados por las moléculas más pequeñas que se separan de la extensa cadena polimérica del plástico; es decir que contiene compuestos de uno (1) a cuatro (4) carbonos como el metano (CH_4), propano (C_3H_8) y butano (C_4H_{10}); además, es posible que contenga gases no pirolíticos como el hidrógeno (H_2), dióxido de carbono (CO_2) y monóxido de carbono (CO)³⁶.

³⁶ CASTELLS. Op. cit., 88 p.

- **Aceite.** Contiene moléculas de hasta treinta y cinco (35) carbonos que corresponden a una amplia gama de hidrocarburos tales como ceras, parafinas, olefinas, naftenos y aromáticos; estos compuestos pasan a la fase de vapor cuando están en el reactor debido a las altas temperaturas y quedan en fase líquida al condensarse³⁷.
- **Carbonilla.** Es la fracción de hidrocarburos más pesada que no alcanza a convertirse en vapor durante el proceso, por lo que no sale como gas ni como aceite. Se trata de una masa negra residual que queda dentro del reactor una vez el proceso ha finalizado³⁸.

La pirólisis puede llevarse a cabo de dos formas en específico, la primera de ellas consiste en realizar un calentamiento en ausencia de oxígeno y la otra en desarrollar este mismo proceso en presencia de un catalizador que favorece algunos parámetros de la reacción, se denominan pirólisis térmica y pirólisis catalítica, respectivamente.

2.1.1.1 Pirólisis térmica. En esta la temperatura es el valor determinante, pues no se agrega ningún acelerador de reacción que interfiera. Es un proceso endotérmico ($\Delta H = 46.1 \text{ MJ/kg}$) que se ha realizado con anterioridad en materiales como el caucho, el poliestireno, polipropileno y polietileno³⁹; en todos ellos se ha evidenciado que la temperatura óptima varía de acuerdo a la materia prima.

Todos los procesos de pirólisis térmica se encuentran entre 300 y 900 °C; de modo que se ha registrado que a bajas temperaturas (menores a 500°C) se favorece la producción de aceite por tratarse de una pirólisis lenta, mientras que a altas temperaturas (mayores a 600°C) la pirólisis rápida favorece la formación de gases⁴⁰. Otros factores a tener en cuenta en el proceso de reciclaje químico por pirólisis térmica son la composición de la materia prima, la presión y el tiempo de residencia, siendo estos dos últimos dependientes de la temperatura⁴¹.

³⁷ CASTELLS. Op. cit., 88 p.

³⁸ CASTELLS. Op. cit., 88 p.

³⁹ CALDERÓN SÁENZ, Felipe. La producción de combustibles vehiculares a partir de plásticos de desecho. [s.l.]. Dr. Calderón laboratorios. 2016. 226 p.

⁴⁰ ANUAR SHARUDDIN, Shafferina Dayana, et al. *A review on pyrolysis of plastic wastes*. En: Energy conversion and management. Mayo, 2016. Vol. 115. p. 308-326.

⁴¹ AL-SALEM, S. M., et al. *A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic waste (PSW)*. En: Journal of Environmental Management. Julio, 2017. Vol. 197. p. 177-198.

2.1.1.2 Pirólisis catalítica. Este método de reciclaje es similar a la pirólisis térmica con la única diferencia de que en este caso se agrega un catalizador al proceso, el cual es una sustancia que permite reducir la temperatura de craqueo, aumentar el rendimiento de productos gaseosos mediante el incremento de la selectividad, disminuir las reacciones secundarias y reducir la energía de activación del proceso⁴².

El catalizador más utilizado son las zeolitas porque son compuestos ricos en aluminosilicatos caracterizados por su alta cristalinidad y área superficial⁴³, aunque la roca volcánica o riolita también es uno de los materiales más comunes en estos procesos ya que, por su origen, resiste altas temperaturas y su composición es muy similar a la de una zeolita⁴⁴.

El mecanismo de reacción de craqueo térmico se caracteriza porque al romperse los enlaces por efectos del calor, las moléculas quedan con radicales libres que las dejan inestables y por lo tanto buscan estabilidad uniéndose con otras o creando dobles enlaces, formando así moléculas de cadenas más pequeñas⁴⁵. En estudios previos se ha evidenciado que la pirólisis catalítica, en comparación con la térmica, aumenta el rendimiento de aceite pirolítico y gases incondensables. Además, permite obtener aceites de mejor calidad a menores temperaturas y tiempos de reacción⁴⁶ como consecuencia de las reacciones irreversibles que se dan en el proceso, pues la interacción entre las moléculas de polímeros hidrocarbonados y las del catalizador no sólo favorece la generación de moléculas pequeñas sino que también fomenta la formación de hidrocarburos ramificados⁴⁷.

Para la pirólisis catalítica la formación de compuestos varía ligeramente debido a la interacción de las moléculas hidrocarbonadas con el catalizador, como se presenta en el mecanismo de reacción de la figura 11, donde se observa que inicialmente se rompe un enlace de la poliolefina por efectos del calor y el electrón liberado en este proceso es atraído por un protón del catalizador, dejando al hidrocarburo con una carga positiva. Como la molécula hidrocarbonada está inestable, esta se rompe generando una molécula de cadena más corta, que en el ejemplo es el propileno⁴⁸.

⁴² FUENTES, Edwin G. Mecanismo de degradación térmica y catalítica de poliestireno bajo condiciones de hidrocraqueo. En: Avances en Ciencias e Ingeniería. Septiembre, 2012. Vol. 3, no. 3. p. 69-81.

⁴³ PAREDES MELESIO, Roberto, *et al.* Zeolita Natural. Alternativa ecológica para la agricultura de temporal en México. No. 19. México D.F. 2013. 40 p.

⁴⁴ KLEIN, Cornelis y HURLBUT, Cornelius S. Manual de mineralogía. [s.l.]. Reverté. 1996. 392 p.

⁴⁵ DE MORAIS ARAÚJO. Op. cit., p. 900-906.

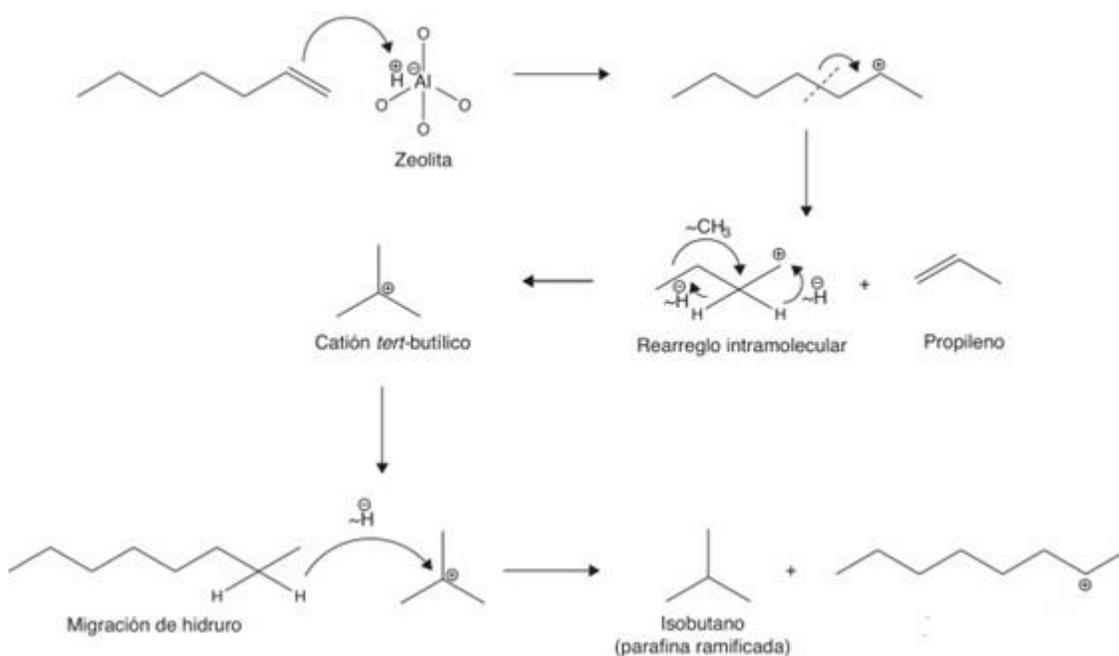
⁴⁶ MIANDAD, R., *et al.* *Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review.* En: Process safety and environment protection. Julio, 2016. Vol. 102. p. 822-838.

⁴⁷ ALVARADO, José Gregorio, *et al.* Rol de la química orgánica en los procesos de conversión de hidrocarburos. En: Educación química. Octubre, 2015. Vol. 26. p. 288-298.

⁴⁸ *Ibid*, p. 288-298.

En el mecanismo de reacción de craqueo catalítico también se observa que la cadena hidrocarbonada cede un electrón para equilibrar las cargas y formar el doble enlace del propileno, razón por la cual la poliolefina sufre un arreglo intramolecular que la convierte en un catión ramificado o catión *tert*-butílico⁴⁹ como se representa en la figura 11. Finalmente, el catión busca un electrón en una molécula hidrocarbonada cercana para estabilizarse y convertirse en una parafina ramificada, por lo que la molécula que pierde el electrón queda ahora cargada positivamente y es sensible a sufrir un proceso similar al que se acaba de describir⁵⁰, de aquí que a este último paso se le denomine propagación.

Figura 11. Mecanismo de reacción de craqueo catalítico



Fuente: ALVARADO, Jose Gregorio, *et al.* Rol de la química orgánica en los procesos de conversión de hidrocarburos. En: Educación química. Octubre, 2015. Vol. 26. p. 288-298.

⁴⁹ Ibid, p. 288-298.

⁵⁰ Ibid, p. 288-298.

3. IDENTIFICACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS DE LA EMPRESA

La primera etapa experimental de este trabajo consiste en la caracterización de la materia prima, pues es necesario identificar los polímeros que la componen para inferir cómo se dará el proceso de reciclaje químico y cuáles serán las condiciones a evaluar, de forma se facilita el análisis de la conversión del plástico y el rendimiento de los productos que se obtienen.

Los plásticos que se recogen en Atlantic FS S.A.S. no tienen impreso el código de identificación, por lo que es necesario realizar algunas pruebas sencillas que permiten conocer los polímeros que serán usados como materia prima en la pirólisis; es por ello que este capítulo se enfoca en los residuos sólidos plásticos recolectados, su pretratamiento y las pruebas de caracterización a las que fueron sometidos.

3.1 RESIDUOS SÓLIDOS PLÁSTICOS DE LA EMPRESA

Atlantic FS S.A.S. es una empresa líder en el sector *food service*, consolidada como una de las principales importadoras y comercializadoras de proteína en Colombia⁵¹. Para que los productos alimenticios que la empresa distribuye lleguen en excelentes condiciones al cliente, estos deben ser empacados al vacío y, además, deben empacarse según el tamaño particular que requiera el comprador, lo cual supone un proceso adicional en planta que consiste en retirar el empaque original del alimento y cambiarlo por uno que cumpla tanto con las condiciones que requiere el cliente como las que necesita el producto para su correcta conservación. Los empaques originales que se retiran se van desechando de manera indiscriminada a la basura, razón por la cual hoy en día Atlantic FS S.A.S. Bogotá desecha alrededor de 7.024 m³ de residuos plásticos sólidos al mes⁵².

Actualmente la empresa no cuenta con métodos de reciclaje al interior de la planta debido a la cantidad de materia orgánica que queda en el plástico, pues esta genera olores desagradables que impiden su reutilización. Mensualmente Atlantic FS S.A.S. debe pagar una tarifa de aseo por aforo relacionada con la cantidad de residuos sólidos plásticos que desecha, pues la UAESP cobra el servicio de aseo por metro cúbico de desechos⁵³ teniendo en cuenta que estos materiales plásticos que tardan cientos de años en descomponerse van directamente al relleno sanitario y pueden generar contaminación en suelos o cuerpos acuíferos cuando se disponen de forma incorrecta.

⁵¹ ATLANTIC. Quienes Somos. [online]. Los Ángeles. 2017. Disponible en: <<http://atlantic.la/quienes-somos/>>

⁵² LIME. Acta de aforo Atlantic FS S.A.S. Bogotá D.C. Marzo, 2017.

⁵³ REDACCIÓN EL TIEMPO. Tarifa de aseo por aforo, para locales. En: El tiempo. Bogotá D.C. 9, marzo, 2005.

3.1.1 Recolección y pretratamiento de la materia prima. Para conocer si con el reciclaje químico por pirólisis catalítica se obtiene diésel a partir de los residuos sólidos plásticos que desecha la empresa, se recolectan los empaques inservibles para ésta durante tres semanas, obteniendo una totalidad de 15 kg de plásticos transparentes que se convertirán en la materia prima para el proceso. Los empaques de color no se tienen en cuenta porque la tinta que contienen es un factor del que no se tiene certeza si interfiere en este estudio preliminar sobre la viabilidad del material para la producción de diésel⁵⁴.

Con el objetivo de evaluar la conversión y el rendimiento del material como tal en la pirólisis, el plástico recogido se somete a un pre tratamiento en el que se realizan operaciones de lavado, secado y disminución de tamaño para favorecer la transferencia de calor durante el reciclaje químico y eliminar la materia orgánica que contienen los empaques. En la figura 12 puede observarse el material listo para entrar al reactor pirolítico.

Figura 12. Materia prima pretratada



Fuente: Elaboración propia.

3.2 PRUEBAS DE IDENTIFICACIÓN DE PLÁSTICOS RECOLECTADOS

Antes de llevar a cabo el proceso de craqueo catalítico es importante conocer el material que va a ingresar como materia prima, pues en otras investigaciones se ha identificado que el tipo de plástico tiene que ver en el rendimiento de los productos pirolíticos, por ejemplo, se encuentra que con el polietileno tereftalato el rendimiento de gases incondensables es de 52 a 77%, mientras que el de aceite pirolítico es de 23 a 40%⁵⁵.

⁵⁴ CALDERÓN. Op. cit., p. 54.

⁵⁵ CEPELIOGULLAR, Ozge. y PUTUN, Ayse E. *Utilization of two different types of plastic wastes from daily and industrial life*. En: ICOEST Cappadocia. Junio, 2013. p. 1 -13.

Además, la mitad del aceite obtenido con el polietileno tereftalato es ácido benzoico, compuesto que deteriora la calidad del combustible debido a que su acidez lo hace altamente corrosivo⁵⁶. De la misma forma, se observa que con el policloruro de vinilo se obtiene una cantidad mínima de aceite pirolítico (12%) y la calidad de este también se ve comprometida porque su compuesto principal es el ácido clorhídrico, que es una sustancia altamente corrosiva y tóxica⁵⁷.

En estas investigaciones también se encuentra que con el poliestireno se obtiene alto rendimiento de aceite pirolítico (97 – 98%) con baja producción de gas y carbonilla⁵⁸, con el polipropileno se alcanza un rendimiento de 49 a 82% de aceite⁵⁹ y con el polietileno se produce alrededor de 69 a 95%⁶⁰. Adicionalmente, se observa que el aceite producido con estos tres polímeros es de buena calidad porque su composición indica la presencia de una mezcla de gasolina, keroseno y diésel⁶¹.

Según los resultados de estos estudios, se infiere que es importante identificar inicialmente los polímeros que componen las bolsas que entrarán al proceso como materia prima, pues en caso de trabajar con PET o PVC se obtendrá un bajo rendimiento de aceite y un producto de mala calidad, mientras que si los residuos plásticos se componen de PS, PP o PE es posible obtener alto rendimiento de un aceite pirolítico que probablemente estará compuesto por una mezcla de combustibles entre los que se encuentra el diésel.

Al inicio del capítulo se mencionó que los empaques recogidos en la planta de Atlantic FS S.A.S. no tienen ningún código de identificación de plásticos que permitan conocer el polímero del cual están compuestos, es por ello que se realizan algunas pruebas sencillas que permiten caracterizar la materia prima de acuerdo a sus propiedades. El proceso que permite elegir el tipo de plástico de acuerdo a los resultados obtenidos con cada una de las pruebas a realizar se presenta en el diagrama 1 y posteriormente se describe el desarrollo de cada una de ellas junto con sus respectivos resultados.

⁵⁶ FAKHRHOSEINI, S. M. y DASTANIAN, M. *Predicting pyrolysis products of PE, PP and PET using NRTL activity coefficient model*. En: Journal of chemistry. 2013. p. 5-10.

⁵⁷ MIRANDA, Rosa, *et al.* *Vacuum pyrolysis of PVC I. Kinetic study*. En: Polymer degradation and stability. Abril, 1998. Vol. 64, no. 1. p. 127-144.

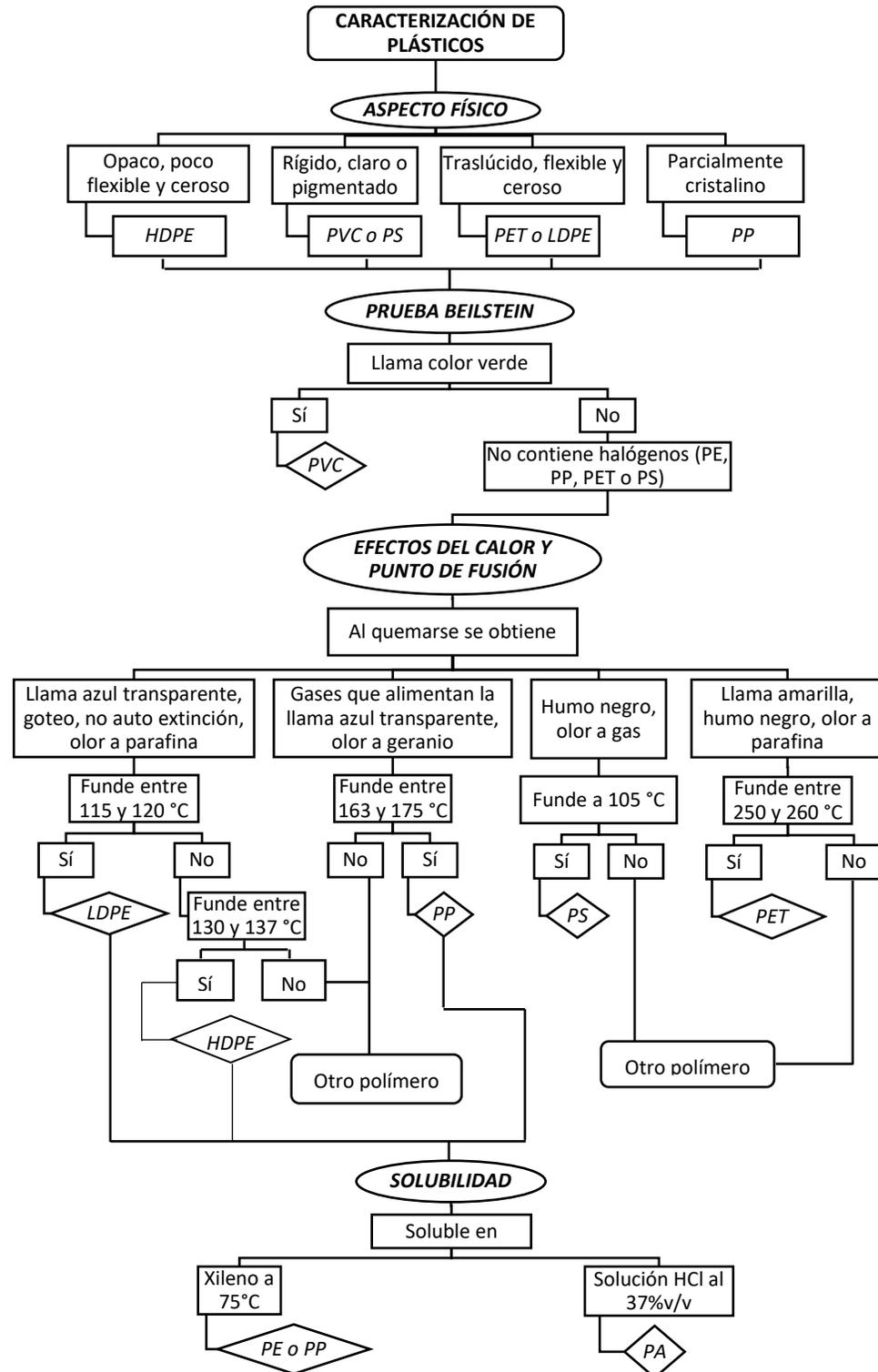
⁵⁸ ONWUDILI, J. A.; INSURA, N. y WILLIAMS, P. T. *Composition of products from the pyrolysis of polyethylene and polystyrene in a closed batch reactor: Effects of temperature and residence time*. En: Journal of analysis and applied pyrolysis. Noviembre, 2009. Vol. 86, no. 2. p. 293-303.

⁵⁹ AHMAD, I., *et al.* *Pyrolysis study of polypropylene and polyethylene into premium oil products*. En: International journal of green energy. Marzo, 2014. Vol. 12, no. 7. p. 663-671.

⁶⁰ MARCILLA GOMIS, A.; BELTRÁN, M. I. y NAVARRO, R. *Thermal and catalytic pyrolysis of polyethylene over HZSM₅ and HUSY zeolites in a batch reactor under dynamic conditions*. En: Applied catalysis B: Environmental. Febrero, 2009. Vol. 86, no. 1. p. 78-86.

⁶¹ KUMAR, S. y SINGH, R. K. *Recovery of hydrocarbon liquid from waste high density polyethylene by thermal pyrolysis*. En: Brazilian journal of chemical Engineering. Diciembre, 2011. Vol. 28, no. 4. p. 659-667.

Diagrama 1. Proceso para la caracterización de plásticos



Fuente: Elaboración propia.

3.2.1 Aspecto físico. El desarrollo de esta prueba es netamente visual y con el único objetivo de tener una idea preliminar de los polímeros que componen a la materia prima. Durante la recolección del material en Atlantic FS S.A.S. se observa que hay cinco (5) tipos de plástico que se desechan, pues se diferencian entre sí por su textura o traslucidez (Ver Anexo A). Para esta y las pruebas siguientes, se toman muestras de cada tipo de plástico y se realizan los procedimientos correspondientes.

Las características físicas observadas se comparan con aquellas conocidas de los polímeros más comunes tanto en su forma original como cuando se encuentran en aplicaciones relacionadas con la industria de alimentos (Ver Anexo A), tomando como base la norma NTC 5511 y la NTC 5023, que especifican cómo deben ser los materiales plásticos para uso en el sector alimenticio. En la tabla 1 se registran las observaciones de aspecto físico de las muestras recolectadas y los tipos de plástico a los que se asemeja cada muestra de acuerdo a las características especificadas en las normas.

Tabla 1. Aspecto físico de las muestras de plástico

Muestra	Observación	Tipo
1	Muy liviano. Tiene un color blanco transparente. Su textura es un poco rugosa.	HDPE o PP
2	Es transparente. Al cortarlo se enrolla. Su textura lisa y cerosa.	PET, PVC, LDPE o PP
3	Más ligero que la muestra 2 pero más pesado que la muestra 1. Transparente. Liso y ceroso.	PET, PVC, LDPE o PP
4	Es liviano. Transparente. Su textura es lisa y cerosa.	PET, PVC, LDPE o PP
5	Pesado. Color blanco transparente. Su textura es ligeramente rígida.	HDPE o PP

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Prueba beilstein. Para identificar si alguno de los polímeros es halogenado se realiza esta prueba de acuerdo al procedimiento que se presenta en el manual AFIDRO (Ver Anexo A). En este caso no se obtiene coloración verdosa en la llama para ninguna de las muestras y, por el contrario, todas ellas presentan el comportamiento que se observa en la figura 13, por lo tanto, se descarta que los plásticos sean policloruro de vinilo u otro tipo de polímero halogenado.

Figura 13. Prueba beilstein para las muestras de plástico



Fuente: Elaboración propia.

3.2.3 Efectos del calor. Para observar el comportamiento particular de los plásticos al quemarse se toman como base los métodos planteados en la norma ASTM D-4804 y el manual AFIDRO (Ver Anexo A). Se coloca cada muestra en presencia de una llama leve con el objetivo de que el material no se consuma muy rápido, pues esto podría dificultar el análisis. Los parámetros observados y los polímeros que corresponden a la forma particular en que se queman las muestras se encuentran en la tabla 2.

Los resultados se obtienen mediante una comparación entre lo que se observa y los datos teórico-prácticos que han obtenido diferentes autores sobre el comportamiento de diferentes polímeros al quemarse (Ver Anexo A). A pesar de que todas las muestras se queman de manera similar, el olor que se desprende de la muestra 2 es diferente, lo cual podría sugerir la presencia de un componente diferente en el plástico.

Tabla 2. Efectos del calor en las muestras de plástico

Muestra	Color llama	Auto extinción	Humo	Olor	Tipo
1 – 3 – 4 – 5	Azul	No	Blanco	Parafina	PP o PE
2				Penetrante	PP o PE

Fuente: Elaboración propia.

3.2.4 Punto de fusión. Esta prueba se realiza de acuerdo a la norma ISO 3146, donde la temperatura del material se observa en una termocupla a medida que se realiza un calentamiento leve (Ver Anexo A). Cada tipo de plástico tiene un rango de punto de fusión diferente que permite identificar el polímero de acuerdo al valor obtenido con esta prueba (Ver Anexo A); es por esto que en la tabla 3 se presenta el punto de fusión registrado experimentalmente junto con el tipo de plástico al que corresponde dicho valor.

Tabla 3. Punto de fusión de las muestras de plástico

Muestra	Temperatura de fusión (°C)	Tipo de plástico
1	132	HDPE
2	119	LDPE
3	112	LDPE
4	123	LDPE
5	165	PP

Fuente: Elaboración propia.

3.2.5 Solubilidad. Los materiales poliméricos usados en empaques de alimentos cárnicos por lo general son plásticos multicapa que contienen poliamida, pues este polímero hace que el material sea más resistente y evita que el alimento entre en contacto con el oxígeno del ambiente, garantizando así la calidad del producto. Si bien las pruebas anteriores indican que la materia prima se compone de polietileno y polipropileno, la prueba de solubilidad se realiza de acuerdo a la norma NTC 1027 para comprobar si los empaques contienen poliamida (Ver Anexo A).

Cuando se explicó esta prueba en el capítulo 1, se mencionó que la poliamida es soluble en HCl pero no en xileno, mientras que el polietileno y el polipropileno no se ven afectados por ácidos pero sí por solventes orgánicos. Por esta razón se evalúa la solubilidad de las cinco (5) muestras tanto en xileno a 75°C como en una solución de ácido clorhídrico al 37% v/v, observando que la capa externa de la muestra 2 es la única que se disuelve en la solución de ácido clorhídrico, mientras que la capa interna se solubiliza en xileno al igual que el resto de muestras, indicando que la muestra 2 es un plástico multicapa de PE-PA y las demás son empaques de PE o PP.

Los resultados obtenidos con todas las pruebas de identificación de plásticos se registran en la tabla 4 y permiten afirmar que la materia prima que ingresará al reactor pirolítico será una mezcla de PE, PP y PA en todos los casos.

Tabla 4. Tipos de plástico en la materia prima

<u>Muestra</u>	<u>Tipo de plástico</u>
1	HDPE
2	LDPE y PA
3	LDPE
4	LDPE
5	PP

Fuente: Elaboración propia.

