

DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA PARA EL APROVECHAMIENTO DE
CAUCHO MOLIDO DE NEUMÁTICOS USADOS A PARTIR DE PIRÓLISIS

DANIEL CHIVATÁ TROMPETERO
CRISTIÁN CAMILO DUARTE FUENTES

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

DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA PARA EL APROVECHAMIENTO DE
CAUCHO MOLIDO DE NEUMÁTICOS USADOS A PARTIR DE PIRÓLISIS

DANIEL CHIVATÁ TROMPETERO
CRISITÁN CAMILO DUARTE FUENTES

Proyecto integral de grado para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO

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

Nota de aceptación:

Orientador. Ing.

Jurado 1.

Jurado 2.

Bogotá D.C., Febrero 2018

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. JAIME POSADA DÍAZ

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Secretario General

Dr. JUAN CARLOS POSADA GARCÍA-PEÑA

Decano de la Facultad de Ingenierías

Dr. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director del Programa

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 expuestos en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

A Dios por darme la fuerza y la fe necesaria para seguir adelante a pesar de las dificultades y adversidades.

A mis padres Milbia del Rosario Trompetero Vela y Luis Alberto Chivatá Díaz por brindarme su apoyo incondicional en las decisiones que he tomado y en los sueños que tengo en mente.

A mis abuelas Rosalba Vela Rivas y María del Carmen Díaz de Chivatá por brindarme su apoyo y educación, gracias a ellas hoy soy la persona que soy.

A mis demás familiares por sus enseñanzas y apoyo incondicional en mi desarrollo personal, familiar y profesional.

En especial a mi amigo y compañero Cristián Camilo Duarte Fuentes por su confianza y lealtad en el desarrollo de este proyecto, gracias por ser un excelente amigo y compañero a lo largo de toda mi carrera.

En especial a mi amigo y compañero David Alejandro Gutiérrez Mora por su compromiso y apoyo, gracias a él tuvimos el ímpetu y temple necesario para desarrollar este proyecto.

A todos aquellos amigos y amigas que influyeron en mi desarrollo como persona y como profesional, gracias por las experiencias y momentos vividos.

Daniel Chivatá Trompetero.

DEDICATORIA

A Dios por haberme permitido trabajar en este proyecto con toda la dedicación y esfuerzo, por darme la fuerza para salir adelante a pesar de todos los obstáculos que se presentaron.

A mis padres, María Elena Fuentes y Edilberto Duarte porque gracias a su apoyo, enseñanzas y amor me dieron la confianza necesaria para sacar adelante el proyecto y la motivación para trabajar todos los días.

A mi difunto abuelo Pedro José Duarte, porque fue una persona que siempre quiso verme triunfar y que me brindo apoyo constante día a día, aunque no esté conmigo, sé que estaría muy feliz por esto que estoy consiguiendo, gracias abuelo.

A mis hermanos y demás familiares por sus enseñanzas y apoyo incondicional en mi desarrollo personal, familiar y profesional.

A mis amigos por su apoyo incondicional en los momentos necesarios.

En especial a mi amigo y compañero de proyecto Daniel Chivatá Trompetero, por su honestidad, tolerancia, respeto y dedicación con todo lo relacionado con el proyecto, gracias por su compromiso, gracias por acompañarme en este camino y gracias por ser una excelente persona y amigo.

A mi amigo y compañero David Alejandro Gutiérrez Mora por su apoyo y valores como persona.

A todas aquellas personas que influyeron en mi desarrollo como persona y como profesional, gracias por las experiencias y momentos vividos.

Cristian Camilo Duarte Fuentes.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos en primer lugar a Dios por darnos la fuerza, salud y energía necesaria para culminar esta gran etapa de nuestras vidas, permitiéndonos forjar una buena amistad y desarrollo personal.

A nuestros padres y familiares, quienes siempre nos acompañaron y respaldaron a lo largo de todo este proceso.

A nuestro amigo, compañero y socio David Alejandro Gutiérrez Mora por su apoyo a lo largo de este proyecto y en futuros sueños y ambiciones, gracias por su amistad.

A nuestro orientador el Ingeniero Diego Nicolás Rodríguez Serrano por su colaboración y paciencia a lo largo del proyecto.

A la empresa Dr. Calderón Laboratorios Asistencia Técnica Agrícola por su inmensa colaboración en el desarrollo de las pruebas y otras experiencias enriquecedoras que permitieron la culminación de este proyecto.

Al Ingeniero Felipe Calderón Sáenz por su inmensa colaboración y apoyo en el desarrollo de las pruebas experimentales y demás conocimiento adquirido, muchas gracias por su apoyo y atención prestada.

A la empresa GCR Soluciones S.A por suministrarnos la materia prima necesaria y por permitirnos conocer ciertos temas del sector industrial en Colombia.

A los demás amigos y colaboradores que nos permitieron desarrollar y culminar este proyecto.

**Daniel Chivatá Trompetero.
Cristián Camilo Duarte Fuentes.**

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	28
OBJETIVOS	29
1. MARCO TEÓRICO	30
1.1 NEUMÁTICOS	30
1.1.1 Composición del neumático	30
1.2 PROCESOS DE TRATAMIENTO Y REUTILIZACIÓN DE NEUMÁTICOS	32
1.2.1 Procesos físicos-triturado o molido	33
1.2.2 Procesos de regeneración	35
1.2.3 Desvulcanización	35
1.2.4 Pirólisis	35
1.3 PIRÓLISIS	37
1.3.1 Contexto histórico	37
1.3.2 Fundamentos	38
1.3.3 Caracterización y aplicación de los productos de pirólisis	39
1.3.4 Variables que afectan el proceso de pirólisis	43
1.3.5 Tipos de pirólisis	45
1.3.6 Tipos de reactores de pirólisis	47
1.3.7 Esquemas tecnológicos de pirólisis	52
1.3.8 Planta de pirólisis de horno rotatorio	54
2. ANÁLISIS DE MERCADO NEGRO DE HUMO Y FUEL OIL EN COLOMBIA	57
2.1 CADENA DE VALOR	57
2.2 IDENTIFICACIÓN COMERCIAL	59
2.2.1 Código de clasificación industrial internacional y código arancelario	59
2.2.2 Análisis estructural de la industria	59
2.3 IDENTIFICACIÓN DE OFERTA Y DEMANDA	61
2.3.1 Identificación y análisis de oferta	62
2.3.2 Identificación y análisis de demanda	70
2.4 ANÁLISIS DEMANDA VS. OFERTA	76
2.5 IDENTIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE LA OFERTA DE GCR	79