Luego de que se han realizado todas las pruebas y se conoce el tipo de plástico que ingresará como materia prima, puede suponerse que al realizar el reciclaje químico por pirólisis se obtendrá un rendimiento de 49 a 95% por tratarse de una mezcla de polímeros que contiene PP y PE, pues en este rango se encuentran los rendimientos obtenidos por otros investigadores⁶²⁶³, como se dijo con anterioridad.

Adicionalmente, la materia prima se compone de poliolefinas y polímeros hidrocarbonados como la poliamida por lo que, con base en los estudios mencionados anteriormente, puede decirse que el aceite obtenido probablemente estará compuesto por una mezcla de combustibles como la gasolina, el keroseno y el diésel⁶⁴. Por otro lado, es importante tener en cuenta que la poliamida contiene nitrógeno en su estructura molecular, razón por la que pueden ocurrir reacciones secundarias no deseadas en las que se forman moléculas que pueden interferir en el proceso, como el amoníaco (NH₃).

⁶² AHMAD. Op. cit., p. 663-671.

⁶³ MARCILLA. Op. cit., p. 78-86.

⁶⁴ KUMAR. Op. cit., p. 659-667.

4. RECICLAJE POR PIRÓLISIS DE LOS RESIDUOS PLÁSTICOS RECOLECTADOS

Luego de recoger la materia prima, llevar a cabo su pretratamiento e identificar los polímeros que la componen, se procede a realizar el reciclaje químico mediante una pirólisis catalítica, en la cual para conocer las condiciones con las que se obtiene la mayor conversión de materia prima en aceite, se evalúa el efecto de la concentración de catalizador y la temperatura.

En este capítulo se especifican los equipos que fueron usados, los parámetros que se tuvieron en cuenta para elegir las condiciones de operación y el desarrollo de un diseño de experimentos factorial mediante el cual se realiza el análisis de la influencia de los factores temperatura y concentración de catalizador en la variable respuesta, que es el rendimiento de aceite pirolítico. Además, se analizan otros parámetros del proceso como el rendimiento de la carbonilla que se produce y la conversión del material en aceite y gases incondensables.

4.1 EQUIPOS USADOS PARA EL RECICLAJE QUÍMICO

El reciclaje químico por pirólisis se realiza en el equipo pirolítico de la empresa Dr. Calderón Laboratorios que se observa en la figura 14. Este dispositivo se encuentra en la AK. 20 # 87 – 81 de la ciudad de Bogotá D.C. y garantiza una operación segura durante todo el proceso.

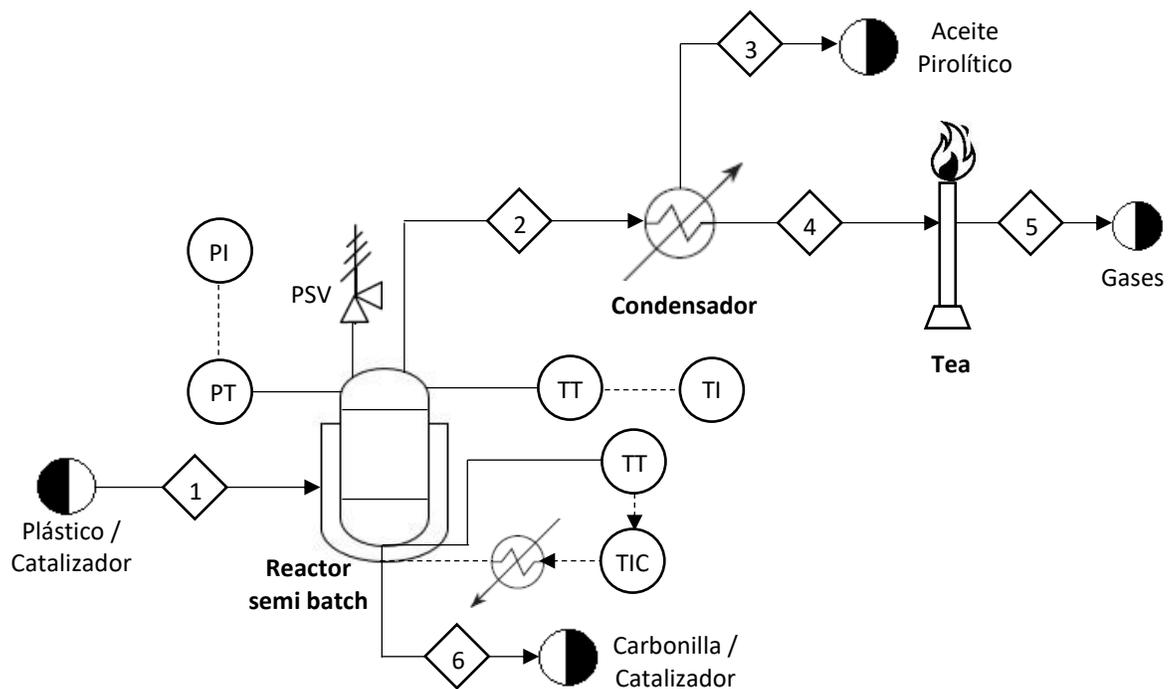
Figura 14. Equipo pirolítico en que se realiza el reciclaje



Fuente: Elaboración propia.

El equipo de pirólisis cuenta con un controlador que mantiene la temperatura constante en el fondo del reactor, un indicador de presión y otro indicador de la temperatura a la que salen los vapores pirolíticos. Cada parte del proceso tiene una función en específico que permite realizar y monitorear el reciclaje químico, es por ello que en el diagrama 2 se representa el proceso mediante un plano P&ID, en la tabla 5 se explica el nombre de cada corriente presente en el diagrama y posteriormente se describe cada sección del equipo de forma individual.

Diagrama 2. P&ID del equipo de reciclaje químico por pirólisis



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Corrientes del plano P&ID para el proceso de pirólisis

Corriente	Nombre
1	Plástico y catalizador
2	Vapores pirolíticos
3	Aceite pirolítico
4	Gases incondensables
5	Gas de tea
6	Carbonilla y catalizador

Fuente: Elaboración propia.

4.1.1 Marmita. También llamada reactor pirolítico, pues en ella se coloca la materia prima y el catalizador para llevar a cabo la reacción de craqueo catalítico. Está hecha de acero inoxidable, tiene una capacidad de dos (2) litros y, como se observa en la figura 15 (a), es de forma cilíndrica.

Cuenta con una tapa especialmente diseñada para permitir que se conecte con las otras partes del equipo, como puede verse en la figura 15 (b). En una de las conexiones se coloca un tubo que permite el paso de vapores pirolíticos hacia el condensador, en otra se ubica un extremo del manómetro, otra de estas uniones se usa para poner un tapón de seguridad mediante el cual se alivia la presión en caso de un incremento excesivo (mayor a 30 cmH₂O) y la última es un termopozo en el que se coloca la termocupla. Tanto la tapa como sus respectivas conexiones deben quedar perfectamente ajustadas para evitar pérdidas de material.

Figura 15. Marmita



(a)



(b)

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Condensador en húmedo. Es un recipiente de vidrio que se llena con agua, se coloca en un soporte, va recubierto con una malla metálica por seguridad y es ajustado mediante una tapa que contiene un tubo largo, el cual queda sumergido como se muestra en la figura 16; este tubo va conectado a la salida del reactor para que los vapores pirolíticos que se transportan a través de él entren en contacto con el agua a temperatura ambiente, permitiendo así la condensación en húmedo.

Aquellos componentes del vapor que corresponden al aceite pirolítico, cambian a fase líquida y quedan suspendidos en la superficie, esto ocurre porque son compuestos que además de ser inmiscibles, tienen una densidad menor a la del agua. Por otro lado, los gases incondensables fluyen hacia arriba y salen por un orificio que permite el flujo de estos compuestos volátiles hacia la tea.

Figura 16. Condensador en húmedo



Fuente: Elaboración propia.

4.1.3 Tea. Los gases pirolíticos incondensables deben evacuarse para evitar un incremento excesivo de la presión en el condensador pero no pueden ser venteados a la atmósfera porque, como se dijo en el capítulo 2, los compuestos gaseosos que salen del proceso son en esencia butano, propano y metano, aunque también pueden haber trazas de gases no pirolíticos como el hidrógeno, el monóxido de carbono y el dióxido de carbono, los cuales son componentes volátiles altamente contaminantes y peligrosos al ser inhalados.

Para evitar que dichos compuestos queden libres en el ambiente, el tubo por el que salen los gases del condensador se conecta a la tea, que es un dispositivo que permite quemar los componentes volátiles antes de que salgan a la atmósfera, como se muestra en la figura 17. Además, este elemento cuenta con un recipiente en la base cuyo objetivo es evitar accidentes, ya que contiene agua para apagar la llama en caso de que ésta se devuelva por el tubo.

Figura 17. Tea



Fuente: Elaboración propia.

4.1.4 Manómetro tipo U. Este instrumento se observa en la figura 18 y es un dispositivo que permite medir la presión dentro del reactor en cualquier momento del proceso, puesto que un extremo se deja libre a la atmósfera mientras el otro se conecta directamente a la marmita, de tal forma que la diferencia de valores en cada brazo del manómetro permite obtener un dato de presión en centímetros de columna de agua (cmH₂O).

Figura 18. Manómetro tipo U



Fuente: Elaboración propia.

4.1.5 Controlador de temperatura. La resistencia de calentamiento se encuentra dentro de la caja de metal que se observa en la figura 19 (a), pues en esta se coloca la marmita y se fomenta la reacción de craqueo catalítico mediante el aumento de temperatura. Esta resistencia debe ir conectada al controlador que se muestra en la figura 19 (b) ya que este es el dispositivo que permite tanto el inicio como el control del proceso de pirólisis. Luego de que se enciende el controlador, la temperatura de la resistencia comienza a subir progresivamente hasta que alcanza el valor que ha sido programado, de forma que este se mantiene constante hasta que el proceso finaliza.

Figura 19. Resistencia de calentamiento y controlador de temperatura



(a)



(b)

Fuente: Elaboración propia.

4.1.6 Termocupla. Es un dispositivo que se coloca en el termopozo del reactor con el objetivo de medir la temperatura de los vapores que se están generando por la reacción de craqueo catalítico. En la pantalla que se muestra en la figura 20 se obtienen los valores de temperatura que registra esta termocupla.

Figura 20. Pantalla de la termocupla



Fuente: Elaboración propia.

4.1.7 Tubos y empaques. Son elementos adicionales que se requieren para llevar a cabo el proceso de pirólisis con éxito. Para conectar las partes del equipo entre sí se usan mangueras y tubos como el que se observa en la figura 21 (a), el cual permite el flujo de los vapores pirolíticos de la marmita hacia el condensador. Por otro lado, en la figura 21 (b) se muestra el empaque que se coloca entre el cuerpo y la tapa del reactor para evitar pérdidas de material.

Figura 21. Tubos y empaques



(a)



(b)

Fuente: Elaboración propia.

4.2 IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN

Para comenzar a realizar el reciclaje químico por pirólisis catalítica es necesario definir las condiciones a las cuales se llevará a cabo el proceso, pues de esta manera se empiezan a plantear los parámetros que permiten desarrollar el diseño de experimentos. Es por esto que en esta sección se le da un valor numérico fijo a las variables controladas, se seleccionan los niveles a estudiar para los factores del experimento y se mencionan las demás variables que se encuentran presentes en el proceso.

4.2.1 Variables controladas. Son aquellas que se pueden controlar durante el proceso porque no dependen de otros parámetros⁶⁵. Para este caso las variables que pertenecen a esta categoría son la temperatura, la concentración de catalizador, la cantidad de materia prima que ingresa al reactor y el tiempo de residencia en cada pirólisis, teniendo en cuenta que las dos primeras corresponden a los factores del diseño de experimentos.

4.2.1.1 Cantidad de materia prima. Al indagar en varios antecedentes se observa que la pirólisis se desarrolla con cualquier cantidad de material⁶⁶. Como la capacidad máxima del reactor pirolítico a usar es de 1 kg y teniendo en cuenta que se requiere obtener una buena cantidad de aceite para poder realizar los análisis respectivos, se toma la decisión de usar la capacidad máxima del reactor; es decir que por cada pirólisis ingresará 1 kg de los residuos sólidos plásticos recogidos y pre tratados.

4.2.1.2 Tiempo de residencia. El tiempo de residencia en los procesos de pirólisis de plástico por lo general se encuentra entre 240 y 360 minutos, pues según estudios previos realizados en otras investigaciones, durante estos tiempos se obtiene el mayor rendimiento de aceite pirolítico. En dichos estudios también se ha observado que a partir de los 240 minutos los valores de rendimiento comienzan a ser prácticamente constantes para plásticos como el polietileno o el poliestireno⁶⁷.

En esta investigación no se usa un solo polímero para el reciclaje químico, sino que la materia prima es una mezcla de polietileno, polipropileno y poliamida, por lo que es necesario realizar un pre experimento que permita determinar el tiempo en que se obtiene el mayor rendimiento de aceite pirolítico o el momento en que este parámetro empieza a ser constante.

⁶⁵ GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. Análisis y diseño de experimentos. 3 ed. México D.F. McGraw Hill Publishing Co. 2012. 487 p.

⁶⁶ AL-SALEM. Op. cit., p. 177-198.

⁶⁷ MIANDAD. *Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil*. Op. cit., p. 239-252.

Para desarrollar el pre experimento se escogen 240, 270 y 300 minutos como los tiempos de residencia a evaluar, de modo que se realiza un duplicado por cada una de estas tres pirólisis. La temperatura se mantiene en 600°C teniendo en cuenta que altas temperaturas favorecen la cinética de reacción y que el rango para plásticos como el PE o el PP es de 500 a 600°C⁶⁸. Para este caso no se usa catalizador en ninguna de las pruebas de reciclaje químico.

Una vez se han realizado las pirólisis, se calcula el rendimiento de aceite pirolítico con la ecuación 1, ya que el peso de aceite y de plástico se obtienen con facilidad experimentalmente. La conversión del material a aceite y gases incondensables se calcula mediante la ecuación 2, teniendo en cuenta que la carbonilla que queda dentro del reactor corresponde a todo aquello que no pasó a la fase de vapor pirolítico. En las dos ecuaciones la muestra de cálculo corresponde al proceso en el que se usó 300 minutos como tiempo de residencia.

Ecuación 1. Rendimiento de aceite pirolítico obtenido

$$Rendimiento\ aceite\ (\%) = \frac{Peso\ aceite\ (g)}{Peso\ materia\ prima\ ingresada\ (g)} * 100$$

$$Rendimiento\ aceite\ (\%) = \frac{558\ g}{1000\ g} * 100$$

$$Rendimiento\ aceite = 55.8\ \%$$

Ecuación 2. Conversión del material en gases incondensables y aceite

$$Conversión\ (\%) = \frac{(Peso\ materia\ prima\ ingresada - Peso\ carbonilla)\ (g)}{Peso\ materia\ prima\ ingresada\ (g)} * 100$$

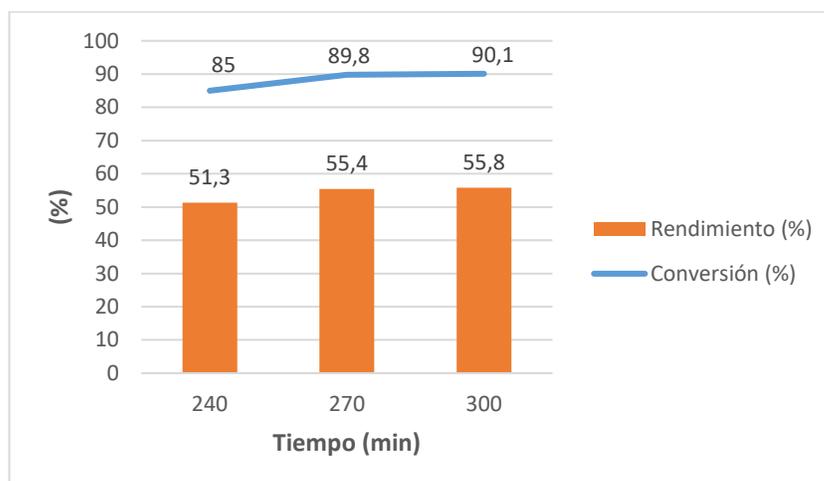
$$Conversión\ (\%) = \frac{(1000 - 99)\ g}{1000\ g} * 100$$

$$Conversión = 90.1\ \%$$

Los resultados obtenidos tanto para el rendimiento de aceite pirolítico como para la conversión de materia prima en gases incondensables y aceite se presentan en la gráfica 1.

⁶⁸ Chen, D., et al. *Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review*. *En: Waste management*. Diciembre, 2014. Vol. 34, no. 12. p. 2466-2486.

Gráfica 1. Pre experimento para determinar el tiempo de residencia



Fuente: Elaboración propia.

Según estos resultados, se analiza que aproximadamente a partir de los 270 minutos tanto la conversión como el rendimiento comienzan a variar muy poco, es decir que desde ese momento hay una tendencia constante. El diseño del equipo hace que este requiera de 10 minutos extra después de que se ha finalizado el proceso para desensamblar algunas conexiones, por esta razón, el tiempo de residencia será de 280 minutos en todos los tratamientos del experimento.

4.2.1.3 Factores. A pesar de que los factores hacen parte de las variables controladas, éstos no pueden tener un único valor debido a que son los parámetros que se van a variar con el objetivo de conocer su efecto en la variable respuesta. En este caso la temperatura y la concentración de catalizador son los factores del diseño de experimentos, por lo que a continuación se definen sus respectivos niveles.

➤ **Temperatura.** Como se mencionó en el capítulo 2, la temperatura para los procesos de pirólisis con plástico varía según el material. Si bien se ha encontrado que para el polietileno o el polipropileno los rangos de temperatura más usados están entre 500 y 600°C⁶⁹, durante el pre experimento para elegir el tiempo de residencia no se obtuvo un rendimiento significativamente alto (55.8%) a pesar de que se usó la mayor temperatura (600°C). Por esta razón, se realiza un pre experimento en el que se evalúa la temperatura para identificar los niveles que tendrá este factor durante el diseño de experimentos.

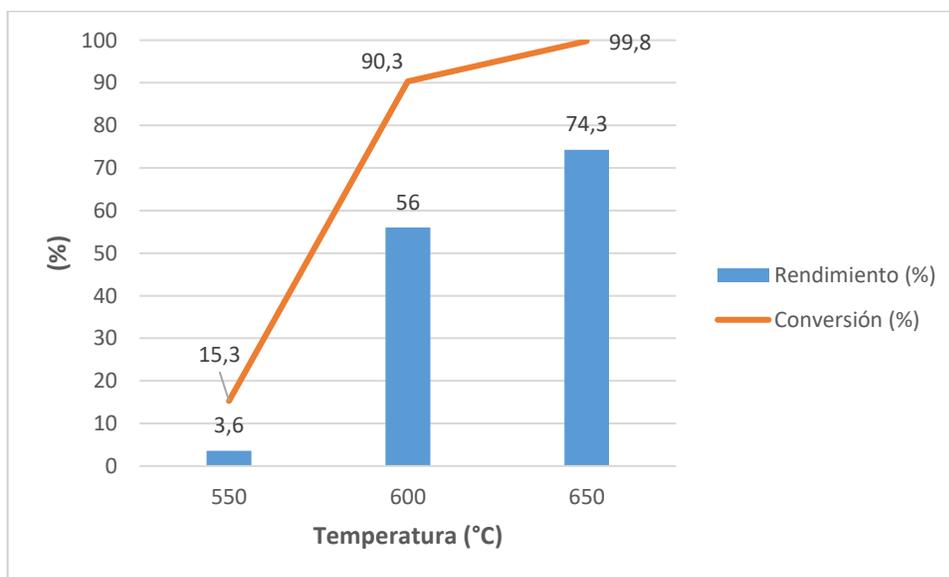
⁶⁹ ANUAR. Op. cit., p. 308-326.

Inicialmente se plantean tres (3) niveles de temperatura que serán 550, 600 y 650°C; para corroborar que se ha tomado una buena decisión se realizan estas tres pirólisis con una repetición por cada una de ellas. La carga de materia prima es de 1 kg, el tiempo de residencia de 280 minutos y la concentración de catalizador se mantiene en 5% p/p⁷⁰ en todos los casos.

Luego de realizar cada uno de los reciclajes químicos, se calcula tanto la conversión de materia prima en aceite y gases incondensables como el rendimiento de aceite pirolítico de la misma forma que se hizo en el pre experimento para seleccionar el tiempo de residencia. Los resultados obtenidos se presentan en la gráfica 2, donde se observa que una temperatura igual o menor a 550°C no es suficiente para llevar a cabo el proceso porque, si bien el plástico logra fundirse, no tiene la energía requerida para craquearse y por lo tanto su conversión no es efectiva. Por otro lado, con 650°C se obtiene una conversión muy cercana al 100%, por lo cual realizar una pirólisis a mayor temperatura no tendría sentido, ya que el material se consumiría por completo con rapidez y habría un gasto innecesario de energía.

Con base en este análisis, se toma la decisión de eliminar el nivel 550°C del diseño de experimentos, es decir que se trabaja el factor temperatura únicamente con dos (2) niveles, correspondientes a 600 y 650°C.

Gráfica 2. Pre experimento para determinar los niveles de temperatura



Fuente: Elaboración propia.

⁷⁰ MIANDAD. *Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review*. Op. cit., p. 822-838.

➤ **Concentración de catalizador.** En el capítulo 2 se especificó que los catalizadores más usados para los procesos de pirólisis son las zeolitas por su cristalinidad y cantidad de aluminosilicatos. Sin embargo, este compuesto es costoso, por lo que se sustituye por una roca volcánica denominada pumita, ya que esta tiene una composición similar a la de la zeolita como se muestra en la tabla 6.

La pumita es económica, versátil y muy parecida a la riolita en su naturaleza, que es otro catalizador bastante usado en este campo, pues ambas son rocas volcánicas que se forman como consecuencia del enfriamiento del magma ácido⁷¹ pero se diferencian entre sí porque la pumita es mucho más porosa, lo cual le confiere mayor área superficial.

Tabla 6. Composición química promedio de la zeolita y la pumita

Composición	Zeolita	Pumita
SiO ₂	66.0	74.0
AlO ₂	10.1	12.6
Fe ₂ O ₃	1.69	1.20
Na	1.60	2.10
MgO	0.40	0.30

Fuente: VIZCAINO RAMÓN, Blanca Estela. Identificación y caracterización de la zeolita natural tipo clinoptilolita. Trabajo de grado metrología de la radiación. [s.l.]. Universidad Autónoma de Nuevo León. 1998. 83 p.

En estudios realizados para otras investigaciones se encuentra que la concentración de catalizador usada en pirólisis catalítica es baja (5 a 15% p/p) en relación a la cantidad de materia prima que ingresa al proceso y que dicha sustancia permite obtener una mayor tasa de rendimiento de gases incondensables y aceite pirolítico⁷². Para comprobar esta afirmación, se eligen tres (3) niveles para este factor que corresponden a 5, 10 y 15 % p/p de catalizador.

Luego de definir todas las variables controladas, se puede afirmar que las condiciones de operación a usar en cada una de las pirólisis del diseño de experimentos ya son conocidas. En la tabla 7 se muestra un resumen tanto de los valores fijos obtenidos para las variables cantidad de materia prima y tiempo de residencia, como los niveles escogidos para los factores. Adicionalmente, se selecciona la temperatura como el factor tratamiento y la concentración de catalizador como el factor bloque para el diseño de experimentos.

⁷¹ POZO RODRÍGUEZ, Manuel; GONZÁLEZ YÉLAMOS, Javier y GINER ROBLES, Jorge. Geología práctica. Introducción al reconocimiento de materiales y análisis de mapas. [s.l.]. Pearson education. 2007. 304 p.

⁷² MIANDAD. *Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review*. Op. cit., p. 822-838.

Tabla 7. Valores definidos para las variables controladas

Variable	Valor		
Cantidad materia prima (kg)	1		
Tiempo de residencia (min)	280		
Temperatura (°C)	600	650	
Concentración de catalizador (%p/p)	5	10	15

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Variables no controladas. Son aquellas que tienen algún tipo de influencia sobre el proceso pero que no se pueden controlar porque dependen de otros parámetros⁷³. En este caso hay dos variables que hacen parte de esta categoría, la primera de ellas es la presión, que depende de la temperatura y la segunda es la proporción de polímeros presentes en la materia prima, pues esto depende de los residuos sólidos plásticos semanales de Atlantic FS S.A.S., ya que no siempre se desechan las mismas cantidades de cada tipo de plástico.

4.2.3 Variables dependientes. Son las que se obtienen como consecuencia de las variables anteriormente especificadas, es decir que son todos los resultados medibles encontrados para los diferentes tratamientos⁷⁴. Las variables dependientes en este caso son el rendimiento de aceite pirolítico, gases, carbonilla y la conversión de materia prima en aceite y gases incondensables.

4.2.3.1 Variable respuesta. Dentro de las variables dependientes se encuentra la variable respuesta, pues se trata de un resultado de interés que se quiere mejorar mediante el diseño de experimentos. En este trabajo se selecciona el rendimiento de aceite pirolítico como la variable respuesta para analizar el efecto de la temperatura y la concentración de catalizador en la pirólisis catalítica.

4.3 EFECTO DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN EN EL RENDIMIENTO DE ACEITE PIROLÍTICO

Luego de seleccionar las condiciones de operación e identificar todas las variables del proceso, se comienza a desarrollar el diseño de experimentos. No obstante, antes de eso es importante analizar que a lo largo del capítulo 4 se ha hablado de la conversión de materia prima en aceite y en gases incondensables, pero la carbonilla es un producto que nunca se ha incluido; esto se debe a que en el proceso no es posible determinar la conversión total del material.

⁷³ GUTIÉRREZ. Op. cit., p. 487 p.

⁷⁴ GUTIÉRREZ. Op. cit., p. 487 p.

Al final de cada pirólisis queda un residuo en el reactor que corresponde a la carbonilla, el plástico que no se convirtió y el catalizador, esta mezcla no se puede separar y por lo tanto cuantificar estos compuestos por aparte se vuelve una tarea complicada. Para efectos prácticos se asume que el plástico se convierte por completo, conociendo de antemano que en la carbonilla habrán trazas de moléculas poliméricas del plástico que no logró convertirse y que la conversión de materia prima en aceite corresponde al rendimiento del aceite pirolítico en el proceso.

4.3.1 Hipótesis. Antes de desarrollar el diseño de experimentos, se deben plantear hipótesis referentes a lo que se desea comprobar, de tal manera que posteriormente puedan analizarse los resultados obtenidos mediante un análisis estadístico ANOVA. Para este caso las hipótesis se establecen para la temperatura, la concentración de catalizador y la interacción entre estos dos factores.

Inicialmente se debe plantear una hipótesis nula (H_0), la cual afirma que los resultados entre los niveles del factor son iguales ($\alpha_1 = \alpha_2 \rightarrow \alpha = 0$), por lo que no habría efecto en la variable respuesta. Posteriormente, la hipótesis alterna (H_i) se plantea para describir lo contrario, pues esta señala que los resultados entre niveles son diferentes ($\alpha_1 \neq \alpha_2 \rightarrow \alpha \neq 0$), lo cual indicaría que el factor sí tiene efecto.

- **Factor Temperatura**

- $H_0: \alpha = 0 \rightarrow$ No hay efecto del factor temperatura en el rendimiento de aceite pirolítico.
- $H_i: \alpha \neq 0 \rightarrow$ Hay efecto del factor temperatura en el rendimiento de aceite pirolítico.

- **Factor concentración de catalizador**

- $H_0: \beta = 0 \rightarrow$ No hay efecto del factor concentración de catalizador en el rendimiento de aceite pirolítico.
- $H_i: \beta \neq 0 \rightarrow$ Hay efecto del factor concentración de catalizador en el rendimiento de aceite pirolítico.

- **Interacción entre factores**

- $H_0: \alpha\beta = 0 \rightarrow$ No hay efecto de la interacción de factores en el rendimiento de aceite pirolítico.
- $H_i: \alpha\beta \neq 0 \rightarrow$ Hay efecto de la interacción de factores en el rendimiento de aceite pirolítico.

4.3.2 Diseño de experimentos. El diseño de experimentos a desarrollar será factorial 2x3, denominado así porque el factor temperatura cuenta con dos (2) niveles mientras que el factor concentración de catalizador tiene tres (3). De esta forma el reciclaje químico por pirólisis catalítica se comienza a realizar según las condiciones de operación elegidas.

Para obtener la matriz de resultados se hace una repetición en cada tratamiento, es decir que hay un duplicado por cada condición a evaluar. Como se desea analizar el efecto de cada factor por separado y la interacción que hay entre ellos, se combinan los dos (2) niveles del factor temperatura con cada nivel del factor concentración de catalizador.

Una vez se ha realizado la respectiva experimentación, se calcula el rendimiento de aceite obtenido en cada pirólisis de la misma forma que se ha calculado con anterioridad para elegir el tiempo de residencia. De este modo se genera la tabla 8, que corresponde a la matriz de resultados del diseño de experimentos y en la cual cada fila hace referencia a un tratamiento (Ver Anexo B).

Tabla 8. Resultados diseño de experimentos 2x3

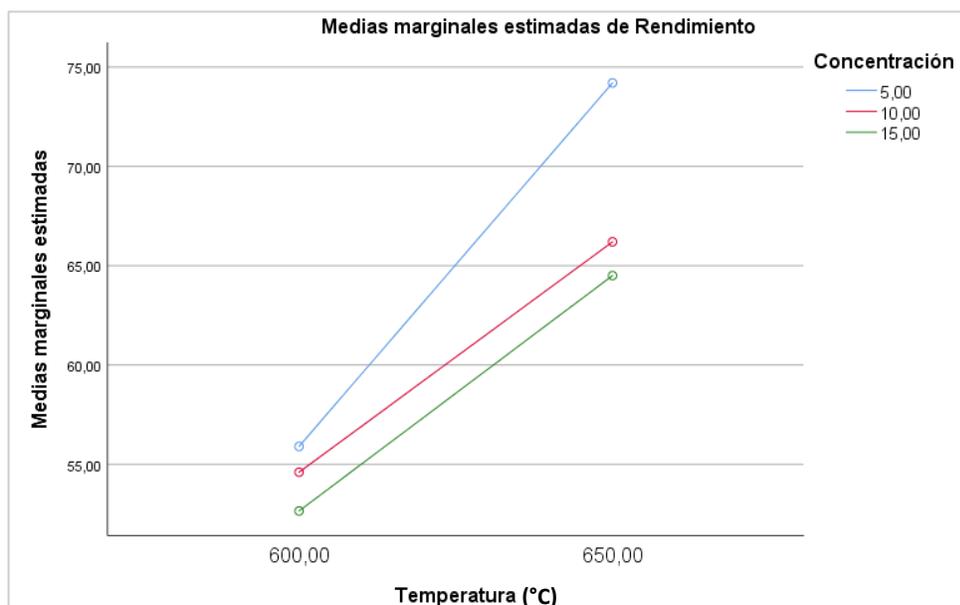
Temperatura (°C)	Concentración de catalizador (%p/p)	Rendimiento de aceite pirolítico (%)		
		Réplica 1	Réplica 2	Promedio
600	5	56.0	55.8	55.6
600	10	54.8	54.4	54.6
600	15	52.5	52.8	52.7
650	5	74.3	74.1	74.2
650	10	66.0	66.4	66.2
650	15	64.6	64.4	64.5

Fuente: Elaboración propia.

La tendencia de los datos de rendimiento de aceite pirolítico obtenidos en la tabla del diseño de experimentos se representa en la gráfica 3, mediante la que se observa que cuando se trabaja con la temperatura más alta se obtiene mayor rendimiento de aceite, mientras que a medida que incrementa la concentración de catalizador, el rendimiento es cada vez menor. Esta gráfica permite analizar la interacción entre los factores del diseño de experimentos, pues a partir de las líneas que representan las concentraciones de 5 y 15%p/p de catalizador, se deduce que existe un efecto positivo con la interacción de la temperatura y la concentración de catalizador⁷⁵ (Ver Anexo B).

⁷⁵ DÍAZ, Abel. Diseño estadístico de experimentos. 2 ed. Medellín, Colombia. Universidad de Antioquia. 2002. p. 153-175.

Gráfica 3. Efecto de la interacción de factores en la variable respuesta



Fuente: IBM Corp. 2013. IBM SPSS Statistics para Windows. Versión 22.

El rendimiento de aceite pirolítico obtenido experimentalmente está entre 52 y 74%, lo cual coincide con lo reportado en otras investigaciones, ya que como se dijo en el capítulo 3, el rendimiento esperado para esta mezcla de PP, PE y PA era de 49 a 95%⁷⁶. Además, el comportamiento respecto a la temperatura también permite afirmar que efectivamente a mayor temperatura se obtiene un mejor rendimiento de aceite pirolítico⁷⁷. Por otro lado, a medida que incrementa la concentración de catalizador, el rendimiento de aceite pirolítico disminuye, por lo que este es el único parámetro que no concuerda con lo encontrado en otras investigaciones; no obstante, en estos estudios también se afirma que el catalizador tiene la función de incrementar la producción de gases y obtener aceites de mejor calidad⁷⁸, por lo que más adelante se analizarán estas dos posibilidades.

Con el objetivo de comprobar que tanto los dos factores como la interacción entre ellos tienen efecto en la variable respuesta, se desarrolla un análisis estadístico de varianza ANOVA. De tal modo que los resultados obtenidos con este permitan suponer la forma en que se pueden ajustar los datos del diseño de experimentos a un modelo matemático, mediante el cual se predice el valor de la variable dependiente en función de la temperatura y la concentración de catalizador.

⁷⁶ AHMAD. Op. cit., p. 663-671.

⁷⁷ SINGH, R. K. y RUJ, B. *Time and temperature depended fuel gas generation from pyrolysis of real world municipal plastic waste*. En: Fuel. Junio, 2016. Vol. 174. p. 164-171.

⁷⁸ PARK, D. W., et al. *Catalytic degradation of polyethylene over solid acid catalysts*. En: Polymer degradation and stability. Agosto, 1999. Vol. 65, no. 2. p. 193-198.

4.3.3 Análisis estadístico de los datos. Una vez se tienen los datos del diseño de experimentos y se han planteado las hipótesis, se genera la tabla ANOVA mediante el programa de análisis estadístico IBM SPSS. Los datos obtenidos se presentan en la tabla 9, pues estos permiten conocer si los factores y la interacción entre ellos tienen algún efecto en la variable dependiente.

Tabla 9. ANOVA

Variable dependiente: Rendimiento

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	699,044 ^a	5	139,809	3165,483	,000
Intersección	45153,601	1	45153,601	1022345,679	,000
Temperatura	581,021	1	581,021	13155,189	,000
Concentración	89,172	2	44,586	1009,491	,000
Temperatura * Concentración	28,852	2	14,426	326,623	,000
Error	,265	6	,044		
Total	45852,910	12			
Total corregido	699,309	11			

a. R al cuadrado = 1,000 (R al cuadrado ajustada = ,999)

Fuente: IBM Corp. 2013. IBM SPSS Statistics para Windows. Versión 22.

En la tabla ANOVA se presentan los resultados del análisis estadístico para la temperatura, la concentración de catalizador y la interacción entre estos dos factores. El nivel de significancia escogido es de 0.05, que es la probabilidad de cometer errores durante el experimento; los datos por lo general se interpretan a partir de la columna F porque mediante esta se hace una comparación gráfica con valores establecidos en tablas que permiten aceptar o rechazar la hipótesis nula; sin embargo, el software SPSS genera una columna de significancia en la que este análisis se encuentra implícito.

El análisis de la tabla ANOVA se hace mediante dicha columna de significancia, pues esta permite rechazar la hipótesis nula cuando tiene valores por debajo de 0.05⁷⁹; en este caso los datos de significancia obtenidos para los dos factores y la interacción entre ellos son menores a 0.001, por lo cual se rechaza la hipótesis nula en todos los casos, es decir que se confirma que tanto los dos factores como su interacción tienen efecto en la variable respuesta.

⁷⁹ LIBROS CIENTÍFICOS. IBM SPSS STATISTICS. Estadística descriptiva y modelo lineal de regresión múltiple. Estados Unidos. Createspace. 2015. 200 p.

4.3.4 Ajuste de datos experimentales a un modelo de regresión lineal. Para describir de forma numérica el efecto que tienen los factores en la variable respuesta, se observa que los datos pueden ajustarse a un modelo de regresión lineal, mediante el cual se predice el rendimiento de aceite pirolítico a partir de la concentración de catalizador y la temperatura.

Con el objetivo de confirmar que los datos se ajustan a este modelo, se genera la tabla 10 en el programa de análisis estadístico SPSS, que corresponde al resumen del modelo de regresión lineal con los datos del diseño de experimentos; en esta tabla el parámetro R cuadrado indica el porcentaje de varianza de la variable dependiente que es posible explicar con la regresión, por lo que para este caso se explica un 98.1% de la varianza del rendimiento y por lo tanto la regresión lineal es un excelente modelo para ajustar los datos obtenidos.

Tabla 10. Resumen del modelo de regresión lineal

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	,990 ^a	,981	,973	1,30556

a. Predictores: (Constante), Temp.Conc, Temperatura, Concentración

b. Variable dependiente: Rendimiento

Fuente: IBM Corp. 2013. IBM SPSS Statistics para Windows. Versión 22.

Luego de verificar que el modelo se ajusta satisfactoriamente a los datos, se crea la tabla 11 en el programa SPSS, pues mediante esta se obtienen los coeficientes para darle forma a la ecuación de regresión lineal⁸⁰.

Tabla 11. Coeficientes para la ecuación de regresión lineal

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	Sig.
		B	Desv. Error	Beta	
1	(Constante)	-186,767	24,948		,000
	Temperatura	,407	,040	1,334	,000
	Concentración	7,415	2,310	3,965	,012
	Temp.Conc.	-,013	,004	-4,336	,008

a. Variable dependiente: Rendimiento

Fuente: IBM Corp. 2013. IBM SPSS Statistics para Windows. Versión 22.

⁸⁰ Ibid., 200 p.

Los valores de los coeficientes no estandarizados B de la tabla 11 corresponden al número que multiplica a la variable respectiva, de tal forma que al reemplazar los valores en la ecuación 3, se obtiene el modelo matemático que permite conocer el rendimiento de aceite pirolítico aproximado que se obtendrá a partir de las condiciones de temperatura y concentración de catalizador deseadas.

La ecuación de regresión lineal representa de forma numérica el efecto que tienen los factores en la variable respuesta. Mediante el modelo obtenido en la ecuación 3 se puede analizar que al incrementar la temperatura el rendimiento de aceite pirolítico también aumenta, ya que el término positivo siempre es mayor que el negativo, teniendo en cuenta que para la concentración de catalizador los números son significativamente menores que para la temperatura. Por otro lado, al aumentar la concentración de catalizador, el término negativo comienza a ser mayor que el positivo como consecuencia de los altos valores que tiene la temperatura en comparación a la concentración de catalizador, es decir que al aumentar esta variable el rendimiento será cada vez menor.

Ecuación 3. Ajuste de datos mediante el modelo de regresión lineal

$$\text{Rendimiento de aceite (\%)} = B_0 + B_1T + B_2C + B_3TC + E$$

$$\text{Rendimiento de aceite (\%)} = -186.767 + 0.407T + 7.415C - 0.013TC + E$$

Donde:

- T = Temperatura en °C
- C = Concentración de catalizador en %p/p
- E = Error

4.4 RENDIMIENTO DE CARBONILLA Y CONVERSIÓN DEL MATERIAL

Luego de realizar las doce (12) pirólisis con las condiciones seleccionadas, se observa que el color de cada uno de los aceites pirolíticos producidos es diferente dependiendo de la cantidad de catalizador usada en el proceso, por lo cual, en la figura 22 (a) se muestran todos los aceites obtenidos con 5%p/p de catalizador, los que están en la figura 22 (b) corresponden a todos aquellos en los que el proceso tenía 10%p/p de catalizador y la figura 22 (c) contiene a los provenientes de las pirólisis con 15%p/p de catalizador; en cada una de las figuras anteriormente mencionadas, se encuentra tanto el aceite producido con 600°C como aquel que se obtuvo con 650°C.

Figura 22. Aceites pirolíticos obtenidos mediante pirólisis



(a) 5% p/p



(b) 10% p/p



(c) 15% p/p

Fuente: Elaboración propia.

A pesar de que en el diseño de experimentos se encuentra que un incremento en la concentración de catalizador ocasiona una disminución en el rendimiento de aceite pirolítico, es necesario identificar si la pumita permite obtener aceites de mejor calidad o una mayor producción de gases, de forma que se compruebe lo que otros investigadores han encontrado. Durante las pirólisis realizadas se observó que a medida que la concentración de catalizador aumenta, el aceite pirolítico tiende a ser más claro, lo cual sugiere que la pumita tiene efecto en la calidad de aceite producido.

Para analizar la influencia del catalizador, se calcula la conversión de materia prima en aceite pirolítico y gases de la misma forma que se halló en el pre experimento para elegir el tiempo de residencia y, además, se obtiene el rendimiento de carbonilla mediante la ecuación 4, donde el residuo hace referencia a todo lo queda dentro del reactor al finalizar la pirólisis y se presenta una muestra de cálculo referente al proceso realizado a 650°C y 5%p/p de catalizador. Los resultados se representan en la gráfica 4 (Ver Anexo B).

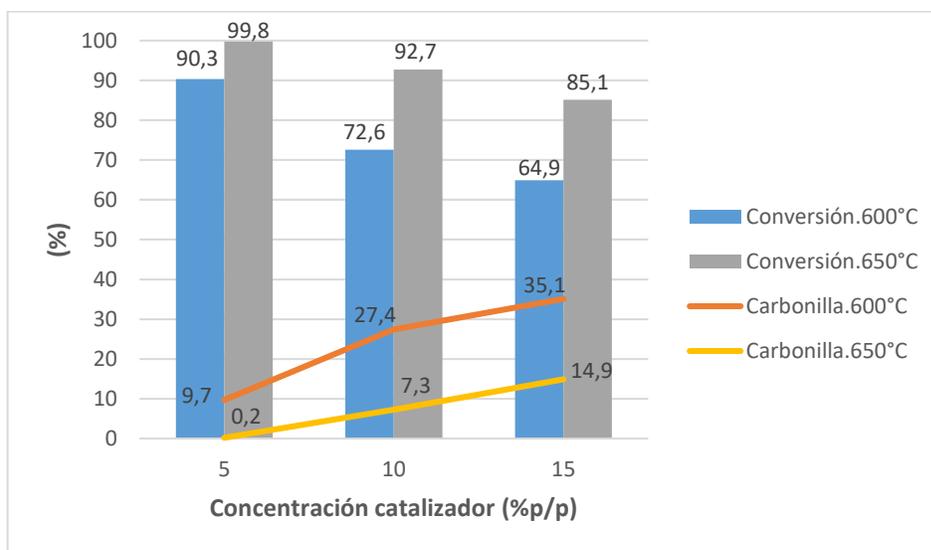
Ecuación 4. Rendimiento de carbonilla producida

$$\text{Rendimiento carbonilla (\%)} = \frac{(\text{Peso residuo} - \text{Peso catalizador}) (g)}{\text{Peso materia prima ingresada (g)}} * 100$$

$$\text{Rendimiento carbonilla (\%)} = \frac{(55 - 53) g}{1000 g} * 100$$

$$\text{Rendimiento carbonilla} = 0.2 \%$$

Gráfica 4. Rendimiento carbonilla y conversión material en aceite y gases



Fuente: Elaboración propia.

Con la gráfica se observa que la conversión de material en aceite y gases incondensables se comporta de manera similar al rendimiento de aceite pirolítico, pues es mayor cuando se trabaja a una temperatura de 650°C y disminuye a medida que incrementa la concentración de catalizador. Por otro lado, la cantidad de carbonilla se ve favorecida de manera inversa porque al trabajar con la temperatura más alta se obtiene menor cantidad, mientras que al aumentar la concentración de catalizador su rendimiento es mayor, lo cual concuerda con investigaciones previas en las que se obtuvo que la conversión del material aumenta con la temperatura⁸¹ y que la cantidad de carbonilla es mayor al disminuir la temperatura e incrementar la concentración de catalizador⁸².

⁸¹ ANUAR. Op. cit., p. 308-326.

⁸² LÓPEZ, A., et al. Influence of time and temperature on pyrolysis of plastic wastes in a semi-batch reactor. *En: Chemical Engineering Journal*. Septiembre, 2011. Vol. 173, no. 1. p. 62-71.

El incremento en la cantidad de carbonilla al realizar el proceso con una temperatura más baja puede ocurrir porque se requiere mayor energía para que las reacciones de craqueo se lleven a cabo, pues si bien con 600°C las moléculas se craquean, algunos compuestos continúan con cadenas largas que les impiden pasar a la fase de vapor⁸³, es por ello que al finalizar el proceso dentro de la marmita se encuentra una mezcla entre estos componentes pesados y algunas trazas del plástico que no logró convertirse.

Por otra parte, a lo largo del documento se ha explicado que el catalizador favorece la producción de aceite pirolítico y gases incondensables⁸⁴, por lo que se dice que esta sustancia fomenta la producción de componentes livianos. El incremento de carbonilla a medida que aumenta la cantidad de pumita en el proceso puede ocurrir porque el catalizador permite que más moléculas pequeñas se desprendan del polímero, de forma que los componentes que quedan dentro de la marmita son de cadena más corta que la inicial pero no lo suficiente para pasar a la fase de vapor⁸⁵.

Adicionalmente, se analiza que el aumento en la producción de carbonilla trae como consecuencia una disminución en la cantidad de hidrocarburos líquidos y gaseosos, pues las moléculas que quedan en el reactor no pasan a la fase de vapor durante el proceso. Como el catalizador fomenta la producción de componentes livianos mediante la retención de compuestos de cadenas largas dentro del reactor⁸⁶, puede decirse que se ve un color más claro en los aceites pirolíticos a medida que aumenta la concentración de catalizador por la presencia de compuestos de menor longitud de cadena en la mezcla líquida de hidrocarburos; sin embargo, este supuesto se estudiará con detalle en el siguiente capítulo.

⁸³ SOBKO, A. A. *Generalized Van der Waals-Berthelot equation of state*. En: Doklady Physics. Agosto, 2008. Vol. 53, no. 8. p. 416-419.

⁸⁴ FUENTES. Op. cit., p. 69-81.

⁸⁵ SOBKO. Op. cit., p. 416-419.

⁸⁶ LÓPEZ, A., *et al.* *Catalytic pyrolysis of plastic wastes with two different types of catalysts: ZSM-5 Zeolite and red mud*. En: Applied catalysis B: Environmental. Mayo, 2011. Vol. 104, no. 3. p. 211-219.

5. DESTILACIÓN ATMOSFÉRICA DE ACEITE PIROLÍTICO PARA LA OBTENCIÓN DE DIÉSEL

Luego de que se ha llevado a cabo el reciclaje químico mediante pirólisis catalítica es necesario destilar el aceite pirolítico con el objetivo de conocer si efectivamente se obtiene diésel mediante este proceso, pues como se dijo en el capítulo 2, este aceite contiene diversas moléculas que corresponden a una amplia gama de hidrocarburos líquidos, los cuales varían entre sí por la cantidad de carbonos que tiene cada uno de ellos. Es por esto que en este capítulo se realizan las curvas de destilación para cada aceite, ya que mediante estas se conocen los hidrocarburos que salen en el destilado; adicionalmente, se obtienen las cantidades de los componentes que fueron separados en la destilación atmosférica y se calculan algunas propiedades a partir de los datos generados en las curvas.

5.1 CURVAS DE DESTILACIÓN

Mediante el equipo que se muestra en la figura 23 se hace una destilación atmosférica basada en la norma ASTM D-86 con cada uno de los aceites obtenidos a partir del reciclaje químico, de modo que se separan los componentes de acuerdo a la cantidad de carbonos que contienen. Al iniciar el calentamiento, las moléculas que se evaporan con mayor rapidez son las que tienen menos carbonos en relación a las demás, es por ello que la gasolina y el keroseno son los primeros componentes que se obtienen en el destilado; el compuesto que sale después de estos corresponde al diésel, pues al tener mayor cantidad de carbonos, requiere una temperatura más alta para poder evaporarse.

Figura 23. Equipo para la destilación atmosférica ASTM D-86

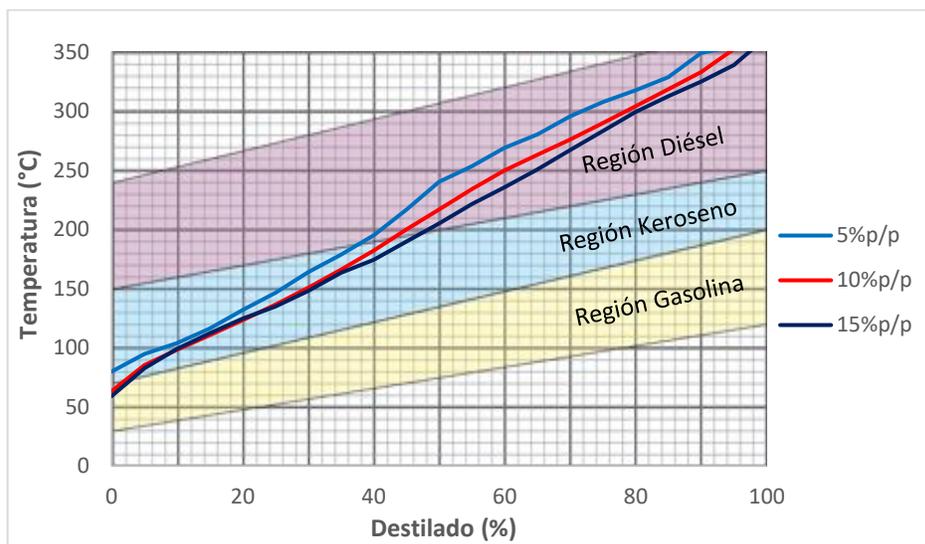


Fuente: Elaboración propia.

No obstante, hay dos compuestos más que se separan en la destilación pero que no se obtienen en el destilado; el primero de ellos son las parafinas, pues si bien las moléculas alcanzan a evaporarse, cuando se condensan se convierten en un sólido ceroso que debe ser sacado al final del proceso, mientras que el segundo corresponde a los componentes pesados que requieren mayor energía de la que se ha suministrado para cambiar de fase y, por lo tanto, quedan en el recipiente inicial.

El equipo permite calentar 100mL de muestra, de tal manera que los compuestos se evaporan paulatinamente según su longitud de cadena para luego pasar por un condensador mediante el cual salen líquidos hacia la probeta. Durante este proceso se registran datos de la temperatura a la que salen los vapores y de la cantidad de destilado que se observa en la probeta, ya que a partir de estos valores se obtiene la curva de destilación. Como los datos se registran a la presión atmosférica de Bogotá, estos deben ser corregidos de acuerdo a la norma ASTM D-2892 para obtener las curvas de destilación que se presentan en las gráficas 5 y 6, mediante las cuales es posible conocer los hidrocarburos que componen la fracción líquida destilada (Ver Anexo C).

Gráfica 5. Curvas de destilación de los aceites obtenidos a 600°C

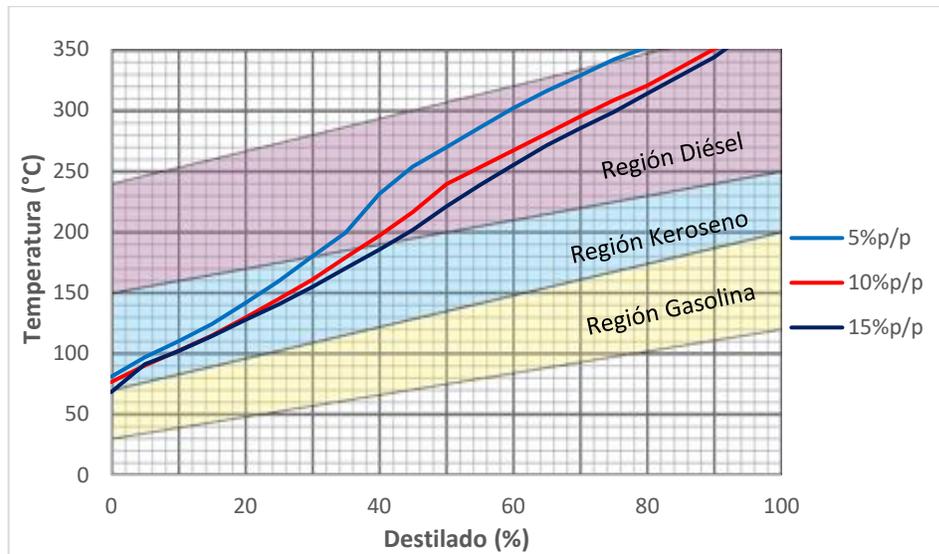


Fuente: CALDERÓN SÁENZ, Felipe. Laboratorios Doctor Calderón. Bogotá, Colombia.

En la gráfica 5 se presentan las curvas de destilación para los aceites pirolíticos obtenidos con 600°C; en estas se observa que los hidrocarburos que componen el destilado son en esencia keroseno y diésel, sin dejar de lado que los aceites obtenidos con 10 y 15%p/p de catalizador contienen una pequeña fracción de gasolina.

Al relacionar las tres curvas anteriormente mencionadas, se analiza que la concentración de catalizador influye en la composición del destilado, pues a medida que esta incrementa, dichas curvas tienden a ser lineales y la región del diésel se alcanza con mayores porcentajes de destilado.

Gráfica 6. Curvas de destilación de los aceites obtenidos a 650°C



Fuente: CALDERÓN SÁENZ, Felipe. Laboratorios Doctor Calderón. Bogotá, Colombia.

De igual manera, la gráfica 6 presenta las curvas de destilación para los aceites obtenidos con 650°C; en estas el análisis es similar al anterior en cuanto a los hidrocarburos obtenidos y el comportamiento de las curvas al incrementar la concentración de catalizador. Al comparar estas curvas con las de la gráfica 5, se observa que en este caso no se obtienen fracciones de gasolina y que las regiones de diésel se alcanzan con menores porcentajes de destilado.

Con los resultados de las curvas de destilación, se comprueba que es posible obtener diésel a partir de los residuos plásticos recolectados en la empresa y, además, se considera que tanto las condiciones de temperatura como las de concentración de catalizador influyen en la proporción de componentes presentes en los aceites pirolíticos.

5.2 PROPORCIÓN DE HIDROCARBUROS PRESENTES EN EL ACEITE

Con el objetivo de analizar el efecto de las condiciones de operación en la cantidad de hidrocarburos que componen cada uno de los aceites pirolíticos producidos, se cuantifican los compuestos separados en la destilación atmosférica. Para conocer la cantidad en peso de cada componente del destilado se separa el keroseno del diésel durante la destilación. En la figura 24 se presentan estos dos compuestos por aparte, donde se observa el diésel a la derecha y el keroseno a la izquierda; los hidrocarburos de esta figura fueron obtenidos a partir de uno de los aceites producidos a 600°C y 15%p/p de catalizador.