2.5.1 Oferta Nacional de GCR	79
2.5.2 Oferta local de GCR en la ciudad de Bogotá D.C	81
2.5.3 Capacidad de procesamiento	83
2.6 SEGMENTACIÓN DE MERCADO	83
2.6.1 Rendimientos porcentuales de producción	83
2.6.2. Capacidad de producción de la planta	84
2.6.3. Porcentaje de participación de mercado	85
2.7 MICROLOCALIZACIÓN DE LA PLANTA	85
2.7.1 Locaciones evaluadas	85
2.7.2 Selección de localización según el método de análisis dimensional	86
3. DISEÑO CONCEPTUAL	89
3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	89
3.1.1 Diagrama de bloques	89
3.1.2 Diagrama de flujo de proceso	91
3.2 CRITERIOS DE DISEÑO	92
3.2.1 Tipo de pirólisis	93
3.2.2 Tipo de reactor	93
3.2.3 Caracterización de la materia prima	93
3.2.4 Naturaleza y propiedades físicas de los productos	95
3.2.5 Rendimientos teóricos producción	97
3.3 DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE RENDIMIENTOS DE NEGRO DE HUMO Y FUEL OIL	98
3.3.1 Montaje experimental	99
3.3.2 Metodología experimental	103
3.3.3 Resultados	104
3.4 DISEÑO DE EQUIPOS PRINCIPALES	108
3.4.1 Diseño unidad de reacción	108
3.4.2 Diseño unidad de intercambio de calor	115
3.4.3 Diseño unidad de separación	118
3.4.4 Diseño unidades de almacenamiento de productos	120
3.5 BALANCE DE MASA Y ENERGÍA DE LA PROPUESTA DE DISEÑO	121
3.5.1 Condiciones de operación en la planta	121

3.5.2 Balance de masa	122
3.5.3 Balance de energía	127
3.6 DESCRIPCIÓN OPERACIONAL	129
3.6.1 Narrativa operacional	130
3.6.2 Diagrama de Gantt de la operación	131
4. EVALUACIÓN FINANCIERA	134
4.1 CRITERIOS DE OPERACIÓN Y ECONÓMICOS	134
4.2 ESTRUCTURA DE COSTOS E INVERSIONES	134
4.2.1 Inversiones fijas	135
4.2.2 Inversiones diferidas	135
4.2.3 Costos de operación	136
4.3 FLUJO DE CAJA DEL PROYECTO	141
4.3.1 Horizonte de planeación	141
4.3.2 Estructura de ingresos	141
4.3.3 Estado de resultados del proyecto	142
4.3.4 Flujo de caja neto	143
4.4 INDICADORES FINANCIEROS	144
4.4.1 Tasa interna de oportunidad (TIO)	145
4.4.2 Valor presente neto (VPN)	145
4.4.3 Tasa verdadera de rentabilidad (TVR)	146
4.4.4 Relación beneficio costo (R B/C)	146
4.4.5 Índice de rentabilidad (IR)	147
5. CONCLUSIONES	148
6. RECOMENDACIONES	149
BIBLIOGRAFÍA	150
ANEXOS	157

LISTA DE ABREVIATURAS

B/C: Relación Beneficio – Costo.

BR: Caucho Butílico.

EA: Efectiva Anual.

E_a: Energía de Activación de reacción (kJ/mol).

GCR: Gránulo de caucho reciclado obtenido de neumáticos en desuso.

GCV: Poder calorífico neto, por sus siglas en inglés “*gross calorific value*” (kJ/kg).

IR: Índice de Rentabilidad.

K₀: Factor pre-exponencial (min⁻¹).

K₁: Constante de rapidez de reacción (min⁻¹).

LMTD: Diferencia media logarítmica de temperatura o LMTD “*logarithmic mean temperature difference*” (°C).

NBP: Temperatura normal de destilación.

NFU: Neumáticos o llantas fuera de uso.

NR: Caucho Natural.

R: Constante universal de los gases ideales (J/mol*k).

SBR: Caucho Estireno Butadieno.

TEMA: “*Tubular Exchanger Manufacturers Association*”.

TIO: Tasa interna de oportunidad (%).

Ton: Tonelada Métrica de 1000 kilogramos.

t_{rxn}: Tiempo de reacción (min).

TVR: Tasa Verdadera de Rentabilidad (%).

VPN: Valor Presente Neto (\$ COP, USD).

α: Constante de Suavización Lineal.

β: Constante de Suavización de Tendencia.

γ: Constante de Suavización de Estacionalidad.

ρ: Densidad (kg/m³).