Figura 24. Keroseno y diésel del aceite pirolítico a 600°C y 15%p/p



Fuente: Elaboración propia.

Como se mencionó anteriormente, al realizar la destilación atmosférica también se separan parafinas y compuestos pesados; de modo que estos se cuantifican y se obtienen los resultados presentados en la tabla 12, donde los valores corresponden al porcentaje en peso de los hidrocarburos que componen el aceite pirolítico (Ver Anexo C).

Con los datos de la tabla 12 se analiza que efectivamente la temperatura y la concentración de catalizador influyen en la proporción de hidrocarburos en cada aceite ya que a mayor temperatura se favorece la producción de componentes pesados y parafinas, mientras que la cantidad de diésel y keroseno es menor. Esto ocurre como consecuencia de una pirólisis rápida, pues en ésta los componentes se evaporan con facilidad y, por lo tanto, sus moléculas no sufren más reacciones craqueo⁸⁷; es decir que con estos resultados se afirma que una temperatura más alta favorece la obtención de diésel en el destilado.

⁸⁷ JOO, H. S. y GUIN, J. A. *Continuous upgrading of a plastics pyrolysis liquid to an environmentally favorable gasoline range product*. En: *Fuel process technology*. Agosto, 1998. Vol. 57, no. 1. p. 25-40.

Tabla 12. Proporción de hidrocarburos en el aceite

Componentes (%)		Catalizador (%p/p)			
		5	10	15	
Temperatura (°C)	600	Keroseno	40.0	45.4	49.4
		Diésel	45.7	48.6	50.8
		Pesados	8.30	3.00	1.20
	650	Parafina	1.30	0.60	0.00
		Keroseno	36.3	41.2	43.8
		Diésel	43.1	48.8	50.4
		Pesados	17.2	5.00	3.60
		Parafina	1.70	1.50	0.00

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, el incremento en la concentración de catalizador resulta favorable en este caso porque a medida que este parámetro es mayor se obtiene una menor cantidad de compuestos pesados y parafinas, mientras que las proporciones de diésel y keroseno aumentan, lo cual confirma la suposición del capítulo 4 en la que se propuso que el catalizador fomenta la generación de componentes livianos.

5.3 PROPIEDADES DEL ACEITE PIROLÍTICO

A medida que se realizan las destilaciones atmosféricas se toman datos que posteriormente pueden usarse para hallar algunas propiedades del aceite como la densidad relativa, la gravedad API y el índice de cetano. A continuación se presentan los valores calculados para cada una de las propiedades mencionadas.

5.3.1 Densidad relativa. Durante el desarrollo de la destilación atmosférica se obtienen datos útiles de masa y volumen para calcular la densidad del aceite. Los valores medidos están a temperatura ambiente, por lo que mediante la ecuación 5 se realizan las respectivas correcciones y se genera la tabla 13, que contiene los datos de densidad relativa a 15.6°C para cada aceite.

Ecuación 5. Corrección para obtener la densidad relativa a 15.6°C

$$\rho_{rel} = \rho + (-0.0468 * \rho^4 + 0.1569 * \rho^3 - 0.19374 * \rho^2 + 0.1034 * \rho - 0.01917) * (T - 15.6)$$

Fuente: WAUQUIER, J. P. El refino del petróleo. Petróleo crudo, productos petrolíferos, esquemas de fabricación. [s.l.]. Díaz de Santos. 2004. 462 p.

Donde:

- ρ_{rel} = Densidad relativa
- ρ = Densidad
- T = Temperatura

Tabla 13. Densidad relativa del aceite pirolítico

	Densidad relativa 15.6°C (g/mL)	Catalizador (%p/p)		
		5	10	15
Temperatura (°C)	600	0.78	0.77	0.76
	650	0.79	0.78	0.77

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de esta tabla concuerdan con todos los que se han obtenido a lo largo de este capítulo, pues anteriormente se analizó que una concentración de catalizador alta permitía obtener mayor cantidad de componentes livianos en el aceite, es por esto que los valores de densidad son menores a medida que aumenta la cantidad de pumita usada en el proceso. De igual manera, al incrementar la temperatura se obtuvo mayor cantidad de componentes pesados, por lo que las densidades para la temperatura más alta son mayores.

5.3.2 Gravedad API. La gravedad API es otra forma de medir la densidad; para esta propiedad existen rangos establecidos que permiten clasificar el crudo según lo pesado o liviano que sea, de forma que entre menor es el valor de este parámetro, más pesado es el fluido (Ver Anexo C).

A partir de la densidad relativa se calculan los grados API usando la ecuación 6, obteniendo así los datos que se presentan en la tabla 14, donde se observa que todos los aceites hacen parte de la categoría *condensados* porque tienen valores por encima de 42 grados API, lo cual es lo esperado considerando que el crudo fue producido por pirólisis y que este contiene en su mayoría diésel y keroseno.

Ecuación 6. Gravedad API

$$^{\circ}API = \frac{141.5}{\rho_{rel}} - 131.5$$

Tabla 14. Gravedad API del aceite pirolítico

Gravedad API		Catalizador (%p/p)		
		5	10	15
Temperatura (°C)	600	49.1	52.5	53.5
	650	47.6	50.0	52.4

Fuente: Elaboración propia.

5.3.3 Índice de cetano. Este parámetro se calcula según la norma ASTM D-976⁸⁸ que mediante la ecuación 7 relaciona los datos obtenidos en las curvas de destilación con la densidad relativa, de tal modo que se obtiene un valor correspondiente a la capacidad que tiene un combustible para que ocurra la ignición con rapidez, pues entre más alto es el índice de cetano más efectivo es el aceite para iniciar el proceso de combustión. En la tabla 15 se presentan los resultados obtenidos a partir de dicha metodología.

Ecuación 7. Índice de cetano

$$I.C. = 454.74 - 1641.416 * \rho_{rel} + 774.74 * \rho_{rel}^2 - 0.554 * T_{50} + 97.083 * (\log(T_{50}))^2$$

Fuente: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard specification for cetane index*. ASTM D-976. 6 ed. West Conshohocken. ASTM International. 2016. 3 p.

Donde:

- I.C. = Índice de cetano
- ρ_{rel} = Densidad relativa del aceite pirolítico
- T_{50} = Temperatura en °C registrada para el 50% del destilado en las curvas de destilación según la norma ASTM D-86.

Tabla 15. Índice de cetano del aceite pirolítico

Índice de cetano del aceite pirolítico		Catalizador (%p/p)		
		5	10	15
Temperatura (°C)	600	65.5	64.3	61.6
	650	70.1	66.9	65.4

Fuente: Elaboración propia.

⁸⁸ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard specification for cetane index*. ASTM D-976. 6 ed. West Conshohocken. ASTM International. 2016. 3 p.

Con los resultados que se presentan en la tabla 15, se analiza que el aceite pirolítico tiene una excelente capacidad para que la combustión ocurra con rapidez, pues el índice de cetano calculado para cada uno de los aceites, es considerablemente superior al mínimo requerido para el diésel corriente, que es de 45⁸⁹.

⁸⁹ Colombia. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL y MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución 1180. 21, junio, 2006. 8 p.

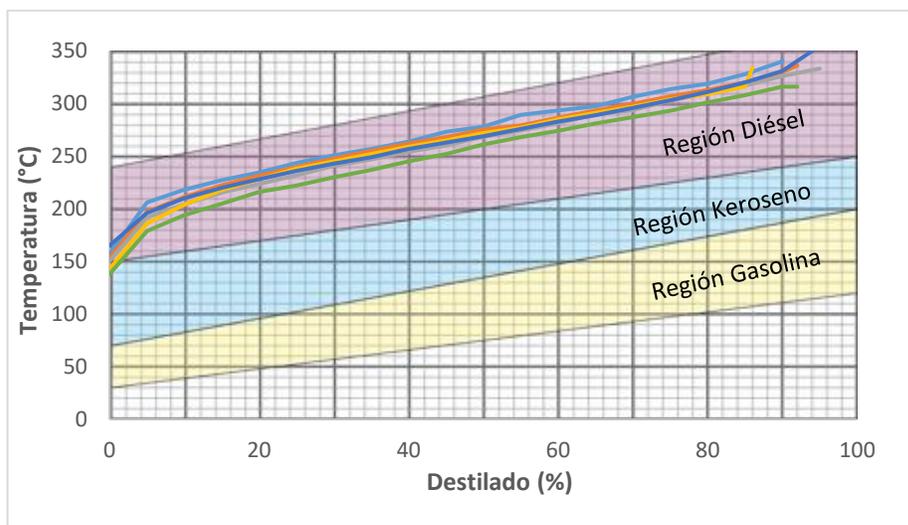
6. CARACTERIZACIÓN DEL DIÉSEL OBTENIDO

Luego de que se ha comprobado que efectivamente se obtiene diésel mediante la pirólisis de los residuos plásticos recolectados en Atlantic FS S.A.S., se analizan las propiedades de este hidrocarburo para determinar su calidad e identificar si cumple con los requerimientos para su uso como combustible; es por ello que en este capítulo se presentan las pruebas realizadas que permiten obtener dichas propiedades y, posteriormente, se analiza la calidad del combustible mediante una comparación de los resultados con la normativa actual vigente del diésel en Colombia. Adicionalmente, para conocer si existen diferencias significativas en la calidad del diésel según la concentración de catalizador y la temperatura que fue usada en el proceso de reciclaje químico, se realizan los análisis para cada uno de los combustibles obtenidos.

6.1 CURVA DE DESTILACIÓN

Cuando se realiza la separación de los hidrocarburos que componen el destilado pueden ocurrir errores operativos que traen como consecuencia fracciones de keroseno en el diésel, es por ello que, de manera similar a como se hizo con el aceite pirolítico, se realizan destilaciones atmosféricas basadas en la norma ASTM D-86, mediante las cuales se obtienen las curvas de destilación corregidas de acuerdo a la norma ASTM D-2892 que se muestran en la gráfica 7, con el objetivo de confirmar que el combustible a analizar es netamente diésel (Ver Anexo D).

Gráfica 7. Curvas de destilación para las fracciones de diésel obtenidas



Fuente: CALDERÓN SÁENZ, Felipe. Laboratorios Doctor Calderón. Bogotá, Colombia.

A partir de las curvas obtenidas se observa que en todos los casos se separó satisfactoriamente el combustible, pues las curvas se encuentran dentro de la región del diésel durante toda la destilación; razón por la cual se confirma que los análisis que se presentan a continuación corresponden únicamente al producto de interés.

6.2 DENSIDAD RELATIVA

La densidad del diésel se determina de acuerdo a la norma NTC 336⁹⁰ que establece un método experimental en el que se pesa un picnómetro vacío y, posteriormente, este se llena con la muestra para pesarlo de nuevo, obteniendo así los datos requeridos para hallar la densidad con la ecuación 8 (Ver Anexo D).

Ecuación 8. Densidad relativa

$$\rho = \frac{(\text{Peso picnómetro lleno} - \text{Peso picnómetro vacío})(g)}{\text{Volumen picnómetro (mL)}}$$

Los valores calculados con esta ecuación se corrigen de la misma forma que se hizo para el aceite pirolítico, de tal forma que la densidad obtenida a 15°C para todos los combustibles fue de 0.81 g/mL, valor que se encuentra dentro del rango de la densidad común del diésel, que es de 0.80 a 0.90 g/mL⁹¹.

La variación en la densidad del combustible en un motor influye en el tiempo de inyección, afectando directamente la potencia de este⁹². El valor calculado se encuentra muy cercano al límite inferior del rango, razón por la cual se analiza que este diésel no debe ser mezclado con combustibles de menor densidad, pues el valor para esta propiedad disminuiría considerablemente, haciendo necesario un mayor consumo de fluido para generar la misma cantidad de energía.

6.3 VISCOSIDAD

Esta propiedad se halla mediante un equipo diseñado con base en la norma ASTM D-88⁹³, es decir, que el procedimiento se fundamenta en el principio del viscosímetro Saybolt.

⁹⁰ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Grasas y aceites animales y vegetales. Método de la determinación de la densidad. NTC 336. [s.l.]. ICONTEC. 2002. 11 p.

⁹¹ MIRALLES DE IMPERIAL, Juan. Bombas de inyección diésel. 7 ed. Barcelona. CEAC. 1996. 288 p.

⁹² TORMOS, B. Diagnóstico motores diésel por análisis de aceite usado. Barcelona. Reverté. 2005. 388 p.

⁹³ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard test method for saybolt viscosity*. ASTM D-88. 7 ed. West Conshohocken. ASTM International. 2013. 7 p.

Para el cálculo de las viscosidades con la ecuación 9 se usa una aguja hipodérmica de calibre 18G por la cual pasan 25mL de fluido, de tal modo que se mide el tiempo requerido para que salga la totalidad de la muestra. Los datos calculados corresponden a la viscosidad dinámica del diésel pero los valores establecidos para este parámetro son de viscosidad cinemática, por lo que se hace la conversión de centiPoise (cP) a centiStokes (cSt) y se obtienen los resultados que se presentan en la tabla 16 (Ver Anexo D).

Ecuación 9. Viscosidad dinámica

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = \frac{\rho_1 * t_1}{\rho_2 * t_2}$$

Donde:

- μ_1 = Viscosidad del agua en cP
- μ_2 = Viscosidad del diésel en cP
- ρ_1 = Densidad del agua en g/mL
- ρ_2 = Densidad del diésel en g/mL
- t_1 = Tiempo que demora en fluir el agua en segundos
- t_2 = Tiempo que demora en fluir el diésel en segundos

Tabla 16. Viscosidad cinemática del diésel obtenido

	Viscosidad 40°C (cSt)	Catalizador (%p/p)		
		5	10	15
Temperatura (°C)	600	2.18	2.21	2.22
	650	2.41	2.27	2.06

Fuente: Elaboración propia.

Con estos datos se observa que las viscosidades de todos los combustibles están entre 1.9 y 5.0 cSt, que es el rango normal para el diésel común⁹⁴, pues en caso de usarse en un motor, viscosidades menores fomentan la fricción entre las partes de este y valores muy elevados impiden el buen funcionamiento. Es por esto que según los valores de la tabla 16, se confirma que el diésel obtenido cumple con los requerimientos para lubricar el sistema de inyección, manteniendo así en buen estado la bomba inyectora y proporcionando una vida duradera al motor⁹⁵.

⁹⁴ Colombia. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Op. cit., 8 p.

⁹⁵ GANDUGLIA, Federico, *et al.* Manual de biocombustibles. [s.l.]. Asociación regional de empresas de petróleo y gas natural en Latinoamérica y el caribe. 2009. 206 p.

6.4 FLASH POINT

El punto de inflamación se halla mediante el método Pensky-Martens de copa cerrada que se encuentra especificado en la norma ASTM D-93⁹⁶, este procedimiento se usa para combustibles cuyo flash point se encuentra en un rango de 40 a 360°C y consiste en calentar progresivamente la muestra mientras se acerca una fuente de ignición a intervalos de tiempo definidos para identificar la temperatura en la que los vapores producidos son inflamables.

Luego de realizar la prueba para cada uno de los combustibles obtenidos, se encontró que todos tienen un flash point de 72°C (Ver Anexo D). Teniendo en cuenta que el valor mínimo permitido para este parámetro es de 52°C en el diésel común⁹⁷, se afirma que la temperatura a la que se generan vapores inflamables, que en presencia de aire y una fuente de ignición pueden causar incendios o explosiones, es considerablemente mayor a la mínima permitida, por lo tanto las muestras no presentan compuestos demasiado volátiles que puedan dificultar el almacenamiento y la manipulación del combustible.

6.5 CLOUD POINT

El punto de nube en un combustible hace referencia a la temperatura en la que el fluido comienza a volverse turbio, lo cual ocurre como consecuencia de la precipitación de las ceras; este parámetro se determina según la norma ASTM D-2500⁹⁸, la cual indica que debe medirse la temperatura de la muestra a medida que esta se va enfriando con el objetivo de registrar el punto en que empiezan a aparecer los primeros cristales en el fluido.

Tabla 17. Cloud point del diésel obtenido

Cloud point (°C)		Catalizador (%p/p)		
		5	10	15
Temperatura	600	10	15	13
(°C)	650	15	18	12

Fuente: Elaboración propia.

⁹⁶ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Test Methods for Flash Point by Pensky-Martens Closed Cup Tester*. ASTM D-93. West Conshohocken. ASTM International. 2015. 18 p.

⁹⁷ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard specification for diesel fuel oils*. ASTM D-975. West Conshohocken. ASTM International. 2002. 25 p.

⁹⁸ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard test method for cloud point of petroleum products and liquid fuels*. ASTM D-2500. West Conshohocken. ASTM International. 2017. 4 p.

En la tabla 17 se presentan las temperaturas registradas para el punto de nube en cada una de las muestras (Ver Anexo D); a partir de estos resultados se afirma que a menores temperaturas, el diésel puede volverse turbio por la precipitación de ceras y ocasionar taponamiento en el sistema, pues el valor máximo permitido para el cloud point es de 10°C⁹⁹.

6.6 CARBÓN CONRADSON

Este análisis se realiza de acuerdo a la norma ASTM D-189¹⁰⁰ para determinar la cantidad de residuo carbonoso que queda en la muestra luego de someterla a un proceso de calentamiento a elevadas temperaturas y en ausencia de oxígeno. El método consiste en colocar un crisol con la muestra a calentar dentro de un montaje que no permita la entrada de aire pero que deje salir los vapores inflamables que se generan durante el proceso, pues estos deben ser quemados una vez salen a la atmósfera. En la tabla 18 se presentan los resultados del porcentaje de carbón conradson calculados para cada muestra a partir de la ecuación 10 (Ver Anexo D).

Ecuación 10. Porcentaje de carbón conradson

$$\% \text{ Carbón} = \frac{(\text{Peso crisol con carbón} - \text{Peso crisol vacío})(g)}{(\text{Peso crisol con muestra} - \text{Peso crisol vacío})(g)} * 100$$

Tabla 18. Carbón conradson del diésel obtenido

	Carbón conradson (%)	Catalizador (%p/p)		
		5	10	15
Temperatura (°C)	600	0.0101	0.0096	0.0089
	650	0.0099	0.0086	0.0074

Fuente: Elaboración propia.

El porcentaje de carbón conradson encontrado en el diésel es despreciable ya que se encuentra en proporciones menores a 0.05%¹⁰¹. Las bajas cantidades de carbón indican que al hacer combustión, el diésel no genera componentes que puedan ocasionar taponamiento o que afecten el funcionamiento del sistema, es decir que en cuanto a este parámetro, se obtuvo un combustible de excelente calidad.

⁹⁹ Nicaragua. REGLAMENTO TÉCNICO CENTROAMERICANO. Anexo resolución 187. 5, noviembre, 2008.

¹⁰⁰ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Test Method for Conradson Carbon Residue of Petroleum Products*. ASTM D-189. West Conshohocken. ASTM International. 2014. 7 p.

¹⁰¹ Colombia. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Op. cit., 8 p.

6.7 CENIZAS

La prueba de cenizas se realiza inmediatamente después de desarrollar el análisis para determinar el carbón conradson porque esta propiedad se cuantifica de acuerdo a la norma ASTM D-482¹⁰². El procedimiento consiste en colocar el crisol con el residuo carbonoso en una mufla a altas temperaturas durante un tiempo determinado, obteniendo de esta manera los datos requeridos para calcular el porcentaje de cenizas mediante la ecuación 11 (Ver Anexo D).

Ecuación 11. Porcentaje de cenizas

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{(\text{Peso crisol con ceniza} - \text{Peso crisol vacío})(g)}{(\text{Peso crisol con muestra} - \text{Peso crisol vacío})(g)} * 100$$

Tabla 19. Cenizas del diésel obtenido

Contenido de cenizas (%)	Temperatura (°C)	Catalizador (%p/p)		
		5	10	15
600	600	0.0049	0.0016	0.0011
650	650	0.0021	0.0012	0.0010

Fuente: Elaboración propia.

Los porcentajes de ceniza calculados se presentan en la tabla 19, donde se puede observar que el diésel cumple satisfactoriamente con la normatividad vigente para este parámetro, pues el límite máximo permitido es de 0.01%¹⁰³; además, como este porcentaje de contaminantes e impurezas es prácticamente nulo, el combustible no afecta el sistema de inyección ni acelera el desgaste de las piezas del motor.

6.8 ÍNDICE DE CETANO

Un diésel de buena calidad debe inflamarse de manera inmediata al entrar en contacto con el aire caliente que proviene del cilindro del motor. Para conocer qué tan rápido ocurre la combustión luego de inyectar el aire, el índice de cetano se obtiene de la misma manera como se calculó para el aceite pirolítico mediante la norma ASTM D-976¹⁰⁴.

¹⁰² AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Test Method for Ash from Petroleum Products*. ASTM D-482. West Conshohocken. ASTM International. 2013. 4 p.

¹⁰³ Colombia. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA y MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 90963. 11, septiembre, 2014. 6 p.

¹⁰⁴ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D-976. Op. cit., 3 p.

Tabla 20. Índice de cetano del diésel obtenido

Índice de cetano		Catalizador (%p/p)		
		5	10	15
Temperatura	600	65.1	61.8	60.0
(°C)	650	63.7	63.2	61.6

Fuente: Elaboración propia.

Los datos que se presentan en la tabla 20 se analizan teniendo en cuenta que el diésel común cuenta con un índice de cetano mínimo de 45¹⁰⁵ y que entre más alto es el valor de este parámetro, más rápido ocurre la combustión; según esto se observa que todos los combustibles producidos tienen excelente facilidad de ignición, pues el lapso de tiempo entre el momento en que el aire entra en contacto con el combustible y lo que tarda en ocurrir la combustión es bastante bajo. Además, en este caso se observa de manera adicional, que el diésel producido en una pirólisis con 600°C y 5%p/p de catalizador presenta el mejor índice de cetano.

6.9 CALIDAD DEL DIÉSEL OBTENIDO SEGÚN LA NORMATIVA VIGENTE

El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial junto con el Ministerio de Minas y Energía de Colombia, crearon la resolución número 1180 del año 2006 con el fin de mejorar la calidad de los combustibles en el país, en dicho documento se establecen los requisitos de calidad para el diésel y la gasolina. Tomando como base los valores establecidos para las propiedades del diésel corriente, se crea la tabla 21, que permite comparar los requerimientos a nivel nacional con los resultados obtenidos en cada una de las pruebas que se han desarrollado a lo largo de éste capítulo.

Según esta tabla, puede analizarse que la mayoría de parámetros cumplen satisfactoriamente con la normativa vigente del país, por lo que se afirma que el combustible obtenido presenta una muy buena calidad, pues tiene excelente facilidad de ignición, los residuos carbonosos e impurezas que contiene son prácticamente nulos, requiere temperaturas muy elevadas para generar vapores inflamables que puedan generar siniestros como explosiones e incendios, tiene una viscosidad que permite mantener el motor en buen estado y su densidad se encuentra dentro de los rangos normales.

¹⁰⁵ Colombia. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Op. cit., 8 p.

Tabla 21. Comparación del diésel obtenido con la normatividad vigente

Propiedad	Método ASTM	Diésel corriente	Diésel obtenido					
			5%	600°C 10%	15%	5%	650°C 10%	15%
Densidad (g/mL)	NTC 336	0.8 – 0.9	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81
Viscosidad 40°C (cSt)	ASTM D-88	1.9 – 5.0	2.18	2.20	2.22	2.41	2.26	2.06
Flash Point (°C)	ASTM D-93	> 52	72.0	72.0	72.0	72.0	72.0	72.0
Cloud Point (°C)	ASTM D-2500	< 10	10.0	15.0	13.0	15.0	18.0	12.0
Carbón conradson (%)	ASTM D-189	< 0.2	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Cenizas (%)	ASTM D-482	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Índice de cetano	ASTM D-976	> 45	65.1	61.8	60.0	63.7	63.2	61.6

Fuente: Elaboración propia.

El único parámetro que no cumple con la normativa es el punto de nube, pues para esta propiedad los valores obtenidos fueron más altos que el mínimo permitido. Por esta razón debe hacerse la aclaración de que a temperaturas muy bajas, en el diésel pueden aparecer precipitaciones que interfieren con el transporte del fluido y podrían generar taponamientos; sin embargo, se confirma que este diésel es apto para mezclar con otros combustibles y ser usado en diferentes procesos para la generación de energía.

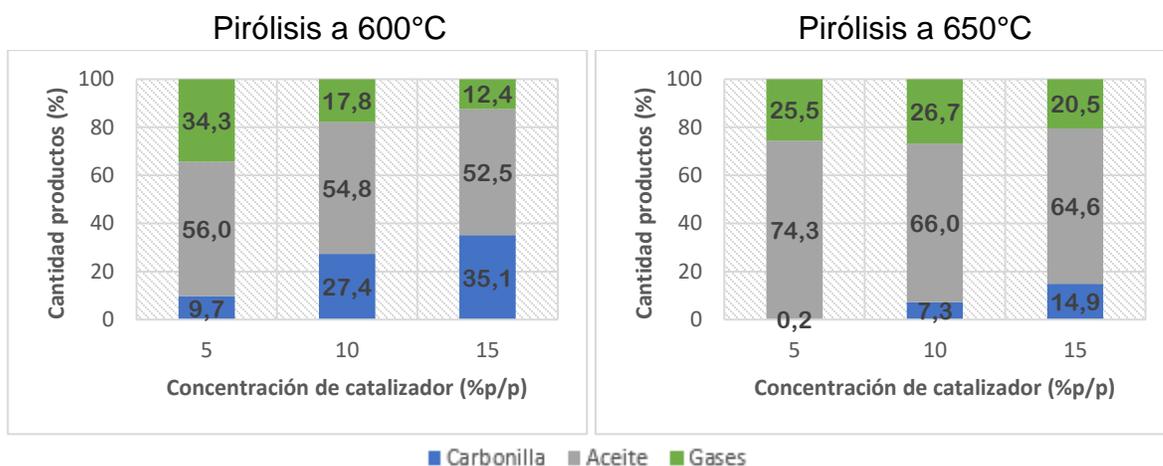
Las diferencias entre los resultados obtenidos para cada combustible no son considerables, por lo que también es posible afirmar que las condiciones de temperatura y concentración de catalizador usadas en cada una de las pirólisis, no tienen influencia significativa en la calidad del diésel obtenido.

7. ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO GLOBAL DEL PROCESO

Luego de que se ha verificado que el combustible producido cumple con la normatividad vigente para el diésel corriente, se analiza el rendimiento global del proceso con el fin de resumir las cantidades producidas de los componentes en cada una de las pirólisis. De igual manera, se observa el efecto de la temperatura y la concentración de catalizador en el rendimiento del diésel, de forma que se concluye sobre las condiciones que favorecen el proceso global y la viabilidad de la alternativa de reciclaje químico para los plásticos de la empresa.

A lo largo de este trabajo se ha hablado de que en el proceso de pirólisis se producen básicamente tres componentes que son la carbonilla, el aceite pirolítico y los gases incondensables; en la gráfica 8 se observa el porcentaje producido de cada una de estas sustancias según las condiciones de operación, teniendo en cuenta que la cantidad de gases es calculada mediante el balance de masa que se presenta en la ecuación 12, donde la muestra de cálculo corresponde al proceso realizado con 5% p/p de catalizador y 650°C de temperatura (Ver Anexo E).

Gráfica 8. Rendimiento de los tres productos principales en cada pirólisis



Fuente: Elaboración propia.

Ecuación 12. Balance de masa del proceso de pirólisis

$$\text{Plástico} + \text{Catalizador} = \text{Carbonilla} + \text{Aceite} + \text{Gases} + \text{Catalizador}$$

$$\text{Gases} = \text{Plástico} - \text{Carbonilla} - \text{Aceite}$$

$$\text{Gases} = 1000 \text{ g} - 2 \text{ g} - 743 \text{ g} = 255 \text{ g} \rightarrow 25.5\%$$

En la gráfica 8 se observa que con una temperatura mayor se obtienen mejores rendimientos de aceite y se minimiza la cantidad de carbonilla, pero al tener en cuenta únicamente la concentración de catalizador se analiza que a medida que este parámetro incrementa se produce más carbonilla y una menor cantidad de aceite, es decir que la temperatura más alta y la concentración de catalizador más baja son las condiciones recomendadas para la producción de aceite pirolítico, pues así se obtienen grandes cantidades de este hidrocarburo y la cantidad de carbonilla es despreciable¹⁰⁶¹⁰⁷.

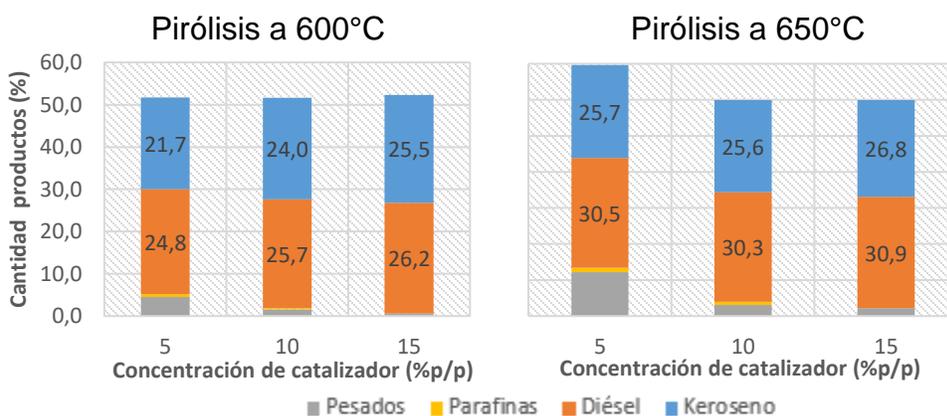
En el capítulo 5 se observó que las condiciones de operación con las que se obtiene mayor rendimiento de aceite pirolítico son contrarias a aquellas con las que se favorece la presencia de diésel en el destilado de este hidrocarburo líquido. En la gráfica 9 se presenta el rendimiento global de cada uno de los componentes hidrocarbonados presentes en el aceite, obtenidos a partir de la ecuación 13, donde la muestra de cálculo corresponde al rendimiento de diésel para el proceso de pirólisis a 650°C y 15% p/p de catalizador (Ver Anexo E).

Ecuación 13. Rendimiento global de los hidrocarburos pirolíticos líquidos

$$Rendimiento\ Global\ (\%) = \frac{Peso\ hidrocarburo\ (g)}{Peso\ materia\ prima\ ingresada\ (g)} * 100$$

$$Rendimiento\ Global\ (\%) = \frac{309\ g}{1000\ g} * 100 = 30.9\%$$

Gráfica 9. Rendimiento de los hidrocarburos del aceite en cada pirólisis



Fuente: Elaboración propia.

¹⁰⁶ LÓPEZ. *Catalytic pyrolysis of plastic wastes with two different types of catalysts*. Op. cit., p. 211-219.

¹⁰⁷ ANUAR. Op. cit., p. 308-326.

A partir de la gráfica 9 se analiza que para obtener mayor cantidad de diésel la temperatura más alta continúa teniendo un efecto positivo. Además, se observa que el parámetro influyente en la producción de diésel es la concentración de catalizador, pues a pesar de que anteriormente se obtenía una menor cantidad de aceite pirolítico con 15%p/p de pumita, con esta gráfica se observa que con esa misma concentración de catalizador se obtiene un rendimiento más alto de diésel. Por esta razón se puede decir que una pequeña cantidad de aceite obtenido con altas concentraciones de catalizador permite generar más diésel que el que se produce con una gran cantidad de aceite obtenido con baja concentración de pumita, lo cual ocurre como consecuencia de que el catalizador fomenta la producción de hidrocarburos livianos en el aceite¹⁰⁸.

El incremento en la concentración de catalizador también permite obtener menos componentes pesados y parafinas como se evidencia en otras investigaciones¹⁰⁹, pero esta sustancia es imposible de regenerar luego de que se ha realizado el reciclaje químico, lo cual implica un costo adicional en cada pirólisis a realizar. Adicionalmente, en la gráfica 9 se puede observar que el aumento en el rendimiento del diésel en relación a la concentración de catalizador es de 0.2 a 1%, por lo que el uso de esta sustancia no se considera viable dentro de este proceso.

Por último se concluye que este proceso de reciclaje químico es una excelente alternativa para darle uso a los desechos plásticos de la empresa, pues usando condiciones de temperatura de 650°C y concentraciones de catalizador de 5%p/p, dichos residuos poliméricos se transforman en diésel (31%), keroseno (26%), gases incondensables (30%), componentes pesados y parafinas (13%); además, según la normatividad vigente de Colombia, el diésel producido puede ser usado bien sea al interior o fuera de la empresa para generar energía.

¹⁰⁸ LÓPEZ. *Catalytic pyrolysis of plastic wastes with two different types of catalysts*. Op. cit., p. 211-219.

¹⁰⁹ OLAZAR, M., et al. *Influence of FCC catalyst steaming on HDPE pyrolysis product distribution*. En: Journal of analytical and applied pyrolysis. Mayo, 2009. Vol. 85, no. 1. p. 359-365.

8. CONCLUSIONES

- Mediante la caracterización por aspecto físico, efectos del calor, punto de fusión, solubilidad y la prueba beilstein para los residuos sólidos plásticos transparentes que desecha la empresa durante su proceso de empaque, se identificó que estos materiales poliméricos están compuestos de polietileno, polipropileno y poliamida.
- Al realizar el reciclaje químico por pirólisis con las condiciones de operación elegidas, se observa que el rendimiento de aceite pirolítico se favorece con altas temperaturas y bajas concentraciones de catalizador, por lo cual, el rendimiento más alto obtenido fue de 74% con 650°C y 5%p/p de catalizador.
- La evaluación del efecto de los factores temperatura y concentración de catalizador en el rendimiento de aceite pirolítico se hizo mediante un análisis estadístico ANOVA, conociendo así que tanto los dos factores como la interacción entre ellos tienen efecto en la variable respuesta; razón por la cual se ajustan los datos experimentales a un modelo de regresión lineal.
- A partir de destilación atmosférica se obtienen las curvas de destilación mediante las cuales se identificó que el aceite pirolítico contiene diésel y keroseno; además, con este proceso se separa cada uno de los hidrocarburos presentes en el aceite pirolítico y se cuantifican, de tal manera que se confirma que el catalizador fomenta la producción de componentes livianos, pues a mayores concentraciones de pumita, mayor contenido de diésel y keroseno presentan los aceites.
- La caracterización según la densidad relativa, viscosidad, flash point, cloud point, carbón conradson, cenizas e índice de cetano del diésel, permite afirmar que el combustible obtenido es de buena calidad, pues cumple con los parámetros establecidos en la resolución 1180 del 2006.
- Las condiciones que favorecen la producción de diésel son contrarias a las que fomentan la generación de aceite pirolítico; por lo que el rendimiento global más alto de diésel fue de 30.9%, obtenido con el aceite que se produjo a 650°C de temperatura y 15%p/p de catalizador.
- El incremento en la concentración de catalizador no genera un aumento considerable en el rendimiento de diésel; además, esta sustancia es imposible de regenerar, por lo cual se considera que el uso de catalizador no tiene influencia significativa en el proceso.

9. RECOMENDACIONES

- Evaluar la obtención de diésel a partir de los residuos plásticos de la empresa sin ningún tipo de pretratamiento.
- Realizar el proceso de reciclaje químico con los plásticos que contienen tinta para conocer su influencia en los productos pirolíticos.
- Conocer la cantidad de residuos sólidos plásticos que desecha la empresa en masa.
- Utilizar técnicas de muestreo estratificado o estadístico para obtener una muestra representativa de desechos.
- Homogeneizar la materia prima para que este deje de ser un factor variable dentro del proceso.
- Medir de forma continua el rendimiento de aceite pirolítico para así obtener el rendimiento en tiempo real y disminuir la cantidad de corridas.
- Hacer primero los pre experimentos para determinar los niveles de los factores, de forma que estos sean criterios para establecer otros parámetros como el tiempo de residencia.
- Encontrar técnicas de separación que permitan obtener la carbonilla y el catalizador por aparte, de modo que se pueda estudiar un uso alternativo para dicho hidrocarburo pesado.
- Recolectar, cuantificar y analizar los gases producidos durante la pirólisis para evaluar si pueden ser usados como un producto energético.
- Tomar valores intermedios de temperatura para identificar si hay cambios significativos en el gasto energético.
- Evaluar un sistema de tratamiento de aguas para el agua del condensador, pues esta sale bastante contaminada.
- Plantear un nuevo diseño del reactor en el que los vapores pirolíticos se condensen sin contaminar el agua.
- Adecuar el equipo para obtener el consumo energético del proceso, de modo que sea posible realizar un balance energético.

- Adecuar el equipo para que sea posible sacar las fracciones continuamente, de forma que sea posible analizarlas, medirlas y tomar muestras con el objetivo de conocer su composición.
- Cambiar el dispositivo que permite medir la presión durante el proceso de pirólisis por uno más especializado.
- Evaluar el efecto de la presión en el proceso de reciclaje químico por pirólisis catalítica.
- Realizar el proceso mediante pirólisis térmica con el objetivo de conocer el rendimiento de aceite pirolítico y diésel sin necesidad de usar un catalizador.
- Analizar el catalizador para confirmar si el peso de este es constante durante todo el proceso.
- Hacer un estudio molecular que permita conocer por qué el aceite obtenido es más claro a medida que se usa mayor cantidad de catalizador en la pirólisis.
- Estudiar si el combustible obtenido puede ser mezclado con aditivos o con otros combustibles para mejorar su calidad.
- Analizar qué parámetros influyen en el cloud point del diésel obtenido para minimizarlo y así obtener un combustible que cumpla con toda la normativa.
- Realizar pruebas del poder calorífico del combustible obtenido en motores diésel.
- Desarrollar un análisis financiero mediante el cual se conozca la viabilidad económica del proceso.

BIBLIOGRAFÍA

ACHAW OWUSU, Prosper, *et al.* *Reverse engineering of plastic waste into useful fuel products*. En: Journal of analytical applied pyrolysis. Marzo, 2017. Vol. 130. p. 285-293.

AGUILAR VIRGEN, Quetzalli, *et al.* *Potencial de recuperación de residuos sólidos domésticos dispuestos en un relleno sanitario*. En: Revista de Ingeniería. Universidad de los Andes. Diciembre, 2010. No. 32. p. 16-27.

AHMAD, I., *et al.* *Pyrolysis study of polypropylene and polyethylene into premium oil products*. En: International journal of green energy. Marzo, 2014. Vol. 12, no. 7. p. 663-671.

AL-SALEM, S. M., *et al.* *A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW)*. En: Journal of environmental management. Julio, 2017. Vol. 197. p. 177-198.

ALVARADO, José Gregorio, *et al.* *Rol de la química orgánica en los procesos de conversión de hidrocarburos*. En: Educación química. Octubre, 2015. Vol. 26. p. 288-298.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard specification for fuel oils*. ASTM D-396. West Conshohocken. ASTM International. 2018. 12 p.

_____. *Standard viscosity-temperature charts for liquid petroleum products*. ASTM D-341. West Conshohocken. ASTM International. 2017. 6 p.

_____. *Standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids (and calculation of dynamic viscosity)*. ASTM D-445. West Conshohocken. ASTM International. 2017. 17 p.

_____. *Standard test method for density, relative density (specific gravity), or API gravity of crude petroleum and liquid petroleum products by hydrometer method*. ASTM D-1298. West Conshohocken. ASTM International. 2017. 8 p.

_____. *Standard test method for cloud point of petroleum products and liquid fuels*. ASTM D-2500. West Conshohocken. ASTM International. 2017. 4 p.

_____. *Standard specification for cetane index*. ASTM D-976. 6 ed. West Conshohocken. ASTM International. 2016. 3 p.

_____. *Standard test method for water and sediment in fuel oils by the centrifuge method (laboratory procedure)*. ASTM D-1796. West Conshohocken. ASTM International. 2016. 7 p.

_____. *Standard test method for Water and sediment in middle distillate fuels by centrifuge*. ASTM D-2709. West Conshohocken. ASTM International. 2016. 3 p.

_____. *Standard Test Methods for Flash Point by Pensky-Martens Closed Cup Tester*. ASTM D-93. West Conshohocken. ASTM International. 2015. 18 p.

_____. *Standard test method for hydrocarbon types in liquid petroleum products by fluorescent indicator adsorption*. ASTM D-1319. West Conshohocken. ASTM International. 2015. 9 p.

_____. *Standard test method for determination of carbon residue (micro method)*. ASTM D-4530. West Conshohocken. ASTM International. 2015. 7 p.

_____. *Standard Test Method for Conradson Carbon Residue of Petroleum Products*. ASTM D-189. West Conshohocken. ASTM International. 2014. 7 p.

_____. *Standard test method for determining the flammability characteristics of nonrigid solid plastics*. ASTM D-4804. West Conshohocken. ASTM International. 2014. 6 p.

_____. *Standard test method for distillation of petroleum products at atmospheric pressure*. ASTM D-86. West Conshohocken. ASTM International. 2013. 29 p.

_____. *Standard test method for saybolt viscosity*. ASTM D-88. 7 ed. West Conshohocken. ASTM International. 2013. 7 p.

_____. *Standard Test Method for Ash from Petroleum Products*. ASTM D-482. West Conshohocken. ASTM International. 2013. 4 p.

_____. *Standard test method calculated cetane index by four variable equation*. ASTM D-4737. West Conshohocken. ASTM International. 2004. 4 p.

_____. *Standard test method API gravity of crude petroleum and petroleum products (Hydrometer method)*. ASTM D-287. West Conshohocken. ASTM International. 2002. 5 p.

_____. *Standard specification for diesel fuel oils*. ASTM D-975. West Conshohocken. ASTM International. 2002. 25 p.

ANUAR SHARUDDIN, Shafferina Dayana, *et al.* *A review on pyrolysis of plastic wastes*. En: Energy conversion and management. Mayo, 2016. Vol. 115. p. 308-326.

_____. *Energy recovery from pyrolysis of plastic waste: Study on non-recycled plastics (NRP) data as the real measure of plastic waste.* En: Energy conversion and management. Septiembre, 2017. Vol. 148. p. 925-934.

ASOCIACIÓN DE LABORATORIOS FARMACÉUTICOS DE INVESTIGACIÓN. Manual para el control de calidad de materiales de empaque en la industria farmacéutica en Colombia. [s.l.]. AFIDRO. 1986. p. 400-444.

ATLANTIC. Quienes somos. [online]. Los Ángeles. Disponible en: <<http://atlantic.la/quienes-somos/>>

BELTRÁN RICO, Maribel y MARCILLA GOMIS, Antonio. Tecnología de polímeros. Procesado y propiedades. Universidad de Alicante. 2012. p. 19-22.

BILLMEYER, F. La ciencia de las macromoléculas. En: Ciencia de los polímeros. 2 ed. New York. Reverté. 2004. p. 3-22.

BRIASSOULIS, D.; HISKAKIS, M. y BARBOU, E. *Technical specifications for mechanical recycling of agricultural plastic waste.* En: Waste Management. Junio, 2013. Vol. 33, no. 6. p. 1516-1530.

CABILDO MIRANDA, María del Pilar, *et al.* Reciclado y tratamiento de residuos. España. UNED. 2008. 390 p.

CALDERÓN SÁENZ, Felipe. La producción de combustibles vehiculares a partir de plásticos de desecho. [s.l.]. Dr. Calderón laboratorios. 2016. 226 p.

CALLISTER, William D. Características, aplicaciones y conformación de los polímeros. En: Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales 2. 3 ed. Barcelona. Reverté. 2007. p. 491-530.

CASTELLS, Xavier Elías y VELO GARCÍA, Enric. La pirólisis. Tratamiento y valorización energética de residuos. Ediciones Díaz de Santos. España. 2013. 88 p.

CEPELIOGULLAR, Ozge. y PUTUN, Ayse E. *Utilization of two different types of plastic wastes from daily and industrial life.* En: ICOEST Cappadocia. Junio, 2013. p. 1-13.

CHEN, D., *et al.* *Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review.* En: Waste management. Diciembre, 2014. Vol. 34, no. 12. p. 2466-2486.

CID FRANCO, Paula. Caracterización microscópica de polímeros multicapa para envasados de alimentos. Trabajo de grado ingeniería de tecnologías industriales. España. Universidad politécnica de Madrid. 2016. 98 p.

COLLYER, A. A. *A practical guide to the selection of high-temperature engineering thermoplastics*. [s.l.]. Elsevier Advanced technology. 1990. 101 p.

Colombia. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL y MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución 1180. 21, junio, 2006. 8 p.

Colombia. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA y MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 90963. 11, septiembre, 2014. 6 p.

DAS, Pallab y TIWARI, Pankaj. *Valorization of packaging plastic waste by slow pyrolysis*. En: Resources, conservation and recycling. Enero, 2018. Vol. 128. p. 69-77.

DE MORAIS ARAÚJO, Aruzza Mabel, *et al*. *Thermal and catalytic pyrolysis of sunflower oil using AIMCM-41*. En: Renewable Energy. Febrero, 2017. Vol. 101. p. 900-906.

DÍAZ, Abel. *Diseño estadístico de experimentos*. 2 ed. Medellín, Colombia. Universidad de Antioquia. 2002. 284 p.

FAKHRHOSEINI, S. M. y DASTANIAN, M. *Predicting pyrolysis products of PE, PP and PET using NRTL activity coefficient model*. En: Journal of chemistry. 2013. p. 5-10.

FIVGA, Antzela y DIMITRIOU, Ioanna. *Pyrolysis of plastic waste for production of heavy fuel substitute: A techno-economic assessment*. En: Energy. Abril, 2018. Vol. 149. p. 865-874.

FUENTES, Edwin G. *Mecanismo de degradación térmica y catalítica de poliestireno bajo condiciones de hidrocraqueo*. En: Avances en Ciencias e Ingenierías. Septiembre, 2012. Vol. 3, no. 3. p. 69-81.

GANDUGLIA, Federico, *et al*. *Manual de biocombustibles*. [s.l.]. Asociación regional de empresas de petróleo y gas natural en Latinoamérica y el caribe. 2009. 206 p.

GARCÍA, Jeannette M. y ROBERTSON, Megan L. *The future of plastics recycling*. En: Science. Noviembre, 2017. Vol. 358. p. 870-872.

GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. *Análisis y diseño de experimentos*. 3 ed. México D.F. McGraw Hill Publishing Co. 2012. 487 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Petróleo y sus derivados. Combustibles para motores diésel. NTC 1438. [s.l.]. ICONTEC Internacional. 2013. 9 p.

_____. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Sexta actualización. Bogotá. ICONTEC Internacional. 2008. 14 p.

_____. Referencias bibliográficas. Contenido, forma y estructura. NTC 5613. Bogotá. 2008. 12 p.

_____. Envases plásticos. Uso general. NTC 5511. [s.l.]. ICONTEC Internacional. 2007. 15 p.

_____. Biodiésel para uso en motores diésel. Especificaciones. NTC 5444. [s.l.]. ICONTEC Internacional. 2006. 15 p.

_____. Grasas y aceites animales y vegetales. Método de la determinación de la densidad – Masa por volumen convencional. NTC 336. [s.l.]. ICONTEC. 2002. 11 p.

_____. Materiales, compuestos y artículos plásticos para uso en contacto con alimentos y bebidas. NTC 5023. [s.l.]. ICONTEC Internacional. 2001. 19 p.

_____. Referencias documentales para fuentes de información electrónicas. NTC 4490. Bogotá. ICONTEC. 1998. 12 p.

_____. Plásticos. Determinación de los efectos de productos químicos líquidos, incluyendo el agua en los materiales plásticos. NTC 1027. [s.l.]. ICONTEC Internacional. 1997. 21 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION. *Determination of melting behavior (melting temperature or melting range) of semi-crystalline polymers*. ISO 3146. [s.l.]. ISO. 3 ed. 2000. 7 p.

INTRATEC SOLUTIONS. *Technology Economics. Polypropylene production via gas phase process*. 2013. 70 p.

JOO, H. S. y GUIN, J. A. *Continuous upgrading of plastics pyrolysis liquid to an environmentally favorable gasoline range product*. En: Fuel process technology. Agosto, 1998. Vol. 57, no. 1. p. 25-40.

KLEIN, Cornelis y HURLBUT, Cornelius S. Manual de mineralogía. [s.l.]. Editorial Reverté. 1996. 392 p.

KRICHELDORF, Hans. *Handbook of polymer synthesis. Part B*. Nueva York. Marcel Dekker. 1992. p. 947-1197.

KUMAR, S. y SINGH, R. K. *Recovery of hydrocarbon liquid from waste high density polyethylene by thermal pyrolysis*. En: Brazilian journal of chemical engineering. Diciembre, 2011. Vol. 28, no. 4. p. 659-667.

LIBROS CIENTÍFICOS. IBM SPSS STATISTICS. Estadística descriptiva y modelo lineal de regresión múltiple. Estados Unidos. Createspace. 2015. 200 p.

LIME. Acta de aforo Atlantic FS S.A.S. Bogotá D.C. Marzo, 2017.

LÓPEZ, A., *et al.* *Catalytic pyrolysis of plastic wastes with two different types of catalysts: ZSM-5 Zeolite and red mud*. En: Applied catalysis B: Environmental. Mayo, 2011. Vol. 104, no. 3. p. 211-219.

_____. *Influence of time and temperature on pyrolysis of plastic wastes in a semi-batch reactor*. En: Chemical Engineering Journal. Septiembre, 2011. Vol. 173, no. 1. p. 62-71.

MARCILLA, A.; BELTRÁN, M. I. y NAVARRO, R. *Thermal and catalytic pyrolysis of polyethylene over HZSM₅ and HUSY zeolites in a batch reactor under dynamic conditions*. En: Applied catalysis B environmental. Febrero, 2009. Vol. 86, no. 1. p. 78-86.

MIANDAD, R., *et al.* *Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review*. En: Process safety and environment protection. Julio, 2016. Vol. 102. p. 822-838.

_____. *Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil*. En: International biodeterioration and biodegradation. Abril, 2017. Vol. 119. p. 239-252.

MILIOS, Leonidas, *et al.* *Plastic recycling in the Nordics: A value chain market analysis*. En: Waste management. Junio, 2018. Vol. 76. p. 180-189.

MIRALLES DE IMPERIAL, Juan. Bombas de inyección diésel. 7 ed. Barcelona. CEAC. 1996. 288 p.

MIRANDA, Rosa, *et al.* *Vacuum pyrolysis of PVC I. Kinetic study*. En: Polymer degradation and stability. Abril, 1998. Vol. 64, no. 1. p. 127-144.

MONEGAL FERRÁN, Mariona. Introducción al SPSS. Manipulación de datos y estadística descriptiva. Barcelona. Universidad de Barcelona. 1999. 165 p.

MWANZA, Bupe Gertrude; MBOHWA, Charles y TELUKDARIE, Armesh. *Strategies for the recovery and recycling of plastic solid waste (PSW): A focus on plastic manufacturing companies*. En: Procedia manufacturing. 2018. Vol. 21. p. 686-693.

NADKARNI KISHORE, R. A. *Guide to ASTM test methods for the analysis of petroleum products and lubricants*. 2 ed. West Conshohocken. ASTM International. 2007. 299 p.

Nicaragua. REGLAMENTO TÉCNICO CENTROAMERICANO. Anexo de la resolución 185. 5, noviembre, 2008.

NWABUE, F. I.; UNAH, U. y ITUMOH, E. J. *Production and characterization of smokeless bio-coal briquettes incorporating plastic waste materials*. En: Environmental technology and innovation. Noviembre, 2017. Vol. 8. p. 233-245.

OLAZAR, M., *et al.* *Influence of FCC catalyst steaming on HDPE pyrolysis product distribution*. En: Journal of analytical and applied pyrolysis. Mayo, 2009. Vol. 85, no. 1. p. 359-365.

ONWUDILI, J. A.; INSURA, N. y WILLIAMS, P. T. *Composition of products from the pyrolysis of polyethylene and polystyrene in a closed batch reactor: Effects of temperature and residence time*. En: Journal of analysis and applied pyrolysis. Noviembre, 2009. Vol. 86, no. 2. p. 293-303.

ORTUÑO, Ángel. *Petroleoquímica*. En: Introducción a la química industrial. España. Reverté. 2006. p. 341-380.

PAREDES MELESIO, Roberto y RAMÍREZ, Andrés María. *Zeolita Natural. Alternativa ecológica para la agricultura de temporal en México*. No. 19. México D. F. 2013. 40 p.

PARK, D. W., *et al.* *Catalytic degradation of polyethylene over solid acid catalysts*. En: Polymer degradation and stability. Agosto, 1999. Vol. 65, no. 2. p. 193-198.

PÉREZ RODRÍGUEZ, Ángel, *et al.* *Synthesis, characterization and properties of the 5,m nylons*. En: Revista cubana de química. Septiembre, 2014. Vol. 26, no. 3.

POZO RODRÍGUEZ, Manuel; GONZÁLEZ YÉLAMOS, Javier y GINER ROBLES, Jorge. *Geología práctica. Introducción al reconocimiento de materiales y análisis de mapas*. [s.l.]. Pearson education. 2007. 304 p.

RAGAERT, Kim; DELVA, Laurens y VAN GEEM, Kevin. *Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste*. En: Waste management. Julio, 2017. 35 p.

RAJASEKARAN, Divya y MAJI, Pradip K. *Recycling of plastic wastes with poly(ethylene-co-methacrylic acid) copolymer as compatibilizer and their conversion into high-end product*. En: Waste management. Abril, 2018. Vol. 74. p. 135-143.

REDACCIÓN EL TIEMPO. Tarifa de aseo por aforo, para locales. En: El tiempo. Bogotá D.C. 9, marzo, 2005.

SALEEM, Junaid; ADIL RIAZ, Muhammad y MCKAY, Gordon. *Oil sorbents from plastic wastes and polymers: A review*. En: Journal of hazardous materials. Enero, 2018. Vol. 341. p. 424-437.

SIERRA, Noralba, *et al.* Protocolo para el control de calidad de envases de plástico, utilizados en la industria farmacéutica, de cosméticos y de alimentos. En: Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas. Octubre, 2010. Vol. 39, no. 2. p. 149-167.

SINGH, Narinder, *et al.* *Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications*. En: Composites part B. Septiembre, 2016. Vol. 115. p. 409-422.