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Composición del neumático con base a sus materias primas.	31
Tabla 2. Análisis Próximo y Elemental del GCR.	40
Tabla 3. Descripción de los Tipos de Pirólisis según las condiciones de operación manejadas.	45
Tabla 4. Comparación de los Tipos de Pirólisis según el tipo de calentamiento.	46
Tabla 5. Código CIU y Arancelario de Negro de Humo y Fuel Oil en Colombia.	59
Tabla 6. Histórico de Producción para Negro de Humo en Colombia del año 2006 al 2014.	62
Tabla 7. Histórico de Producción para Fuel Oil en Colombia del año 2006 al 2014.	64
Tabla 8. Pronóstico de Oferta para Negro de Humo en Colombia para el año 2022, Aplicando el Método de Winters.	66
Tabla 9. Pronóstico de Oferta para Fuel Oil en Colombia para el año 2022, Aplicando el Método de Winters.	68
Tabla 10. Histórico de Consumo para Negro de Humo en Colombia del año 2006 al 2014.	70
Tabla 11. Histórico de Consumo para Fuel Oil en Colombia del año 2006 al 2014.	71
Tabla 12. Pronóstico de Demanda para Negro de Humo en Colombia para el año 2022, Aplicando el Método de Winters.	73
Tabla 13. Pronóstico de Demanda para Fuel Oil en Colombia para el año 2022, Aplicando el Método de Winters.	75
Tabla 14. Análisis de Demanda VS. Oferta para cantidades de Negro de Humo en Colombia para el año 2022.	77
Tabla 15. Análisis Demanda VS. Oferta de ventas de Negro de Humo en Colombia para el año 2022.	77
Tabla 16. Análisis de Demanda VS. Oferta para cantidades de Fuel Oil en Colombia para el año 2022.	78
Tabla 17. Análisis Demanda VS. Oferta de ventas de Fuel Oil en Colombia para el año 2022.	78
Tabla 18. Histórico de Oferta para Ripio de llanta desde 1999 hasta el año 2010 en Colombia.	79
Tabla 19. Proyección de Oferta de Ripio de Llanta en Colombia para el año 2022.	80
Tabla 20. Factores De Análisis de Microlocalización.	87
Tabla 21. Índices de comparación.	88
Tabla 22. Descripción de corrientes de proceso del diagrama PFD de la planta.	91
Tabla 23. Análisis Próximo y Elemental del GCR.	95
Tabla 24. Composición Corriente Gas Proceso.	96
Tabla 25. Composición Molar de la Fracción Condensable según Puntos de Ebullición.	97

Tabla 26. Rendimientos Teóricos de producción para diferentes configuraciones de reactor.	98
Tabla 27. Rendimientos Experimentales Obtenidos en la pirólisis de GCR.	105
Tabla 28. Balance Másico de las corrientes de la planta por <i>batch</i> procesado.	123
Tabla 29. Gas de Reciclo quemado en el proceso y en la Tea.	124
Tabla 30. Flujo Másico de las corrientes producidas en el reactor.	124
Tabla 31. Tabla de resumen de flujo de corrientes del diagrama PFD.	126
Tabla 32. Capacidad Calorífica, Entalpía de Reacción y Vaporización para pirólisis de GCR.	128
Tabla 33. Descripción del Diagrama de Gantt para la Operación de la Planta.	132
Tabla 34. Criterios de Operación y Económicos.	134
Tabla 35. Costos Asociados a Inversiones Fijas.	135
Tabla 36. Costos Asociados a Inversiones Diferidas.	136
Tabla 37. Precios de Materias e Insumos durante el proyecto.	136
Tabla 38. Tasas de Consumo de Materias Primas e Insumos por <i>batch</i> .	137
Tabla 39. Costos Anuales Totales de Materia Prima e Insumos.	137
Tabla 40. Proyección del S.M.L.V para el año 2022.	138
Tabla 41. Costos Totales Nómina.	138
Tabla 42. Proyección Precios de Tarifas de Servicios Públicos al año 2022.	139
Tabla 43. Costos Totales de Servicios.	139
Tabla 44. Depreciación de Equipos.	140
Tabla 45. Costos Totales de Impuestos.	141
Tabla 46. Precios Unitarios de venta para Negro de Humo y Fuel Oil.	142
Tabla 47. Resumen Flujo de Caja Acumulado.	143
Tabla 48. Resumen Indicadores de Viabilidad Financiera del Proyecto.	147
Tabla 49. Muestra de cálculo del método de Winter en la serie histórica para las cantidades de Oferta de Negro de Humo.	159
Tabla 50. Muestra de cálculo del método de Winter para las cantidades de Oferta de Negro de Humo.	159
Tabla 51. Muestra de cálculo parámetros de error para la serie de Oferta de Negro de Humo.	161
Tabla 52. Muestra de Cálculo Índices Locacionales de la Microlocalización.	162
Tabla 53. Resultados experimentales para T=450°C.	163
Tabla 54. Resultados experimentales para T=500°C.	164
Tabla 55. Resultados experimentales para T=550°C.	165
Tabla 56. Resultados experimentales para T=600°C.	166
Tabla 57. Resultados experimentales para T=650°C.	167
Tabla 58. Resultados de Gravimetría de los productos obtenidos.	168
Tabla 59. Resultados de la Conversión para cada ensayo.	168
Tabla 60. Valores presentes del flujo neto de caja.	183
Tabla 61. Datos empleados en el cálculo de la TVR.	183

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Planta de Trituración Mecánica a temperatura ambiente de Neumáticos Usados.	33
Figura 2. Planta de Trituración Criogénica de Neumáticos Usados, mediante Nitrógeno Líquido.	34
Figura 3. Esquema de un proceso Pirólisis de Neumáticos Usados.	36
Figura 4. Esquema de una planta de pirólisis de materia orgánica.	39
Figura 5. Esquema de un proceso de pirólisis con reactor de lecho fluidizado con calentamiento indirecto, tolva de alimentación, ciclón y condensador de líquidos.	47
Figura 6. Esquema de un proceso de pirólisis con reactor de cono rotatorio con calentamiento indirecto, tolva de alimentación, ciclón y condensador de líquidos.	48
Figura 7. Esquema de un proceso de pirólisis con reactor de tornillo sin fin con calentamiento indirecto, tolva de alimentación, colector de sólidos ,ciclón y condensador de líquidos.	49
Figura 8. Esquema de un reactor de Lecho Fijo con separador de gases.	50
Figura 9. Proceso de pirólisis con reactor de horno rotatorio inclinado de operación continua.	51
Figura 10. Esquema del Proceso EDDITH®.	52
Figura 11. Esquema del proceso SERPAC.	53
Figura 12. Esquema del proceso PKA.	54
Figura 13. Esquema de una Planta de Pirólisis una capacidad de procesamiento de 10 ton/ <i>batch</i> , para el aprovechamiento de Neumáticos Usados.	55
Figura 14. Cadena de Valor en la producción de Negro de Humo y Fuel Oil a partir de GCR.	58
Figura 15. Análisis Estructural de la Industria para Negro de Humo.	60
Figura 16. Análisis Estructural de la Industria para Fuel Oil.	61
Figura 17. Diagrama de Bloques de la Planta.	90
Figura 18. Diagrama de Flujo de Proceso de la Planta.	92
Figura 19. Montaje a Nivel de Laboratorio empleado para la pirólisis de GCR.	99
Figura 20. Reactor tipo marmita vertical.	101
Figura 21. Conector de Gases.	101
Figura 22. Condensador en Húmedo o trampa de gases condensables.	102
Figura 23. Quemador de gases de proceso no condensables, Tea.	102
Figura 24. Controlador e indicador de temperatura.	103
Figura 25. Diagrama del proceso de degradación térmica de GCR.	109
Figura 26. Cuerpo del Reactor de Horno Rotatorio para Pirólisis.	112
Figura 27. Corte transversal de la Zona de Reacción del Reactor.	114
Figura 28. Coraza del Reactor de Horno Rotatorio.	114
Figura 29. Intercambiador de tubos y coraza 2-4.	117
Figura 30. Separador Vertical Bifásico.	119
Figura 31. Tanque de condensados.	120
Figura 32. PFD de la planta con la tabla resumen de corrientes de proceso.	125