SINGH, R. K. y RUJ, B. *Time and temperature depended fuel gas generation from pyrolysis of real world municipal plastic waste*. En: Fuel. Junio, 2016. Vol. 174. p. 164-171.

SOBKO, A. A. *Generalized Van der Waals-Berthelot equation of state*. En: Doklady Physics. Agosto, 2008. Vol. 53, no. 8. p. 416-419.

TANG, Yi Jing, *et al.* *Co-pyrolysis characteristics and kinetic analysis of organic food waste and plastic*. En: Bioresource Technology. Febrero, 2018. Vol. 249. p. 16-23.

TORMOS, B. Diagnóstico de motores diésel mediante el análisis del aceite usado. Barcelona. Reverté. 2005. 388 p.

VÁSQUEZ MORILLAS, Alethia, *et al.* Generación, legislación y valorización de residuos plásticos en Iberoamérica. En: Revista internacional de contaminación ambiental. Diciembre, 2016. Vol. 32. p. 63-76.

VIZCAINO RAMÓN, Blanca Estela. Identificación y caracterización de la zeolita natural tipo clinoptilolita. Trabajo de grado especialista en ciencias de metrología de la radiación. [s.l.]. Universidad Autónoma de Nuevo León. 1998. 83 p.

WARING, R. H.; HARRIS, R. M. y MITCHELL, S. C. *Plastic contamination of the food chain. A threat to human health*. En: Maturitas. Junio, 2018. Vol. 115. p. 64-68.

WAUQUIER, J. P. El refino del petróleo. Petróleo crudo, productos petrolíferos, esquemas de fabricación. [s.l.]. Díaz de Santos. 2004. 462 p.

WIRIYAUMPAIWONG, Songchai y JAMRADLOEDLUK, Jindaporn. *Distillation of pyrolytic oil obtained from fast pyrolysis of plastic wastes*. En: Energy procedia. Octubre, 2017. Vol. 138. p. 111-115.

WOJCIECH BUJAK, Janusz. *New insights into waste management – Meat industry*. En: Renewable energy. Noviembre, 2015. Vol. 83. p. 1174-1186.

ANEXOS

ANEXO A

CARACTERIZACIÓN DE PLÁSTICOS

1. Aspecto Físico

Tabla 22. Propiedades y usos de los plásticos más comunes

Símbolo	Propiedades	Usos Comunes
 PET	Contacto alimentario, resistencia física, propiedades térmicas, propiedades barreras, ligereza y resistencia química.	Bebidas, refrescos y agua, envases para alimentos (aderezos, mermeladas, jaleas, cremas, farmacéuticos, etc.)
 HDPE	Poco flexible, resistente a químicos, opaco, fácil de pigmentar, fabricar y manejar. Se suaviza a los 75°C	Algunas bolsas para supermercado, bolsas para congelar, envases para leche, helados, jugos, shampoo, químicos y detergentes, cubetas, tapas, etc.
 PVC	Es duro, resistente, puede ser claro, puede ser utilizado con solventes, se suaviza a los 80°C. Flexible, claro, elástico, puede ser utilizado con solventes.	Envases para plomería, tuberías, "blister packs", envases en general, mangueras, suelas para zapatos, cables, correas para reloj.
 LDPE	Suave, flexible, translucido, se suaviza a los 70°C, se raya fácilmente.	Película para empaque, bolsas para basura, envases para laboratorio.
 PP	Difícil pero aún flexible, se suaviza a los 140°C, translucido, soporta solventes, versátil.	Bolsas para frituras, popotes, equipo para jardinería, cajas para alimentos, cintas para empaçar, envases para uso veterinario y farmacéutico.
 PS	Claro, rígido, opaco, se rompe con facilidad, se suaviza a los 95°C. Afectado por grasas y solventes.	Cajas para discos compactos, cubiertos de plástico, imitaciones de cristal, juguetes, envases cosméticos.
 PS-E	Esponjoso, ligero, absorbe energía, mantiene temperaturas	Tazas para bebida calientes, charolas de comida para llevar, envases de hielo seco, empaques para proteger mercancía frágil
 OTHER	Incluye de muchas otras resinas y materiales. Sus propiedades dependen de la combinación de los plásticos.	Auto partes, hieleras, electrónicos, piezas para empaques.

Fuente: UNIVERSIDAD ROVIRA I VIRGILI, TARAGONA. Los plásticos en nuestra sociedad. Aprendizaje de los productos químicos, sus usos y aplicaciones. p. 9 – 32.

Tabla 23. Características físicas de los polímeros más comunes

Tipo de Plástico	Características físicas
PET	Es claro, lavable y no absorbe humedad. Se usa para fabricar botellas y envases.
HDPE	Es opaco y ceroso. Se usa para bolsas industriales y envases de agentes químicos o de limpieza.
PVC	Excelente transparencia. Se usa en tuberías, aislamiento de cables, botellas, bolsas de sangre, entre otros.
LDPE	Es relativamente transparente y ceroso. Se usa en bolsas y películas flexibles.
PP	Parcialmente cristalino. Resistente al calor. Se utiliza en empaques de alimentos y equipos de laboratorio.
PS	Es duro y quebradizo cuando está rígido. Se usa en empaques, contenedores, botellas, entre otros.

Fuente: RUBIN, Irvin. Materiales plásticos. Propiedades y aplicaciones. Ed. Limusa.¹¹⁰

Figura 25. Muestras de residuos plásticos recogidos



(1)



(2)



(3)



(4)

¹¹⁰ Ibid, R. Miandad, M.A.Barakat, Asad S.Aburiazaiza, M.Rehan, I.M.I.Ismail, A.S.Nizami. P 239 – 252.

Figura 25. (Continuación)



(5)

Fuente: Elaboración propia.

2. Efectos del Calor

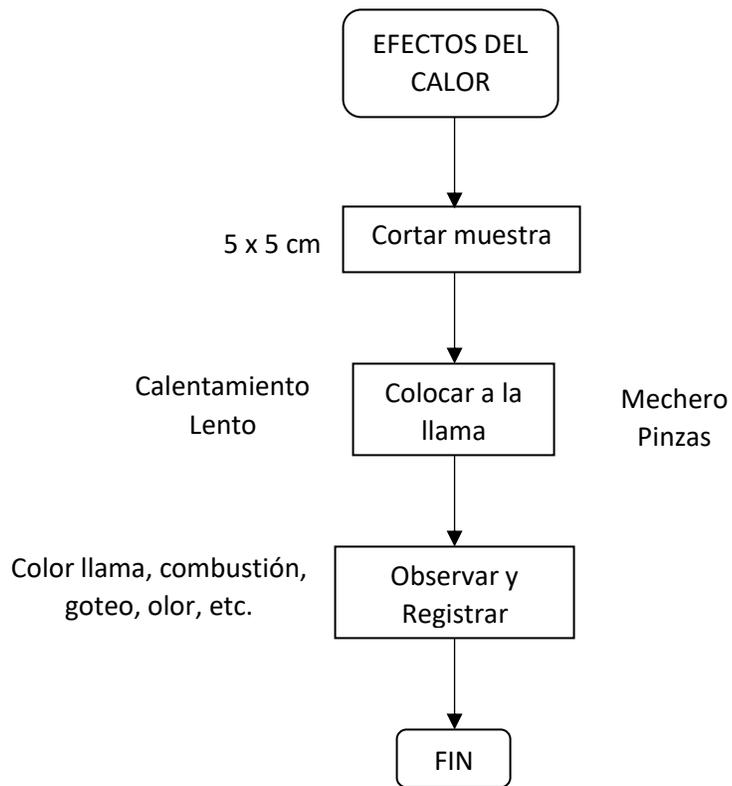
Tabla 24. Efectos del calor en los plásticos más comunes.

Tipo de Plástico	Características al quemarse
PET	Se quema con rapidez. Olor a parafina. Llama amarilla con humo negro. Una vez se extingue la llama se produce un humo blanco.
HDPE	Se consume con una llama azul transparente. Gotea al fundirse. Olor a parafina. No se auto-extingue.
PVC	Puede encenderse, pero se extingue por sí solo una vez se aleja la fuente de ignición. Olor agrio al quemar. Llama color verde claro.
LDPE	Se consume con una llama azul transparente. Gotea al fundirse. Olor a parafina. No se auto-extingue.
PP	Se consume lentamente. Sus gases alimentan la llama. Llama azul transparente. Olor a geranio.
PS	Desprende un humo negro. Se quema rápidamente. Tiene un olor fuerte a gas. Produce grandes cantidades de hollín.

Fuente: POSADA BUSTAMANTE, Beatriz. La degradación de los plásticos. Revista universidad Eafit. p. 67 – 86¹¹¹.

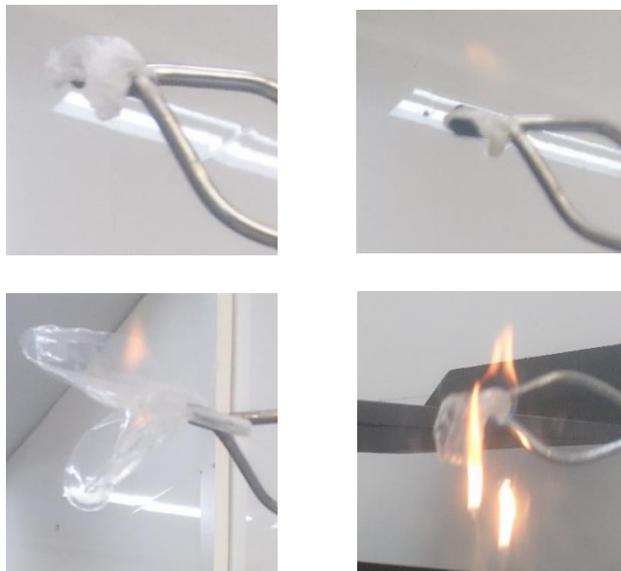
¹¹¹ Ibid, R. Miandad, M.A.Barakat, Asad S.Aburiazaiza, M.Rehan, I.M.I.Ismail, A.S.Nizami. P 239 – 252.

Diagrama 3. Proceso para determinar efectos del calor en plásticos



Fuente: Elaboración propia.

Figura 26. Efectos del calor en las muestras de plástico



Fuente: Elaboración propia.

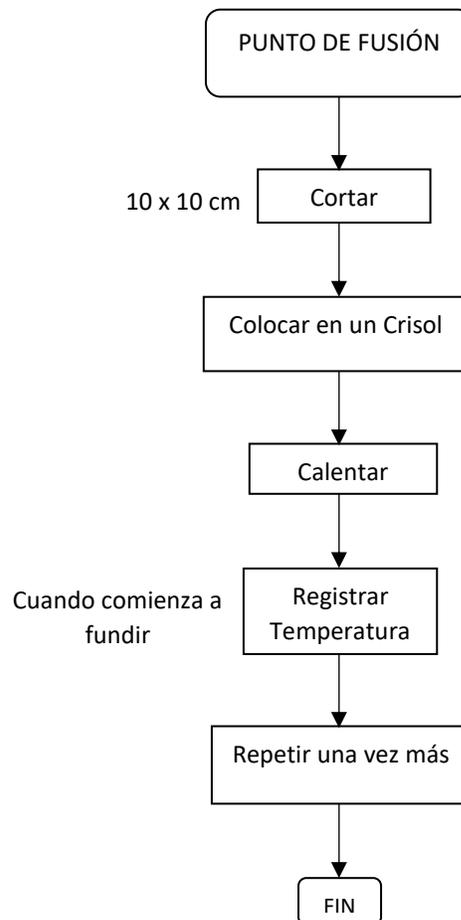
3. Punto de Fusión Real

Tabla 25. Punto de fusión de los plásticos más comunes

<u>Tipo de plástico</u>	<u>Punto de fusión (°C)</u>
PET	250 – 260
HDPE	130 – 137
PVC	≈ 212
LDPE	115 – 120
PP	163 – 175
PS	105

Fuente: COREÑO ALONSO, Juan y MÉNDEZ BAUTISTA, María Teresa. Relación estructura – propiedades de los polímeros. Universidad autónoma del estado de Hidalgo.

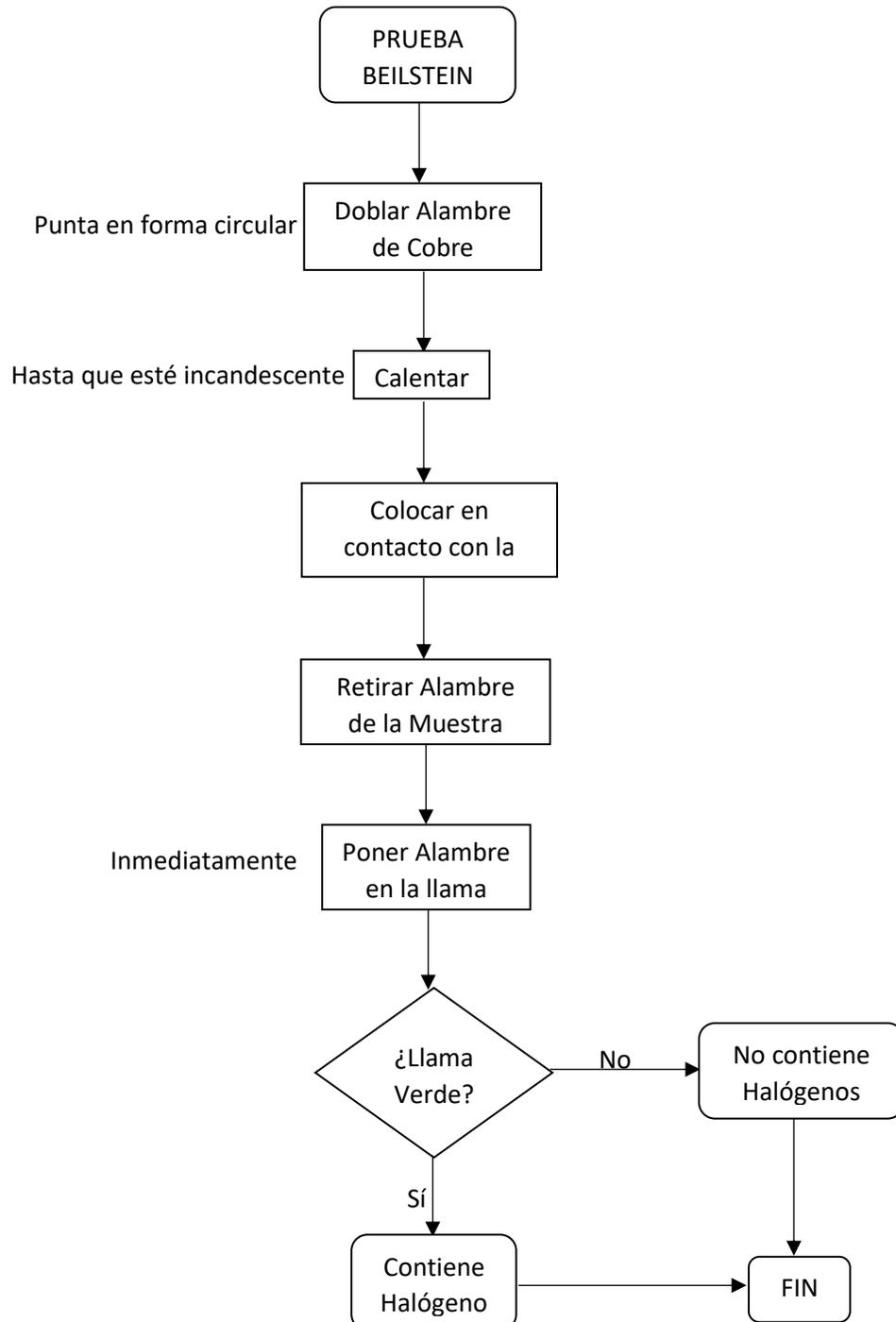
Diagrama 4. Proceso para hallar punto de fusión en las muestras de plástico



Fuente: Elaboración propia.

4. Prueba Beilstein

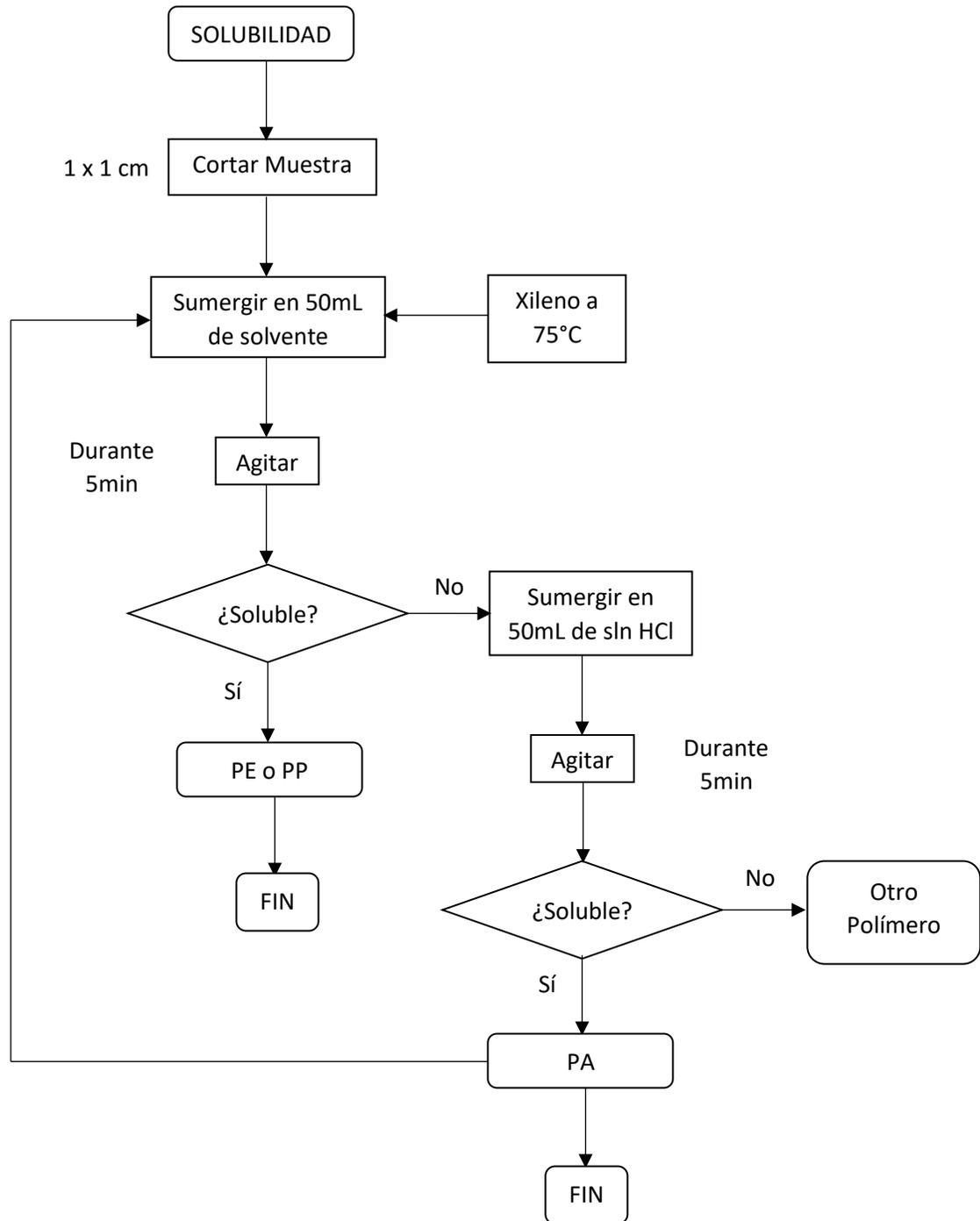
Diagrama 5. Proceso para desarrollar la prueba beilstein



Fuente: Elaboración propia.

5. Solubilidad

Diagrama 6. Proceso para analizar la solubilidad de las muestras de plástico



Fuente: Elaboración propia.

ANEXO B

PIRÓLISIS DE RESIDUOS PLÁSTICOS

Diagrama 7. Proceso de pirólisis

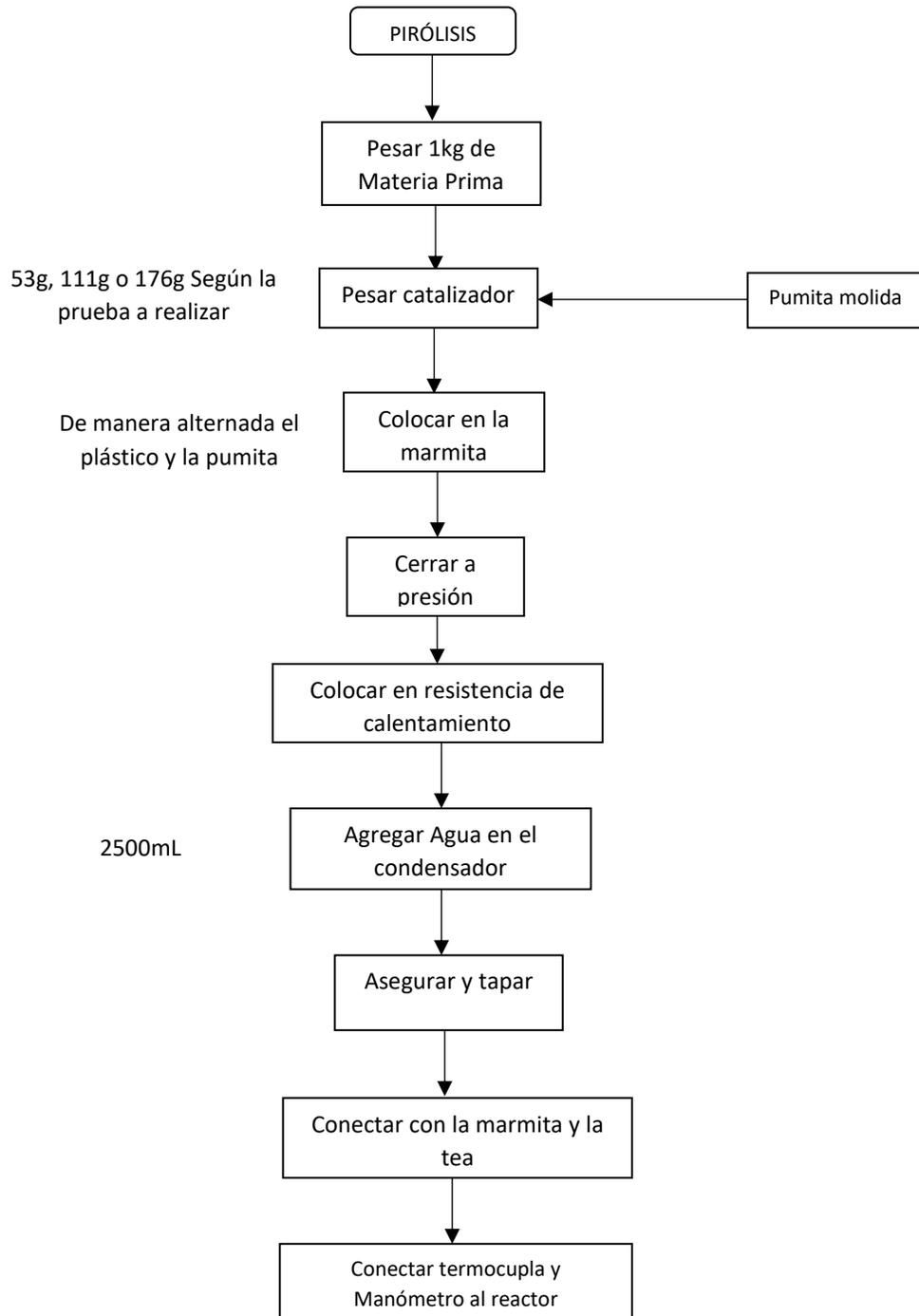


Diagrama 7. (Continuación)

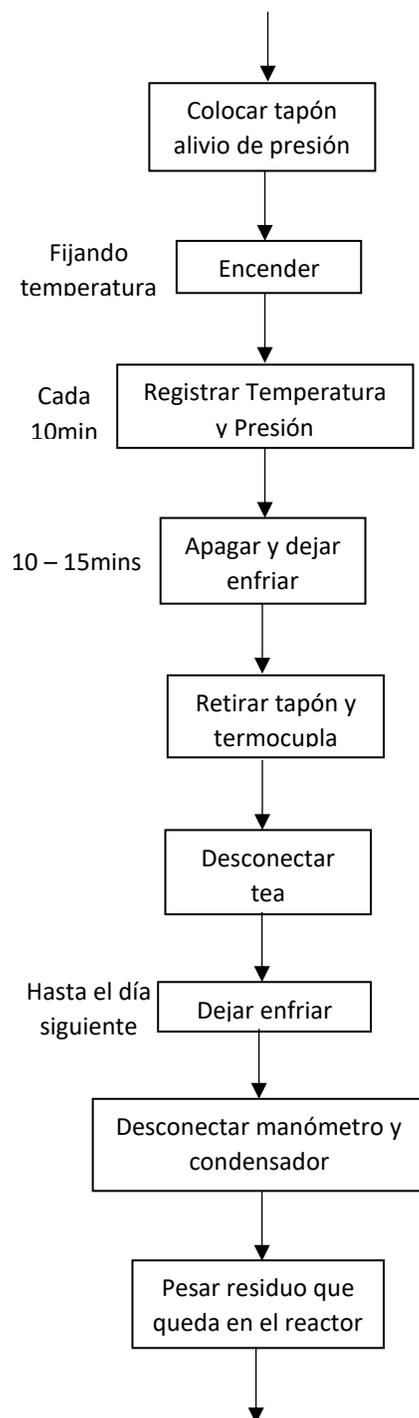
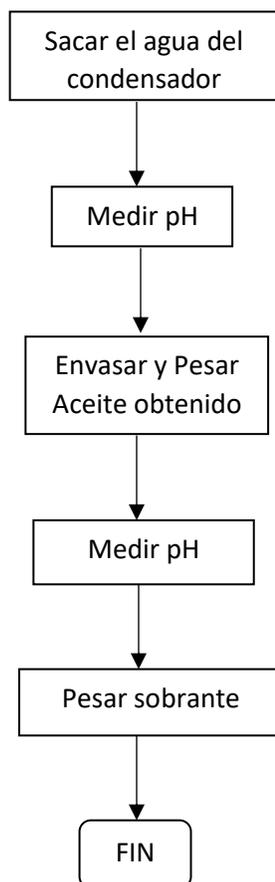


Diagrama 7. (Continuación)



Fuente: Elaboración propia.