Figura 33. Estado de Resultados del Proyecto.	142
Figura 34. Flujo de Caja Neto del Proyecto.	143
Figura 35. Dimensiones de tubos según BWG.	175
Figura 36. Distribución de Zonas en el Separador.	179
Figura 37. Protocolo Seguido en las Corridas Experimentales.	184

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Histórico de Cantidades de Oferta para Negro de Humo en Colombia del año 2006 al 2014.	63
Gráfica 2. Histórico de las Ventas de cantidades de Oferta para Negro de Humo en Colombia del año 2006 al 2014.	64
Gráfica 3. Histórico de Cantidades de Oferta para Fuel Oil en Colombia del año 2006 al 2014.	65
Gráfica 4. Histórico de las Ventas de cantidades de Oferta para Fuel Oil en Colombia del año 2006 al 2014.	65
Gráfica 5. Pronóstico Obtenido Mediante el Método de Winters, para las cantidades de Oferta para Negro de Humo en Colombia para el año 2022.	67
Gráfica 6. Pronóstico Obtenido Mediante el Método de Winters, para las Ventas de cantidades de Oferta para Negro de Humo en Colombia para el año 2022.	67
Gráfica 7. Pronóstico Obtenido Mediante el Método de Winters, para las cantidades de Oferta para Fuel Oil en Colombia para el año 2022.	69
Gráfica 8. Pronóstico Obtenido Mediante el Método de Winters, para las Ventas de cantidades de Oferta para Fuel Oil en Colombia para el año 2022.	69
Gráfica 9. Histórico de Cantidades de Demanda para Negro de Humo en Colombia del año 2006 al 2014.	70
Gráfica 10. Histórico de las Ventas de cantidades de Demanda para Negro de Humo en Colombia del año 2006 al 2014.	71
Gráfica 11. Histórico de Cantidades de Demanda para Fuel Oil en Colombia del año 2006 al 2014.	72
Gráfica 12. Histórico de las Ventas de cantidades de Demanda para Fuel Oil en Colombia del año 2006 al 2014.	72
Gráfica 13. Pronóstico Obtenido Mediante el Método de Winters, para las cantidades de Demanda para Negro de Humo en Colombia para el año 2022.	74
Gráfica 14. Pronóstico Obtenido Mediante el Método de Winters, para las Ventas de cantidades de Demanda para Negro de Humo en Colombia para el año 2022.	74
Gráfica 15. Pronóstico Obtenido Mediante el Método de Winters, para las cantidades de Demanda para Fuel Oil en Colombia para el año 2022.	76
Gráfica 16. Pronóstico Obtenido Mediante el Método de Winters, para las Ventas de cantidades de Demanda para Fuel Oil en Colombia para el año 2022.	76
Gráfica 17. Histórico de Producción de Ripio de Llanta en Colombia desde 1999 Hasta el 2010.	80
Gráfica 18. Pronóstico obtenido Mediante Regresión Lineal, para la Oferta de Ripio de Llanta en Colombia Hasta el año 2022.	81
Gráfica 19. Rendimiento de Producción de Negro de Humo con respecto a la Temperatura de Operación en la Unidad de Reacción.	105
Gráfica 20. Rendimiento de Producción de Fuel Oil con respecto a la Temperatura de Operación en la Unidad de Reacción.	106

Gráfica 21. Rendimiento de Producción de Gas no Condensable con respecto a la Temperatura de Operación en la Unidad de Reacción.	107
Gráfica 22. Comportamiento de la Presión de Operación del sistema en función del Tiempo a diferentes Temperaturas.	108
Gráfica 23. Diagrama de Gantt, Que muestra el tiempo total de operación por <i>Batch</i> de la planta.	133
Gráfica 24. Flujo de Caja Neto Acumulado del Proyecto.	144

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Empresas trituradoras de NFUs, proveedoras de GCR (2017).	82
Cuadro 2. Oferta promedio diaria y mensual de GCR, de las empresas identificadas.	82
Cuadro 3. Rendimiento Teórico Porcentual de Producción para los productos pirolíticos.	83
Cuadro 4. Capacidad de Producción de la planta con base a la capacidad de procesamiento.	84
Cuadro 5. Capacidad de Procesamiento y Producción Real de la Planta.	84
Cuadro 6. Porcentaje de Participación de Mercado para ambos productos al año 2022.	85
Cuadro 7. Prioridad de los factores analizados en la Microlocalización.	86
Cuadro 8. Características físicas del GCR.	94
Cuadro 9. Montaje Experimental empleado en la determinación de los rendimientos de producción.	100
Cuadro 10. Especificaciones de los ensayos realizados.	103
Cuadro 11. Parámetros Cinéticos del Reactor.	111
Cuadro 12. Tiempo de Operación del Reactor de Horno Rotatorio.	111
Cuadro 13. Dimensiones del cuerpo del Reactor.	113
Cuadro 14. Ancho de la chaqueta de calentamiento, aislantes y coraza.	113
Cuadro 15. Consumo de combustible en el quemador del reactor.	115
Cuadro 16. Especificaciones para la rotación del Reactor.	115
Cuadro 17. Especificaciones Técnicas necesarias para la construcción del Condensador.	116
Cuadro 18. Agua de enfriamiento requerida.	117
Cuadro 19. Especificaciones – Separador Bifásico Vertical.	119
Cuadro 20. Dimensiones Tanque De Condensados.	121
Cuadro 21. Condiciones de Operación – Reactor de Horno Rotatorio.	121
Cuadro 22. Condiciones de Operación – Intercambiador Tubos y Coraza	122
Cuadro 23. Condiciones de Operación – Separador Gas-Líquido.	122
Cuadro 24. Condiciones de Operación – Quemador.	122
Cuadro 25. Cantidades de combustible necesario para suplir el 100% de la energía del reactor.	128
Cuadro 26. Cantidades de combustible requeridos en la etapa de arranque del reactor.	129
Cuadro 27. Tarifas Servicios Públicos e Insumos para el año 2017.	139
Cuadro 28. Tarifas Impuestos Directos.	140
Cuadro 29. Constantes de suavización del método de Winter, para la serie de Oferta de Cantidades de Negro de Humo.	160
Cuadro 30. Parámetros utilizados en la medición de error del método Winter.	160
Cuadro 31. Constantes de suavización del método de Winter usadas en las series pronosticadas.	161

Cuadro 32. Parámetros de las Corrientes del Intercambiador de Calor.	172
Cuadro 33. Velocidad del Gas y Coeficiente Global de Transferencia del Intercambiador.	173
Cuadro 34. Especificaciones de los tubos del intercambiador.	174
Cuadro 35. Producción del Separador.	178
Cuadro 36. Alturas Según Zonas Del Separador.	179
Cuadro 37. Propiedades de los combustibles empleados en el quemador.	181
Cuadro 38. Gases de Combustión de la corriente 8.	181
Cuadro 39. Indicadores Ajustados para el Cálculo de la TIO.	182

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Reacción Genérica de Pirólisis.	38
Ecuación 2. Análisis Demanda Vs Oferta.	77
Ecuación 3. Índices de comparación de localizaciones.	86
Ecuación 4. Rendimiento de Producción.	104
Ecuación 5. Constante de Velocidad de Reacción.	109
Ecuación 6. Cinética de Reacción Propuesta.	109
Ecuación 7. Cinética de Reacción en Función de la Conversión.	110
Ecuación 8. Definición de Conversión.	110
Ecuación 9. Definición de la Conversión como Pérdida de Peso.	110
Ecuación 10. Ecuación de Diseño para un reactor <i>Batch</i> .	110
Ecuación 11. Ecuación de Diseño en función de la conversión.	110
Ecuación 12. Ecuación de Diseño del intercambiador de calor.	116
Ecuación 13. Ecuación General de Balance.	122
Ecuación 14. Cambio Entálpico para la Reacción de Pirolisis de GCR.	127
Ecuación 15. Cantidad de Combustible requerida en el proceso.	128
Ecuación 16. Expresión para el cálculo de la TIO.	145
Ecuación 17. Expresión para el cálculo del VPN.	145
Ecuación 18. Expresión para el cálculo de la TVR.	146
Ecuación 19. Expresión para el cálculo de la Relación Beneficio Costo.	146
Ecuación 20. Expresión para el cálculo del Índice de Rentabilidad.	147
Ecuación 21. Términos del Método de Winters.	158
Ecuación 22. Volumen del Reactor.	169
Ecuación 23. Diámetro del Reactor.	170
Ecuación 24. Radio y Perímetro del Reactor.	170
Ecuación 25. Área de Transferencia en el Reactor.	170
Ecuación 26. Heurística para la distribución radial del concreto refractario.	170
Ecuación 27. Heurística para la distribución radial de la Lana de Roca.	170
Ecuación 28. Velocidad de Rotación del Horno.	171
Ecuación 29. Potencia del Motorreductor del Horno Rotatorio.	171
Ecuación 30. Calor Sensible Requerido.	172
Ecuación 31. Calor Latente Requerido.	172
Ecuación 32. Balance de Energía Para el Fluido Caliente.	172
Ecuación 33. Balance De Energía para el Fluido Frío.	172
Ecuación 34. Flujo Requerido del Fluido de Enfriamiento.	173
Ecuación 35: Ecuación de continuidad.	176
Ecuación 36: Área Transversal de Flujo.	176
Ecuación 37. Área del intercambiador de Calor.	177
Ecuación 38. Diámetro de la coraza del Intercambiador de Calor.	177
Ecuación 39. Volumen - Zona de recolección de Líquidos.	178
Ecuación 40. Densidad y volumen del aceite almacenado.	180

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Desarrollo del método de Winters.	158
Anexo B. Método de análisis dimensional para micro localización.	162
Anexo C. Tablas de resultados experimentación.	163
Anexo D. Diseño unidad de reacción.	169
Anexo E. Diseño unidad de intercambio de calor.	172
Anexo F. Diseño unidad de separación.	178
Anexo G. Diseño tanque de condensados.	180
Anexo H. Balance de masa y energía.	181
Anexo I. Indicadores de viabilidad financiera.	182
Anexo J. Protocolo corridas experimentales.	184

GLOSARIO

ARREGLO DE TUBOS: forma en la cual está distribuido un banco de tubos, este es por lo general triangular o cuadrado.

BANCO DE TUBOS: grupo de tubos cilíndricos, montados de forma grupal dentro de una coraza, con el eje de los tubos paralelos al eje de la coraza.

CALOR SENSIBLE: calor que intercambia un sistema a medida que aumenta su temperatura.

CALOR LATENTE: calor que intercambia un sistema mientras su temperatura permanece constante, este se genéricamente en los cambios de fase y en las reacciones químicas.