1. Tablas de datos experimentales

- a. Concentración de catalizador: 5%p/p
Temperatura: 600°C

Tabla 26. Datos experimentales de pirólisis con 600°C y 5%p/p

Tiempo (min)	Temperatura (TC4Y)	Temperatura (PX7)	Presión (cmH ₂ O)
0	28	31	16
10	30	32	125
20	30	32	274
30	30	32	394
40	30	32	480

Tabla 26. (Continuación)

Tiempo (min)	Temperatura (TC4Y)		Temperatura (PX7)		Presión (cmH₂O)	
50	30	34	532	530	12	16
60	31	37	566	568	12	16
70	53	55	589	590	13	16
80	81	86	602	601	16.5	17
90	108	111	602	602	16.5	17
100	226	228	602	601	16.5	17
110	247	248	598	598	16.5	17
120	251	250	602	600	16.5	17
130	251	251	602	602	16.5	17
140	250	251	600	600	18	17
150	250	252	601	601	18	17
160	252	254	600	600	18	17
170	258	257	599	599	18	17
180	282	277	601	600	18.5	17
190	301	298	600	601	19.5	17
200	312	309	600	600	20	18.5
210	320	322	601	601	20	19
220	324	325	599	599	20	19
230	326	327	600	600	20	19
240	328	330	600	599	21	19
250	331	332	600	601	21	19
260	332	333	600	600	21	19
270	333	334	600	601	20	20
280	334	335	600	600	22	20

Fuente: Elaboración propia.

b. Concentración de catalizador: 10%p/p
 Temperatura: 600°C

Tabla 27. Datos experimentales de pirólisis con 600°C y 10%p/p

Tiempo (min)	Temperatura (TC4Y)		Temperatura (PX7)		Presión (cmH₂O)	
0	32	30	17	18	0	0
10	31	31	127	129	10	4
20	31	31	278	280	17	10
30	30	32	398	397	17	12
40	32	33	480	478	17	12
50	34	34	545	550	17	15
60	37	38	588	590	17	16
70	50	52	607	603	17	16
80	77	73	601	601	17	17
90	92	89	599	598	17	17
100	109	113	601	601	17	17
110	145	153	601	602	17	17
120	204	210	600	600	17	17
130	227	229	601	601	17	17
140	249	248	598	599	17	17
150	248	250	598	598	17	17
160	254	252	602	601	17	17
170	255	255	599	599	17	17
180	257	258	601	602	17	18
190	266	265	600	600	17	19
200	278	280	600	601	18	19
210	291	293	599	599	18.5	19
220	300	301	601	600	19	19
230	303	303	600	600	19	19
240	307	306	599	600	19	20
250	310	311	601	601	19	20
260	313	313	600	600	20	20
270	315	316	600	600	20.5	20
280	317	318	599	599	21	20

Fuente: Elaboración propia.

c. Concentración de catalizador: 15%p/p
 Temperatura: 600°C

Tabla 28. Datos experimentales de pirólisis con 600°C y 15%p/p

Tiempo (min)	Temperatura (TC4Y)		Temperatura (PX7)		Presión (cmH₂O)	
0	27	30	17	19	0	0
10	28	31	117	114	1	1
20	29	31	255	247	1.5	2
30	30	31	365	362	14	11
40	31	32	455	449	14.5	11
50	31	32	521	518	14.5	11
60	34	36	567	563	16	11
70	40	42	605	584	16	15
80	52	56	604	597	16	16
90	74	77	599	601	16	16
100	90	94	602	602	16	16
110	110	130	601	601	16	16
120	170	167	600	600	16	16
130	201	195	600	602	16	16
140	230	224	601	601	16	16
150	242	234	600	600	16	16
160	248	244	599	599	16	16
170	248	248	601	602	16	16
180	249	249	600	600	16	17
190	255	250	600	601	16	17
200	260	256	600	600	16	17
210	268	263	601	600	16	17
220	276	271	601	601	16	17
230	285	279	600	599	16	17
240	287	284	600	600	16	17
250	291	288	600	600	16	17
260	291	290	600	599	16	17
270	292	292	600	600	16	17
280	293	294	599	600	16	17

Fuente: Elaboración propia.

d. Concentración de catalizador: 5%p/p
 Temperatura: 650°C

Tabla 29. Datos experimentales de pirólisis con 650°C y 5%p/p

Tiempo (min)	Temperatura (TC4Y)		Temperatura (PX7)		Presión (cmH₂O)	
0	28	28	16	17	0	0
10	31	30	122	119	10	10
20	34	31	272	268	10	10
30	36	34	395	391	10	10
40	41	36	480	473	10	10
50	42	42	532	528	10	10
60	44	47	563	557	10	10
70	56	59	588	586	10	10
80	75	78	606	603	10	10
90	93	97	622	625	10	10
100	173	169	630	632	10	10
110	227	220	633	637	10	10
120	246	243	635	642	10	10
130	254	250	640	645	10	10
140	263	255	640	645	11	10
150	277	278	642	649	11	10
160	300	295	645	650	12	10
170	323	317	650	650	20	10
180	334	330	649	651	20	11
190	343	336	651	652	21	15
200	349	342	651	651	22	17
210	352	349	651	649	22	17
220	356	352	651	650	22	17
230	353	353	651	651	22	18
240	349	349	654	650	21	19
250	342	342	650	650	21	19
260	332	332	650	650	21	20
270	322	321	650	650	21	20
280	306	310	649	650	22	20

Fuente: Elaboración propia.

e. Concentración de catalizador: 10%p/p
 Temperatura: 650°C

Tabla 30. Datos experimentales de pirólisis con 650°C y 10%p/p

Tiempo (min)	Temperatura (TC4Y)		Temperatura (PX7)		Presión (cmH₂O)	
0	38	32	20	18	0	0
10	40	33	126	120	10	10
20	42	33	272	265	10	10
30	44	39	394	387	10	10
40	45	44	481	476	10	10
50	45	47	549	544	10	10
60	43	52	588	582	10	10
70	52	76	625	621	10	10
80	76	98	646	642	10	10
90	106	149	654	647	10	10
100	172	184	650	649	10	11
110	221	230	650	652	10	11
120	230	237	651	650	10	11
130	240	245	651	650	10	11
140	246	249	652	649	10	11
150	249	250	653	651	10	11
160	253	253	649	650	11	17
170	261	264	650	650	11	17
180	276	274	653	649	11	17
190	285	288	649	649	12.5	17
200	303	298	650	650	13.5	17
210	312	310	649	649	15	17
220	319	322	650	650	17.5	17
230	323	326	652	650	16.5	17
240	325	330	649	650	16	17
250	330	331	651	650	16	17
260	332	332	649	650	16	17
270	335	336	650	650	16	17
280	335	337	648	649	16	17

Fuente: Elaboración propia.

f. Concentración de catalizador: 15%p/p
 Temperatura: 650°C

Tabla 31. Datos experimentales de pirólisis con 650°C y 15%p/p

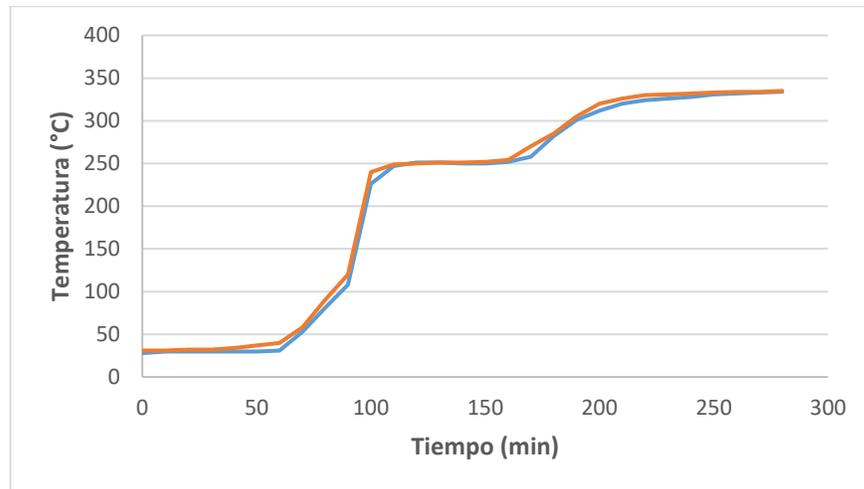
Tiempo (min)	Temperatura		Temperatura		Presión	
	(TC4Y)		(PX7)		(cmH₂O)	
0	29	30	119	19	2	0
10	29	31	209	120	4	10
20	29	31	327	245	8	10
30	30	31	422	367	10	10
40	32	34	496	487	10	10
50	33	36	556	556	10	10
60	34	42	591	592	10	10
70	40	72	619	618	10	10
80	71	104	644	645	10	10
90	107	125	657	649	10	10
100	128	167	650	650	10	10
110	174	188	651	652	10	10
120	192	215	651	651	10	10
130	223	236	653	650	10	10
140	241	248	650	650	10	10
150	262	258	649	650	10	11
160	273	271	652	651	10	11
170	281	283	647	649	10	11
180	292	289	651	649	10	11
190	298	297	651	650	10	11
200	301	302	650	650	11	13
210	304	305	650	650	11	13
220	307	310	651	650	11	13
230	311	312	651	650	14	13
240	315	316	649	650	13.5	15
250	316	317	650	650	14	15
260	319	320	649	649	14	15
270	322	323	649	651	13	15
280	324	325	647	650	13	15

Fuente: Elaboración propia.

2. Temperatura de vapores pirolíticos en el tiempo

- a. Concentración de catalizador: 5%p/p
Temperatura: 600°C

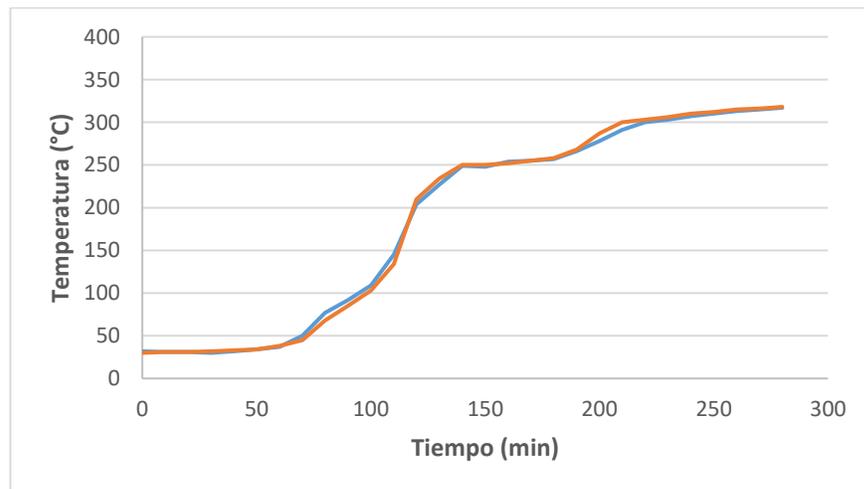
Gráfica 10. Temperatura de vapores pirolíticos con 600°C y 5%p/p



Fuente: Elaboración propia.

- b. Concentración de catalizador: 10%p/p
Temperatura: 600°C

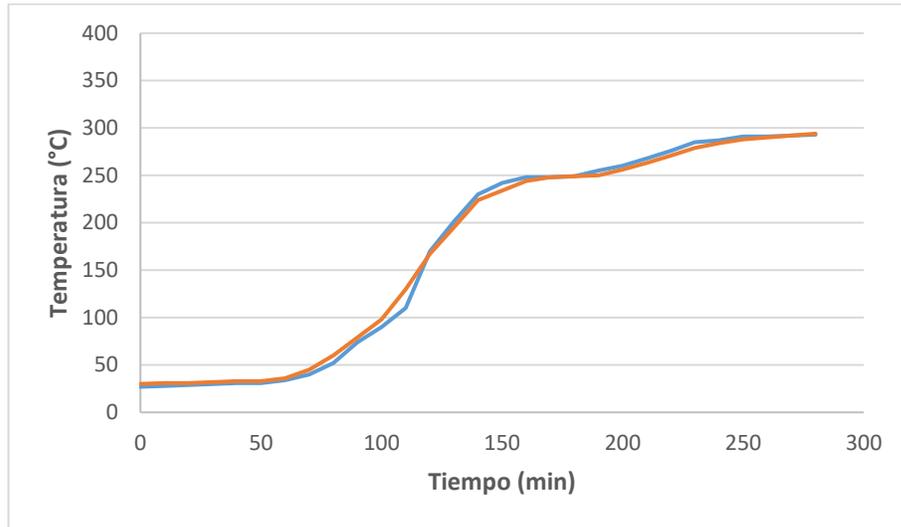
Gráfica 11. Temperatura de vapores pirolíticos con 600°C y 10%p/p



Fuente: Elaboración propia.

- c. Concentración de catalizador: 15%p/p
Temperatura: 600°C

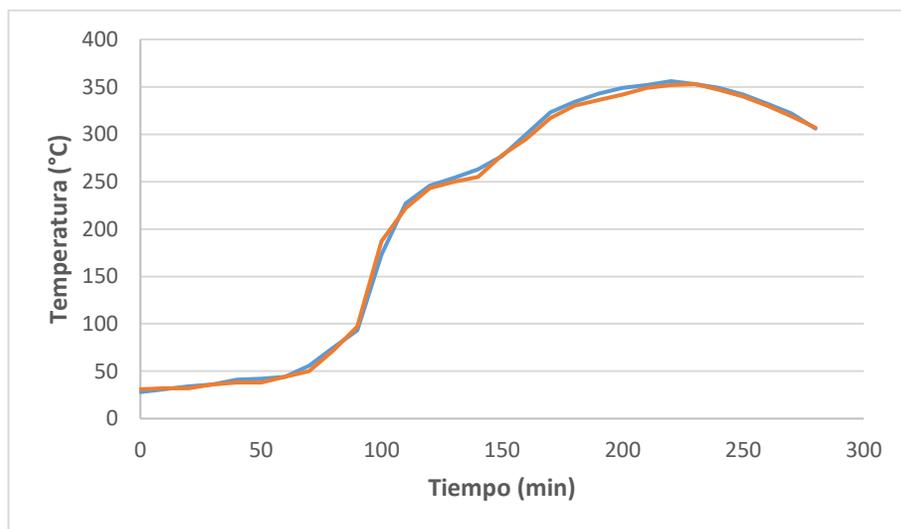
Gráfica 12. Temperatura de vapores pirolíticos con 600°C y 15%p/p



Fuente: Elaboración propia.

- d. Concentración de catalizador: 5%p/p
Temperatura: 650°C

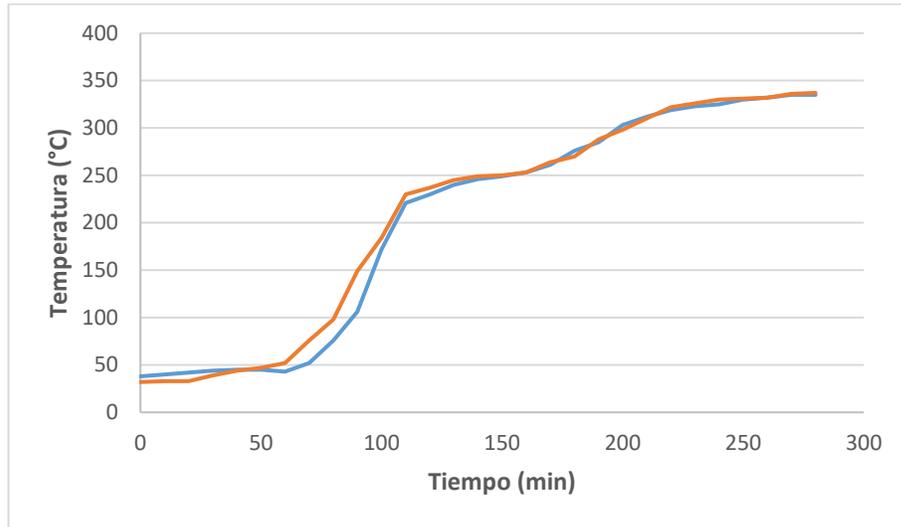
Gráfica 13. Temperatura de vapores pirolíticos con 650°C y 5%p/p



Fuente: Elaboración propia.

e. Concentración de catalizador: 10%p/p
Temperatura: 650°C

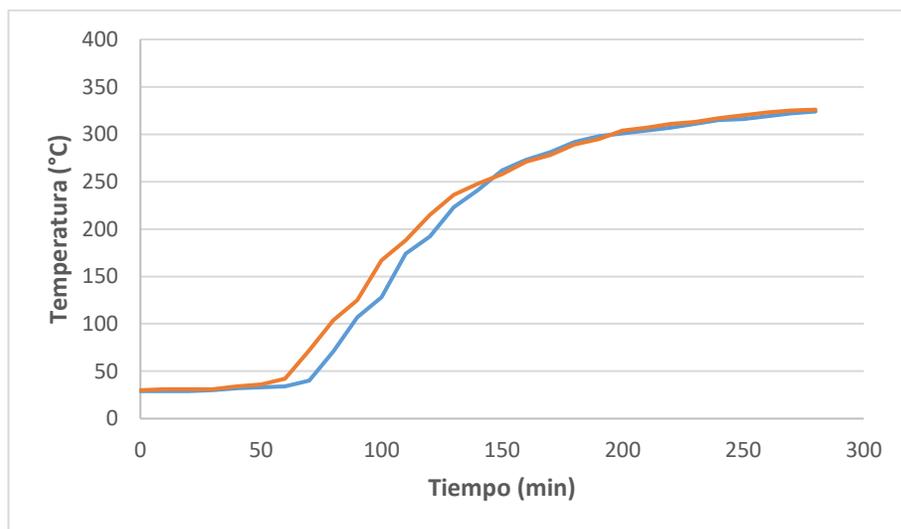
Gráfica 14. Temperatura de vapores pirolíticos con 650°C y 10%p/p



Fuente: Elaboración propia.

f. Concentración de catalizador: 15%p/p
Temperatura: 650°C

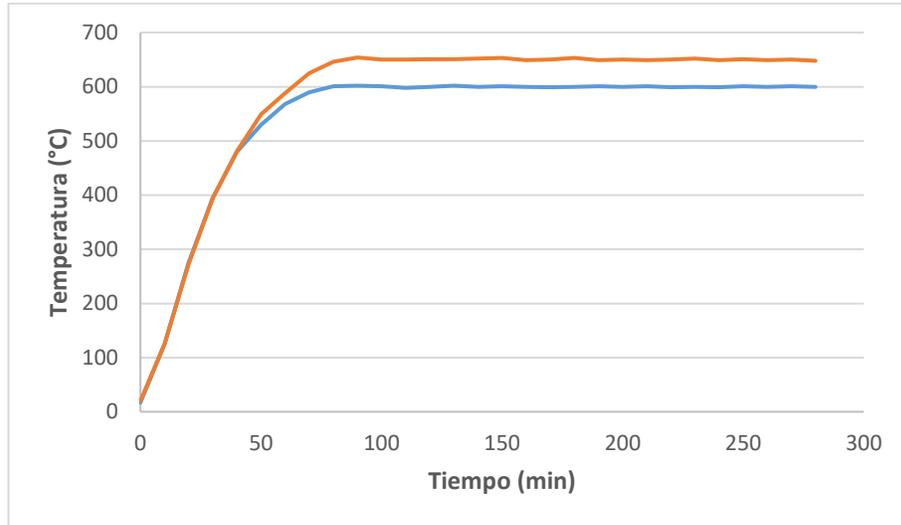
Gráfica 15. Temperatura de vapores pirolíticos con 650°C y 15%p/p



Fuente: Elaboración propia.

3. Temperatura de la resistencia térmica controlada en el tiempo

Gráfica 16. Temperatura de la resistencia controlada en las pirólisis



Fuente: Elaboración propia.

4. Resultados obtenidos

Figura 27. Aceite pirolítico con 5%p/p de catalizador



Fuente: Elaboración propia.

Figura 28. Aceite pirolítico con 10%p/p de catalizador



Fuente: Elaboración propia.

Figura 29. Aceite pirolítico con 15%p/p de catalizador



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 32. pH del agua y el aceite en todas las pirólisis

<u>Sustancia</u>	<u>pH</u>
Agua	9
Aceite	7

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 33. Resultados del peso de aceite pirolítico

Peso aceite pirolítico (g)		Concentración de catalizador (% p/p)		
		5	10	15
Temperatura (°C)	600	560	548	525
		558	544	528
	650	743	660	646
		741	664	644

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 34. Resultados del peso de carbonilla

Peso carbonilla (g)		Concentración de catalizador (% p/p)		
		5	10	15
Temperatura (°C)	600	97	274	351
		99	277	347
	650	2	73	149
		4	70	152

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 35. Resultados del rendimiento de carbonilla

Rendimiento de carbonilla (%)		Concentración de catalizador (% p/p)		
		5	10	15
Temperatura (°C)	600	9.7	27.4	35.1
		9.9	27.7	34.7
	650	0.2	7.3	14.9
		0.4	7.0	15.2

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 36. Resultados de la conversión del material en aceite y gases

Conversión del material en aceite y gases (%)		Concentración de catalizador (% p/p)		
		5	10	15
Temperatura (°C)	600	90.3	72.6	64.9
	650	90.1	72.3	65.3
		99.8	92.7	85.1
		99.6	93.0	84.8

Fuente: Elaboración propia.

5. Interacción de factores según su comportamiento gráfico

Figura 30. Interacción de factores nula

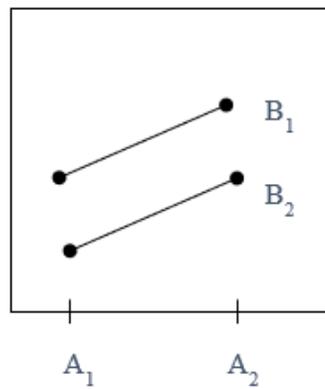


Figura 31. Interacción de factores negativa

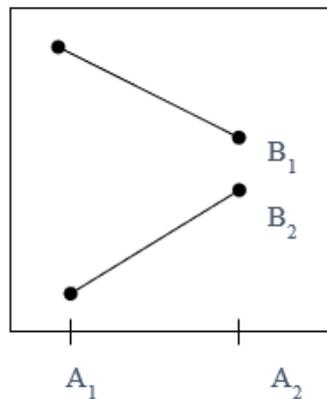


Figura 32. Interacción de factores positiva

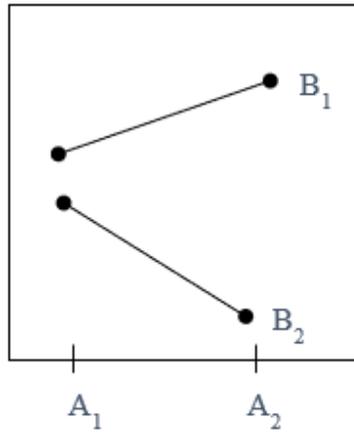
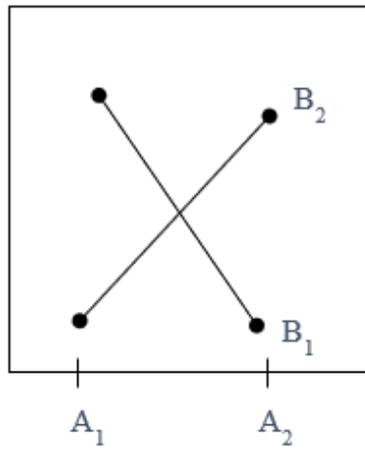


Figura 33. Interacción de factores inversa



ANEXO C

DESTILACIÓN ATMOSFÉRICA DEL ACEITE PIROLÍTICO

Diagrama 8. Proceso de destilación atmosférica según norma ASTM D-86

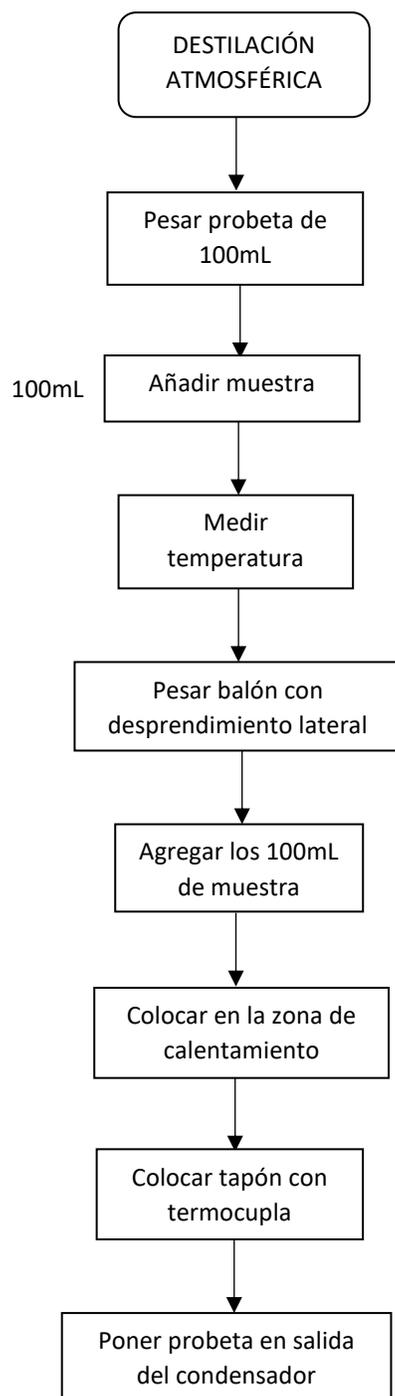
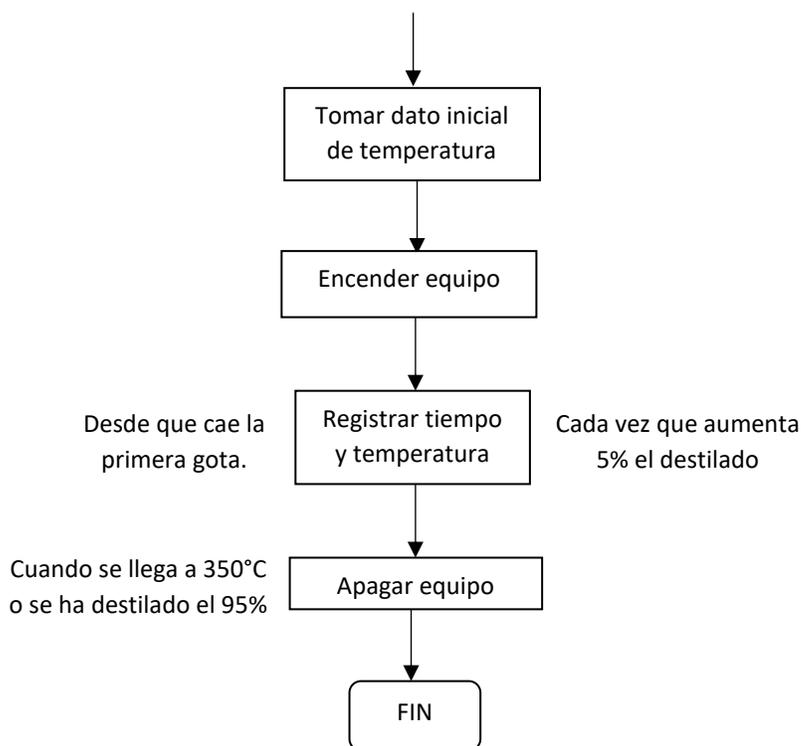


Diagrama 8. (Continuación)



Fuente: Elaboración propia.

1. Correcciones a las curvas de destilación

Ecuación 14. Factor A para corrección AET según norma ASTM D-2892

$$FactorA = \frac{5.99425 - 0.972546 * \log_{10}(P)}{2663.129 - 95.76 * \log_{10}(P)}$$

Donde:

- P = Presión atmosférica en mmHg del lugar donde se realizó la destilación.

Ecuación 15. Temperatura corregida por AET a 760mmHg

$$T(AET) = \frac{748.1 * FactorA}{(T + 273.15)^{-1} + 0.3861 * FactorA - 0.00051606} - 273.15$$

Donde:

- T = Temperatura en °C a corregir.

Ecuación 16. Temperatura media ponderada en volumen AET

$$TMPV = \frac{T(AET)_{10} + 2 * T(AET)_{50} + T(AET)_{70}}{4}$$

Donde:

- $T(AET)_{10}$ = Temperatura en °C corregida por AET a 760mmHg para el 10% del destilado.
- $T(AET)_{50}$ = Temperatura en °C corregida por AET a 760mmHg para el 50% del destilado.
- $T(AET)_{70}$ = Temperatura en °C corregida por AET a 760mmHg para el 70% del destilado.