CALOR LATENTE DE VAPORIZACIÓN: energía requerida por una cantidad de sustancia para cambiar de fase gas a fase líquida.

CARBONO FIJO: fracción residual que permanece luego de retirar la humedad, las cenizas y el material volátil de la muestra.

CENIZAS: cantidad de materia sólida no combustible presente en la muestra, a mayor contenido de cenizas menor poder calorífico.

CONDENSADOR EN HÚMEDO: intercambiador de calor en donde el fluido frío y caliente entran en contacto directo y se la transferencia de calor, sin lugar a un proceso de reacción entre los fluidos.

CONDENSADOR EN SECO: intercambiador de calor en donde el fluido frío y el fluido caliente no entran en contacto directo para llevar a cabo la transferencia de calor, como es el caso de los intercambiadores de tubos y coraza.

CONTENIDO AZUFRE: azufre elemental o en forma mineral que contiene un combustible o material.

CRAQUEO TÉRMICO: es un proceso de rompimiento de las moléculas que constituyen un compuesto por la acción del calor sin generar procesos de oxidación o combustión, se realiza a temperaturas elevadas superiores a 500°C.

CURVA DE DESTILACIÓN ATMOSFÉRICA: técnica de caracterización de crudos o cortes derivados del petróleo, que compara la temperatura de ebullición de los

componentes de la muestra vs. el porcentaje de destilado acumulado; a partir de la cual se pueden obtener propiedades físicas y térmicas por medio de correlaciones.

FACTOR DE EMISIÓN: cuantifica la cantidad de determinado contaminante emitido por un combustible o material al realizar un proceso de combustión, se cuantifican en peso de contaminante por peso, volumen o energía de combustible.

FUEL OIL: mezcla de una gran variedad de moléculas orgánicas que van desde compuestos de bajo a alto punto de ebullición, es conocido en Colombia como combustóleo o Fuel Oil No 6, y se usa principalmente en procesos de combustión para calentamiento.

FUERZAS DE PORTER: es una herramienta de análisis estratégico para comprender la estructura de un sector de la economía con base a 5 fuerzas competitivas, tales como: proveedores, posibles compradores, productos sustitutos, competencia y el sector competitivo actual.

GAS DE SÍNTESIS: conocido como syngas, es un combustible en fase gaseosa compuesto principalmente por CO_2 y H_2 , el cuál es obtenido de procesos de descomposición térmica en ausencia de oxígeno de materias primas ricas en carbono como: carbón, biomasa etc.

GASIFICACIÓN: proceso de degradación térmica en presencia de un agente gasificante o oxidante, que produce gas combustible a partir de un sustrato rico en carbono.

GRÁNULO DE CAUCHO RECICLADO: producto obtenido de la trituración de neumáticos en desuso, el cual es sometido a procesos de separación que remueven materiales ferromagnéticos y fibras textiles provenientes del neumático, está compuesto de caucho natural y sintético.

HORIZONTE DE PLANEACIÓN: corresponde a la vida útil de un proyecto, en donde se establece un periodo de tiempo en el cual se pretende evaluar la proyección de mercado y financiera que tendría la puesta en marcha de un proyecto.

HUMEDAD: cantidad de agua presente en una muestra.

MARMITA VERTICAL: recipiente metálico que cuenta con un sistema de calentamiento eléctrico y que está aislado con ladrillo refractario, en donde se carga el material que va a ser sometido a pirólisis.

MATERIAL VOLÁTIL: compuestos de carbono, hidrógeno u otros elementos, el cual es proporcional al poder calorífico del material o muestra.

MERCADO: es el entorno donde se encuentran el producto o servicio ofrecido y el respectivo consumidor, es decir, es el conjunto de personas y entes corporativos de todo tipo que tienen o pueden tener influencia en el uso o consumo del producto final en un determinado sector de la economía y territorio geográfico.

NEGRO DE HUMO: material inorgánico y coloidal producido por la combustión incompleta de gas natural u otros productos del petróleo.

PASO ENTRE TUBOS: separación mínima que hay entre tubo y tubo dentro de un banco de tubos determinado.

PIRÓLISIS: proceso de degradación térmica que ocurre en ausencia de oxígeno o en condiciones en que la concentración de oxígeno es suficientemente baja como para no causar combustión, bajo temperaturas que oscilan los 400 °C y 800°C. Este proceso produce aceite de alto contenido energético, un gas sintético conocido como “syngas” y un residuo sólido rico en carbono, conocido como negro de humo o carbonilla.

PODER CALORÍFICO: representa la energía en forma de calor entregada por un combustible o material cuando es sometido a un proceso de combustión completa, su valor de expresa en MJ/kg o MJ/m³ dependiendo la naturaleza del combustible.

REACTOR DE HORNO ROTATORIO: reactor de geometría cilíndrica con orientación horizontal o leve inclinación, el cual se calienta de manera indirecta por medio de una chaqueta de calentamiento con gases de combustión operando en forma de *batch*, permite una salida constante de los gases generados y además posee un motorreductor que le permite girar radialmente.

REACTOR VERTICAL ESTACIONARIO: conocido como reactor de lecho fijo de geometría cilíndrica con orientación vertical, el cual se calienta de manera indirecta en el fondo ó hasta cierta altura de las paredes del reactor.

RENDIMIENTO PORCENTUAL DE PRODUCCIÓN: índice de producción de determinado producto A, expresado como un porcentaje másico de: ton producidas del producto A / ton materia prima empleada.

RIPIO: material granulado proveniente del corte u otros procesos mecánicos, que son llevados en metalurgia, reencauche de neumáticos etc.

TEA: tubo que permite liberar de forma controlada y segura los gases residuales de procesos de gas, evitando explosiones y disminuyendo el daño ambiental causado por los hidrocarburos no quemados.

TOPOLOGÍA: manera en la cual trabaja u opera cierto tipo de equipo.

VELOCIDAD AXIAL: es la velocidad de un fluido relacionada con un eje transversal de flujo.

VULCANIZACIÓN: es un proceso químico mediante el cual se calienta el caucho crudo en presencia de azufre, permitiendo obtener un caucho más estable, duro y resistente mecánicamente.

RESUMEN

El presente trabajo de grado realiza el diseño conceptual de una planta de pirólisis para la producción de Negro de Humo y Fuel Oil, empleando como materia prima gránulo de caucho reciclado (GCR) producido por empresas trituradoras de neumáticos usados o fuera de uso (NFUs), en el perímetro urbano de la ciudad de Bogotá D.C.

Inicialmente se identifica el mercado nacional de los productos de interés, para establecer un segmento del mercado para el Negro de Humo y Fuel Oil que se puede satisfacer basado en un análisis de Oferta de la materia prima ó GCR para la ciudad de Bogotá D.C.; además, con base a los rendimientos porcentuales de producción obtenidos experimentalmente, se establece la capacidad de procesamiento de la planta de 120 ton GCR/mes, junto a una capacidad de producción de 63 ton Negro de Humo/mes y 29 ton de Fuel Oil/mes.

A nivel de banco de laboratorio se identifica la temperatura a la cual se obtiene los mejores rendimientos de producción para un tiempo de residencia de 4 horas y presión atmosférica constantes, obteniendo rendimientos de producción para Negro de Humo y Fuel Oil de 52,20% y 23,80% respectivamente, bajo condiciones de operación para la unidad de reacción de 650°C y 76,4 kPa, bajo un régimen de operación isotérmico e isobárico. Basado en estos resultados se realiza el diseño conceptual de la planta, el cual abarca los siguientes aspectos: descripción del proceso (filosofía operacional), diagramas de flujo de proceso, dimensionamiento de unidades de reacción, separación e intercambio térmico y almacenamiento de productos, sumado a requerimientos de servicios auxiliares.

En el componente financiero, se tuvieron cuenta costos de: maquinaria, materias primas, producción y ensamblaje de la planta; lo anterior, sumado al cálculo de indicadores de viabilidad financiera como lo son: Valor Presente Neto, Tasa Verdadera de Rendimiento, Índice de Rentabilidad y Relación Beneficio-Costo, constituyen la evaluación financiera del proyecto. La viabilidad comercial, técnica y financiera para el montaje y puesta en marcha de una planta de pirólisis de GCR bajo las condiciones de procesamiento y producción establecidas, se ratifica debido a: demanda insatisfecha identificada para Negro de Humo y Fuel Oil para el año 2022 de 1.339 ton junto a 97.619.484 gal respectivamente, condiciones de operación de temperatura y presión estables de 650 °C y 76,4 kPa y una tasa interna de retorno de 23,68% EA superior a la TIO establecida de 16,17% EA, además de un valor presente neto de 3.331.646.411 \$COP bajo un horizonte de planeación de 5 años hasta el año 2022.

PALABRAS CLAVE Pirólisis, Planta de Pirólisis, Gránulo de Caucho, Fuel Oil, Negro de Humo.

INTRODUCCIÓN

Actualmente en la ciudad de Bogotá D. C. se han venido implementando planes de contingencia contra la inadecuada disposición y uso final de neumáticos usados, esto debido a las 5.303.739 de llantas equivalentes a 18.861 toneladas de material generadas anualmente al año 2015¹. Por medio de la Alcaldía Mayor junto a programas de posconsumo de agremiaciones industriales, como la Asociación Nacional de Empresarios De Colombia (ANDI), se ha logrado implementar un programa de gestión ambiental conocido como “Rueda Verde”. Rueda Verde, se encarga de la recolección y logística relacionada con la disposición final del neumático², junto con su distribución a empresas encargadas de tratamientos físicos como procesos de trituración y separación de los componentes de la llanta, dichos componentes son: gránulo de caucho, fibras de acero y fibras textiles.

Estos procesos primarios de trituración, abarcan el 72 % de la generación total para la ciudad de Bogotá, lo cual, constituye aproximadamente 13.560 toneladas de NFUs al año, equivalentes a 10.848 toneladas de caucho que pueden ser utilizados al año 2015³. Las principales alternativas de aprovechamiento para este material se presentan en el Capítulo 1, haciendo énfasis en tratamientos fisicoquímicos como la pirólisis que corresponde a un proceso de degradación térmica en ausencia de oxígeno y en el cual se obtienen como productos de interés: Negro de Humo y Fuel Oil, que poseen una alta aplicabilidad en el sector de manufactura de catalizadores basados en carbón activado y en el sector energético, respectivamente.

En el Capítulo 3 se desarrolla el diseño conceptual de una planta de pirólisis la cual emplea gránulo de caucho reciclado como materia prima en la obtención de Negro de Humo y Fuel Oil. El diseño está ligado a la identificación y segmentación de mercado para los productos a obtener, lo cual se expone en el Capítulo 2, permitiendo obtener la capacidad de producción de la planta y el porcentaje de participación que tendría en el mercado nacional, con base, a la oferta de materia prima disponible.

Finalmente, el Capítulo 4 complementa el diseño del proceso con un análisis de viabilidad financiero encargado de establecer el monto requerido en la futura implementación del proceso, teniendo en cuenta un horizonte de planeación de 5 años con el cual se calcularán los indicadores financieros propuestos.

¹ ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C., Colombia. Proyecto de Acuerdo N°. 135 de 2015. Por medio del cual se promueve la formulación del Plan estratégico para el manejo, reutilización y aprovechamiento de llantas usadas en el Distrito Capital y se adoptan otras disposiciones.

² ANDI. Rueda Verde. [En Línea]. [Citado 9 marzo, 2017] disponible en: (<http://www.ruedaverde.com.co/>).

³ OCADE LTDA; SANIPLAN y AMBIENTAL S.A. Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de Llantas y neumáticos usados generados por el parque automotor de Bogotá. Resumen Ejecutivo.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar un proceso de pirólisis aplicable industrialmente para obtener Negro de Humo y Fuel Oil a partir de gránulo de caucho proveniente de neumáticos usados.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Calcular que porcentaje de la Demanda de Negro de Humo y Fuel Oil en Colombia se satisface basado en la Oferta existente de GCR.
- Desarrollar el diseño conceptual de la planta de pirólisis, para la obtención de Negro de Humo y Fuel Oil.
- Realizar la evaluación financiera del proyecto.