Ecuación 17. Índice de caracterización Kw

$$Kw = \frac{((TMPV + 273.15) * 1.8)^{1/3}}{\rho_{rel}}$$

Ecuación 18. Corrección AET por Kw según norma ASTM D-2892

$$CorrecciónAET = -1.4 * (Kw - 12) * \frac{\log_{10}(760)}{\log_{10}(P)}$$

Ecuación 19. Temperatura corregida por ASTM D-2892

$$T \text{ corregida} = T(AET) + Corrección AET$$

2. Tablas de datos experimentales y valores corregidos según la norma ASTM D-2892 en las destilaciones atmosféricas ASTM D-86

- a. Concentración de catalizador: 5%p/p
Temperatura: 600°C

Tabla 37. Datos destilación ASTM D-86 para aceite con 600°C y 5%p/p

Volumen (mL)	Temperatura registrada (°C)	Temperatura corregida AET (°C)
0	70.2	79.7
5	84.8	94.7
10	93.8	103.8
15	105.8	116.1
20	121.0	131.6
25	135.4	146.3
30	152.4	163.6
35	167.0	178.5
40	183.0	194.8
45	204.2	216.4
50	227.6	240.2
55	240.4	253.2
60	255.8	268.9
65	267.0	280.2
70	282.0	295.5
75	294.0	307.6
80	303.8	317.6
85	314.8	328.7
90	334.8	349.0
95	340.5	354.8

Fuente: Elaboración propia.

b. Concentración de catalizador: 10%p/p
Temperatura: 600°C

Tabla 38. Datos destilación ASTM D-86 para aceite con 600°C y 10%p/p

Volumen (mL)	Temperatura registrada (°C)	Temperatura corregida AET (°C)
0	54.1	63.2
5	75.6	85.1
10	88.3	98.1
15	100.4	110.5
20	112.7	123.0
25	125.7	136.3
30	139.6	150.5
35	154.7	165.9

Tabla 38. (Continuación)

Volumen (mL)	Temperatura registrada (°C)	Temperatura corregida AET (°C)
40	170.4	181.9
45	187.9	199.7
50	204.7	216.8
55	221.4	233.8
60	237.1	249.8
65	250.1	263.0
70	262.9	275.9
75	276.6	289.8
80	290.7	304.2
85	304.7	318.4
90	319.1	333.0
95	338.3	352.4

Fuente: Elaboración propia.

- c. Concentración de catalizador: 15%p/p
Temperatura: 600°C

Tabla 39. Datos destilación ASTM D-86 para aceite con 600°C y 15%p/p

Volumen (mL)	Temperatura registrada (°C)	Temperatura corregida AET (°C)
0	50	59.0
5	73	82.5
10	89	98.8
15	102	112.0
20	114	124.4
25	124	134.6
30	137	147.8
35	152	163.1
40	163	174.3
45	178	189.6
50	193	204.9
55	209	221.2
60	223	235.4
65	238	250.7
70	254	266.9
75	270	283.2

Tabla 39. (Continuación)

Volumen (mL)	Temperatura registrada (°C)	Temperatura corregida AET (°C)
80	286	299.4
85	299	312.6
90	311	324.8
95	325	338.9
98	339	353.1

Fuente: Elaboración propia.

d. Concentración de catalizador: 5%p/p
Temperatura: 650°C

Tabla 40. Datos destilación ASTM D-86 para aceite con 650°C y 5%p/p

Volumen (mL)	Temperatura registrada (°C)	Temperatura corregida AET (°C)
0	71.4	80.9
5	87.1	96.9
10	99.9	109.9
15	113.8	124.1
20	130.6	141.2
25	148.3	159.4
30	168.2	179.6
35	187.7	199.4
40	218.7	231.0
45	240.7	253.3
50	256.6	269.5
55	272.3	285.5
60	288.1	301.5
65	302.1	315.7
70	314.8	328.6
75	327.6	341.5
80	337.6	351.6
85	346.4	360.6

Fuente: Elaboración propia.

e. Concentración de catalizador: 10%p/p
Temperatura: 650°C

Tabla 41. Datos destilación ASTM D-86 para aceite con 650°C y 10%p/p

Volumen (mL)	Temperatura registrada (°C)	Temperatura corregida AET (°C)
0	67.1	76.5
5	80.4	90.1
10	92.1	102.1
15	104.4	114.6
20	118.7	129.2
25	133.9	144.7
30	149.6	160.7
35	167.4	178.9
40	185.0	196.8
45	204.0	216.1
50	226.6	239.1
55	240.1	252.9
60	253.9	266.8
65	267.6	280.7
70	281.4	294.8
75	294.4	308.0
80	306.3	320.0
85	321.1	335.1
90	336.0	350.1
95	350.2	364.5

Fuente: Elaboración propia.

f. Concentración de catalizador: 15%p/p
Temperatura: 650°C

Tabla 42. Datos destilación ASTM D-86 para aceite con 650°C y 15%p/p

Volumen (mL)	Temperatura registrada (°C)	Temperatura corregida AET (°C)
0	59.1	68.2
5	81.5	91.1
10	92.0	101.8
15	104.0	114.1

Tabla 42. (Continuación)

Volumen (mL)	Temperatura registrada (°C)	Temperatura corregida AET (°C)
20	117.0	127.4
25	129.6	140.3
30	143.6	154.5
35	158.8	170.0
40	173.8	185.2
45	189.8	201.5
50	208.8	220.9
55	225.8	238.2
60	242.0	254.7
65	258.1	271.1
70	271.9	285.0
75	285.0	298.3
80	300.1	313.7
85	314.6	328.4
90	329.4	343.3
94	345.1	359.3

Fuente: Elaboración propia.

3. Resultados de la separación de diésel y keroseno

Figura 34. Diésel y keroseno separados por destilación atmosférica



Fuente: Elaboración propia.

4. Peso total de los hidrocarburos presentes en los aceites pirolíticos

Tabla 43. Resultados del peso de hidrocarburos en el aceite pirolítico

Peso hidrocarburos en el aceite (g)		Catalizador (%p/p)			
		5	10	15	
Temperatura (°C)	600	Keroseno	217	240	255
		Diésel	248	257	262
		Pesados	45	16	6
		Parafina	7	3	0
	650	Keroseno	257	256	268
		Diésel	305	303	309
		Pesados	122	31	22
		Parafina	12	9	0

Fuente: Elaboración propia.

5. Grados API

Tabla 44. Clasificación de crudos según gravedad API

Tipo de Crudo	Gravedad API
Extrapesado	< 10
Pesado	10 – 22.3
Mediano	22.4 – 31.1
Ligero	31.2 – 41.9
Condensado	> 42

Fuente: ROLDÁN VILORIA, José. Energías renovables: Lo que hay que saber. Ediciones parainfo S.A. (2013).

ANEXO D
CARACTERIZACIÓN DEL DIÉSEL

1. Curvas de destilación

- a. Concentración de catalizador: 5%p/p
Temperatura: 600°C

Tabla 45. Datos destilación ASTM D-86 para diésel con 600°C y 5%p/p

Volumen (mL)	Temperatura registrada (°C)	Temperatura corregida AET (°C)
0	14	157.1
5	194	206.0
10	206	218.2
15	215	227.3
20	222	234.4
25	231	243.6
30	238	250.7
35	244	256.8
40	251	263.9
45	260	273.1
50	265	278.1
55	276	289.3
60	280	293.4
65	284	297.4
70	293	306.6
75	300	313.7
80	305	318.7
85	314	327.8
90	326	340.0
90	327	341.0

Fuente: Elaboración propia.

- b. Concentración de catalizador: 10%p/p
Temperatura: 600°C

Tabla 46. Datos destilación ASTM D-86 para diésel con 600°C y 10%p/p

Volumen (mL)	Temperatura registrada (°C)	Temperatura corregida AET (°C)
0	142	153.2
5	185	197.0
10	199	211.3
15	210	222.5
20	219	231.6
25	227	239.7
30	235	247.9
35	242	255.0
40	249	262.1
45	255	268.2
50	262	275.3
55	266	279.4
60	273	286.5
65	280	293.6
70	286	299.7
75	293	306.8
80	299	312.9
85	306	319.9
90	316	330.1
92	322	336.2

Fuente: Elaboración propia.

c. Concentración de catalizador: 15%p/p
Temperatura: 600°C

Tabla 47. Datos destilación ASTM D-86 para diésel con 600°C y 15%p/p

Volumen (mL)	Temperatura registrada (°C)	Temperatura corregida AET (°C)
0	139	150.2
5	180	192.0
10	192	204.2
15	203	215.4
20	211	223.6
25	219	231.7
30	228	240.9

Tabla 47. (Continuación)

Volumen (mL)	Temperatura registrada (°C)	Temperatura corregida AET (°C)
35	234	247.0
40	241	254.1
45	247	260.2
50	255	268.3
55	261	274.4
60	268	281.5
65	276	289.6
70	280	293.7
75	289	302.8
80	296	309.9
85	303	317.0
90	312	326.1
95	319	333.2

Fuente: Elaboración propia.

d. Concentración de catalizador: 5%p/p
Temperatura: 650°C

Tabla 48. Datos destilación ASTM D-86 para diésel con 650°C y 5%p/p

Volumen (mL)	Temperatura registrada (°C)	Temperatura corregida AET (°C)
0	143	154.1
5	186	197.9
10	204	216.3
15	218	230.5
20	228	240.7
25	238	250.8
30	245	257.9
35	252	265.0
40	259	272.2
45	265	278.3
50	272	285.4
55	277	290.4
60	285	298.5
65	291	304.6

Tabla 48. (Continuación)

Volumen (mL)	Temperatura registrada (°C)	Temperatura corregida AET (°C)
70	297	310.7
75	304	317.8
80	309	322.9
85	316	330.0
86	334	348.2

Fuente: Elaboración propia.

e. Concentración de catalizador: 10%p/p
Temperatura: 650°C

Tabla 49. Datos destilación ASTM D-86 para diésel con 650°C y 10%p/p

Volumen (mL)	Temperatura registrada (°C)	Temperatura corregida AET (°C)
0	165	176.5
5	196	208.1
10	210	222.4
15	220	232.5
20	228	240.7
25	236	248.8
30	243	255.9
35	249	262.0
40	257	270.1
45	263	276.2
50	269	282.3
55	276	289.4
60	283	296.5
65	289	302.6
70	296	309.7
75	303	316.8
80	311	324.9
85	320	334.0
90	331	345.2
94	350	364.4

Fuente: Elaboración propia.

f. Concentración de catalizador: 15%p/p
Temperatura: 650°C

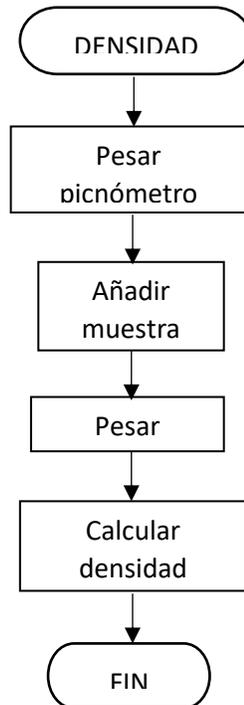
Tabla 50. Datos destilación ASTM D-86 para diésel con 650°C y 15%p/p

Volumen (mL)	Temperatura registrada (°C)	Temperatura corregida AET (°C)
0	138	149.1
5	179	190.9
10	194	206.2
15	205	217.4
20	216	228.6
25	222	234.7
30	230	242.8
35	237	249.9
40	245	258.1
45	252	265.2
50	261	274.3
55	268	281.4
60	274	287.5
65	281	294.6
70	287	300.7
75	293	306.8
80	301	314.9
85	308	322.0
90	316	330.1
92	316	330.1

Fuente: Elaboración propia.

2. Densidad relativa

Diagrama 9. Proceso para calcular la densidad relativa del diésel



Fuente: Elaboración propia.

Figura 35. Picnómetro con diésel



Fuente: Elaboración propia.

- Peso picnómetro de 25 mL = 17,41 g

Tabla 51. Peso del picnómetro con diésel para hallar densidad

Peso picnómetro con diésel (g)		Concentración de catalizador (% p/p)		
		5	10	15
Temperatura (°C)	600	37.78	37.61	37.60
	650	37.77	37.73	37.62

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 52. Densidad del diésel

Densidad diésel (g/mL)		Concentración de catalizador (% p/p)		
		5	10	15
Temperatura (°C)	600	0.815	0.808	0.808
	650	0.814	0.813	0.808

Fuente: Elaboración propia.

3. Viscosidad

- Tiempo agua = 43.57 segundos
- Densidad agua = 1 g/cm³
- Viscosidad agua (24°C) = 0.911 cP

Tabla 53. Tiempo que demoran 25mL de diésel en salir por aguja de 18G

Tiempo (segundos)		Concentración de catalizador (% p/p)		
		5	10	15
Temperatura (°C)	600	104.5	105.5	106.0
	650	115.5	108.5	102.5

Fuente: Elaboración propia.

Ecuación 20. Conversión de viscosidad dinámica a cinemática

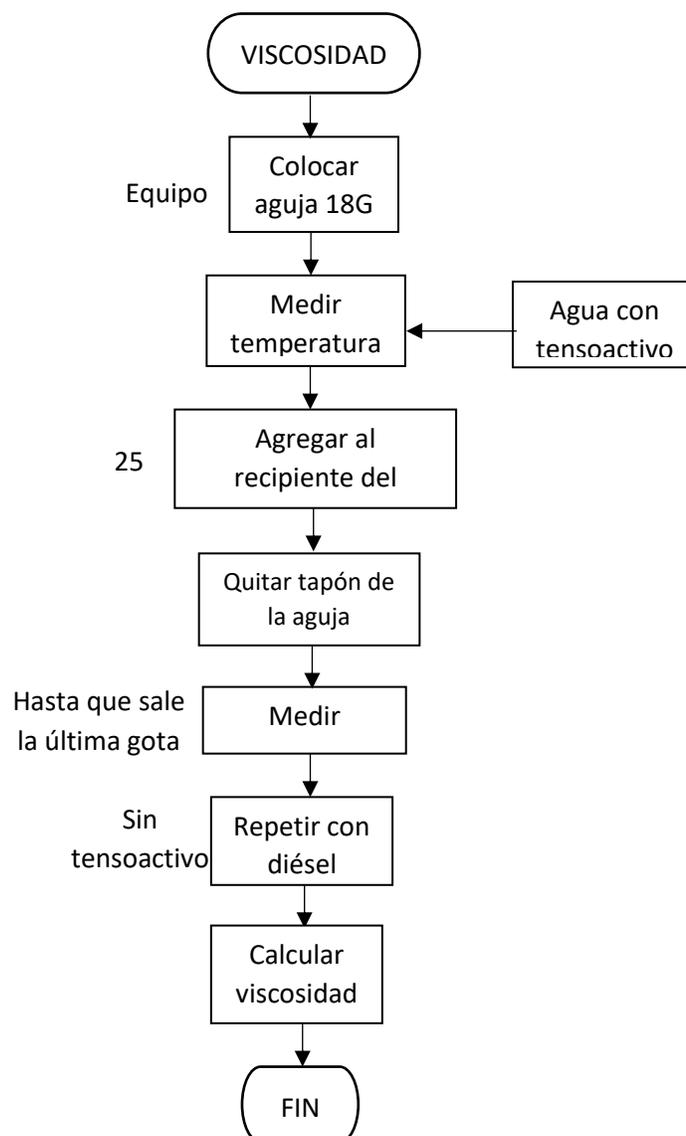
$$cSt = \frac{cP}{\text{Densidad de la muestra}}$$

Tabla 54. Viscosidad dinámica del diésel

Viscosidad dinámica (cSt)	Temperatura (°C)	Concentración de catalizador (% p/p)		
		5	10	15
600	600	1.77	1.79	1.80
650	650	1.96	1.84	1.73

Fuente: Elaboración propia.

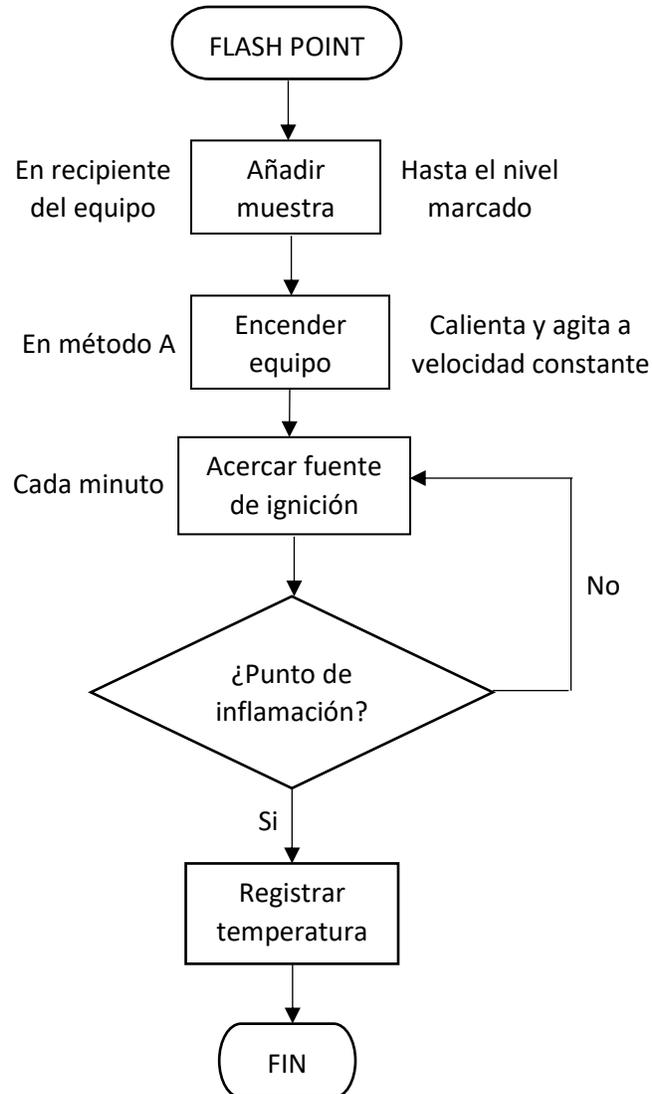
Diagrama 10. Proceso para calcular la viscosidad del diésel



Fuente: Elaboración propia.

4. Flash point

Diagrama 11. Proceso para hallar el flash point del diésel



Fuente: Elaboración propia.

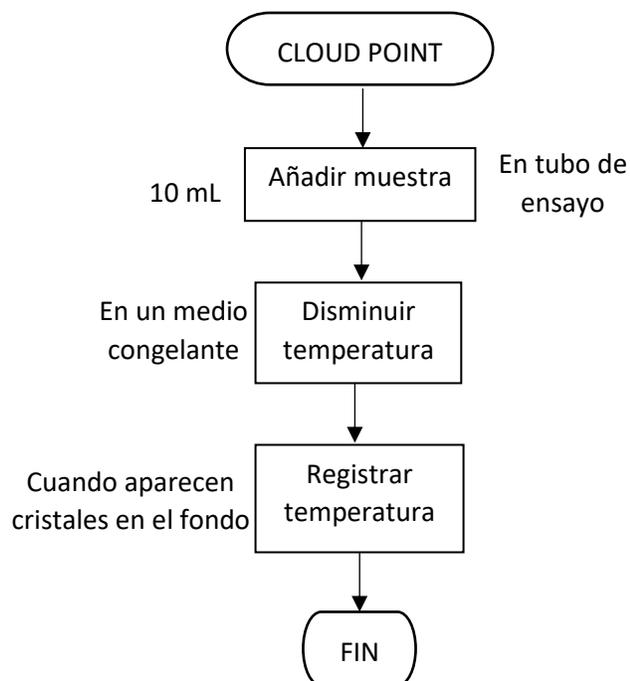
Figura 36. Equipo Pensky-Martens de copa cerrada



Fuente: Elaboración propia.

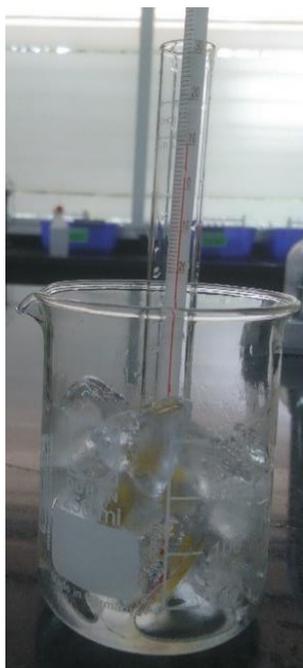
5. Cloud point

Diagrama 12. Proceso para hallar el cloud point del diésel



Fuente: Elaboración propia.

Figura 37. Disminución de temperatura para determinar el cloud point



Fuente: Elaboración propia.

6. Carbón Conradson

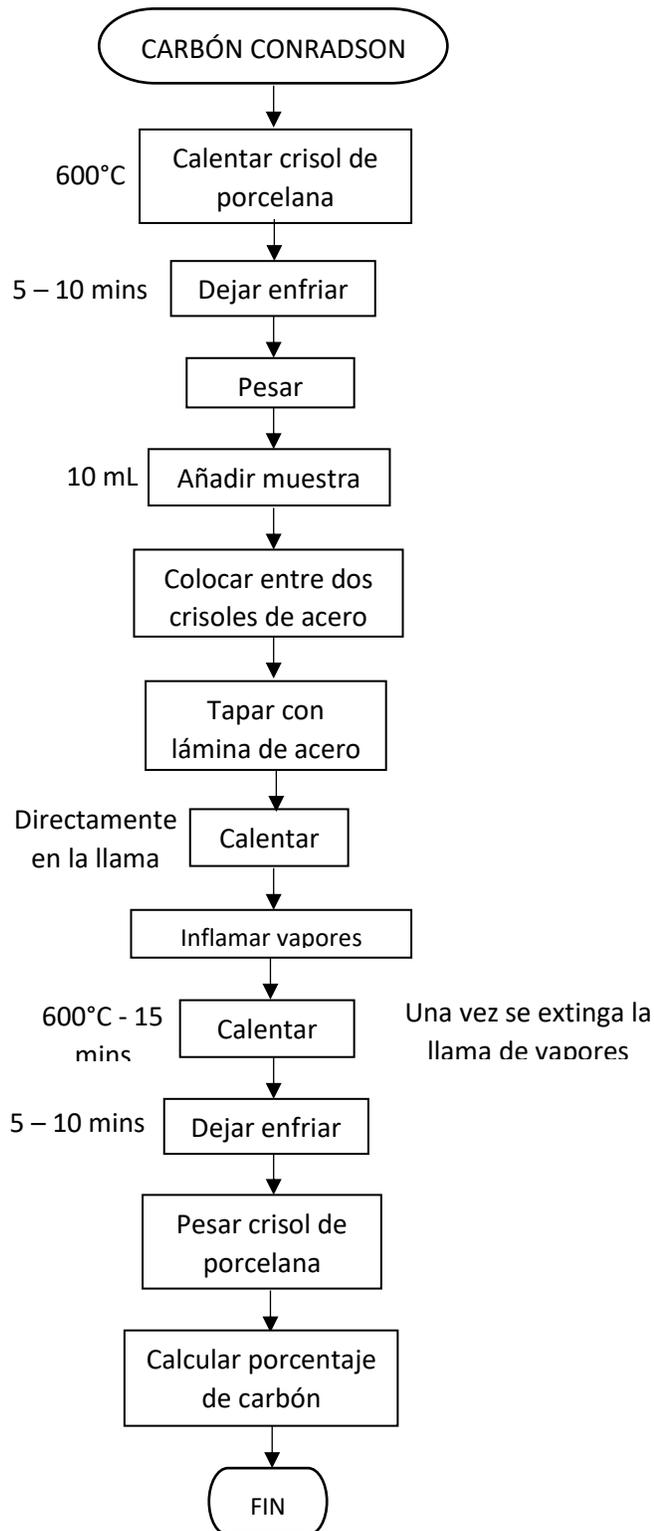
- Crisol tarado (600°C) = 19.18363
- Crisol con muestra (600°C) = 27.28363
- Crisol tarado (650°C) = 17.8833
- Crisol con muestra (650°C) = 25.9833

Tabla 55. Peso crisol con residuo de carbón

Peso crisol con residuo carbonoso (g)	Temperatura (°C)	Concentración de catalizador (% p/p)		
		5	10	15
600	600	19.18445	19.18441	19.18435
650	650	17.88410	17.88400	17.88390

Fuente: Elaboración propia.

Diagrama 13. Proceso para determinar el carbón conradson del diésel



Fuente: Elaboración propia.

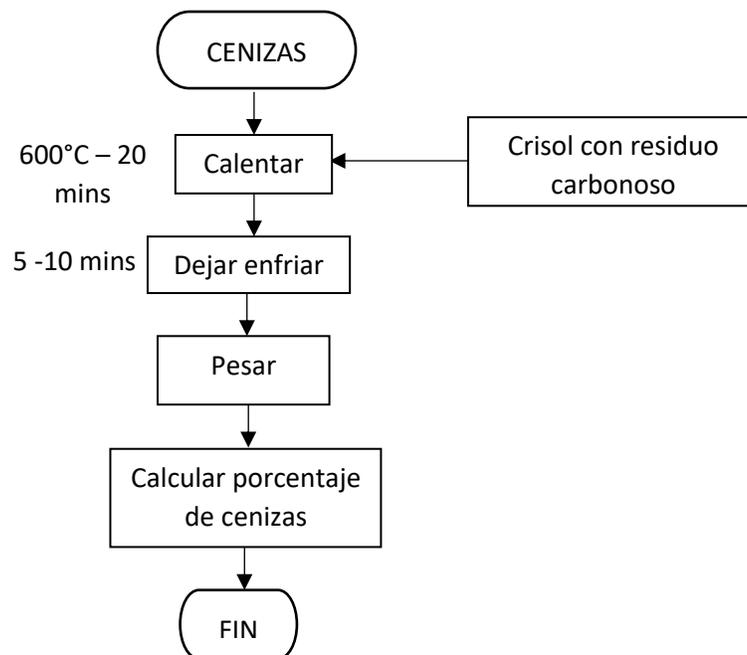
Figura 38. Instrumento utilizado para hallar carbón conradson



Fuente: Elaboración propia.

7. Cenizas

Diagrama 14. Proceso para determinar las cenizas del diésel



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 56. Peso crisol con cenizas

Peso crisol con cenizas (g)		Concentración de catalizador (% p/p)		
		5	10	15
Temperatura (°C)	600	19.18403	19.18376	19.18371
	650	17.88347	17.88340	17.88338

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO E

PRODUCTOS OBTENIDOS MEDIANTE EL RECICLAJE QUÍMICO

Tabla 57. Peso de los productos obtenidos mediante el reciclaje químico

Componentes (%)		Concentración de catalizador (%p/p)			
		5	10	15	
Temperatura (°C)	600	<u>Gases</u>	386	210	126
		<u>Aceite</u>	560	548	525
		Keroseno	217	240	255
		Diésel	248	257	262
		Parafina	7	3	0
		Pesados	45	16	6
		<u>Carbonilla</u>	97	274	351
	650	<u>Gases</u>	302	328	252
		<u>Aceite</u>	743	660	646
		Keroseno	257	256	268
Diésel		305	303	309	
Parafina		12	9	0	
Pesados		122	31	22	
	<u>Carbonilla</u>	2	73	149	

Fuente: Elaboración propia.