1. MARCO TEÓRICO

Con el objetivo de comprender en qué consiste el proceso de pirólisis de GCR proveniente de llantas usadas ó NFUs para la obtención de Negro de Humo y Fuel Oil, se presentan conceptos generales de la composición de los neumáticos, además de una revisión concisa de los principales procesos físicos y químicos de aprovechamiento para este tipo de residuos. Se enfatiza la pirólisis térmica tipo *batch* llevada a cabo en reactores de horno rotatorio, como el proceso de interés del presente trabajo, describiendo sus fundamentos técnicos, así como la caracterización y aplicación teórica de los productos de interés del proceso, posteriormente se describen las variables operacionales que afectan el proceso para finalmente conocer la topología y el funcionamiento de plantas de pirólisis a nivel industrial.

1.1 NEUMÁTICOS

Se definen como elementos básicos para la movilidad de cualquier vehículo o automotor, debido a que están fabricados principalmente por caucho que posee la resistencia y solidez para soportar aire a alta presión, dentro de sus principales funciones se encuentran la de resistir cargas dinámicas que se producen en la aceleración y frenado, permitir la tracción del vehículo sobre cualquier terreno y amortiguar las irregularidades o impactos⁴.

La complejidad de la forma y de las funciones que cada parte del neumático tiene que cumplir, se traduce también en una complejidad de los materiales que lo componen. El principal componente del neumático es el caucho el cual abraza el 80% de su peso aproximadamente, seguido por el acero con un 15% y las fibras textiles u otros componentes con un 5%⁵.

1.1.1 Composición del neumático. Las llantas ó neumáticos, están compuestas de una gran cantidad de materiales que les dan sus características especiales como: resistencias a la carga, posibilidad de manejar alta presión, características de adherencia, entre otros. Los neumáticos de desecho o en desuso resisten diferentes procesos de degradación química o microbiológica debido al proceso de vulcanización que sufrieron en la manufactura del neumático nuevo.

Esto se debe a que el caucho vulcanizado consiste en polímeros de cadena larga (isopreno, butadieno y estireno-butadieno) que se unen con enlaces de azufre y

⁴ MURCIA, Juan Camilo; ROMERO, Andrés Ricardo. Diseño de un sistema primario en el proceso de trituración de llantas usadas desalambradas. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico. Bogotá D. C., Colombia. Fundación Universidad de América, 2016. p. 25-32.

⁵ CASTRO, Guillermo. Materiales y compuestos para la industria del neumático. Departamento de Ingeniería mecánica F.I.U.B.A. Buenos Aires, Argentina. Universidad de Buenos Aires, 2008. p. 2-4.

están protegidos además por antioxidantes y antiozonantes⁶. Puntualmente, los componentes principales de un neumático son: caucho natural (NR), caucho de estireno butadieno (SBR), polibutadieno y caucho butílico (BR), con pequeñas cantidades de aditivos orgánicos e inorgánicos.

La Tabla 1 muestra la composición porcentual de un neumático dada por distintos autores⁷, de acuerdo a sus principales materias primas:

Tabla 1. Composición del neumático con base a sus materias primas.

Referencia	Chen ⁸	US EPA ⁹	Kar ¹⁰
Nombre Compuesto	Porcentaje Masa (%p)		
Caucho Natural	29,59	-	19,53
Caucho Estireno Butadieno	29,59	46,78	43,5
Negro de Humo	29,59	45,59	32,6
Ácido Esteárico	0,59	0,94	-
Óxido de Zinc	2,96	1,40	1,1
Azufre	0,89	1,17	1,1
Resina Fenólica	2,37	-	-
Acéite Aromático	2,37	1,74	2,17
Aditivos y antioxidantes	2,05	2,38	-

Fuente: QUEK, Augustine. Liquefaction of waste tyres by pyrolysis for Oil and chemicals. En: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2013.

Debido a que los neumáticos están compuestos principalmente de hidrocarburos de cadena larga, el reprocesamiento o regeneración de neumáticos para obtener estos hidrocarburos podría proporcionar un camino económicamente viable para tratar este tipo de residuos. La recuperación de los hidrocarburos valiosos de los neumáticos de desecho como materias primas químicas, reduciría la dependencia de los combustibles fósiles, lo que a su vez ayudaría a mitigar las amenazas de disminuir las reservas de combustibles fósiles y contribuye al aprovechamiento y valorización del residuo¹¹.

⁶ BEECHAM, M. Global market review of automotive tyres—forecasts to 2014, Aroq Limited UK, 31 July 2008, Pub ID: JA1867566.

⁷ QUEK, Augustine, *et al.* Liquefaction of waste tyres by pyrolysis for Oil and chemicals- A review. En: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. mayo, 2013. vol. 101, p. 1-16.

⁸ CHEN, F. Studies on the thermal degradation of cis-1,4-polyisoprene. En: Fuel. noviembre, 2002. vol. 81, p. 2071-2077.

⁹ ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA), Estados Unidos. Scrap Tyres, Basic Information. [En Línea]. [Citado 7 abril, 2017] disponible en: (<https://www3.epa.gov/epawaste/conservation/materials/tyres/basic.htm>).

¹⁰ KAR, Y. Catalytic pyrolysis of car tyre waste using expanded perlite. En: Waste Management. agosto, 2011. vol. 31, p. 1772-1782.

¹¹ QUEK. Op. Cit. p. 2-3.

- **Caucho.** El caucho comprende gran parte del porcentaje en masa del neumático, dentro de la composición del caucho se encuentra: estireno, caucho polibutadieno, caucho isobuteno, isopropeno y caucho de isobutenoisopropeno halogenado, compuestos azufrados, resinas fenólicas, hidrocarburos aromáticos, nafténicos y parafínicos.

Este se encuentra en la naturaleza como una dispersión coloidal que contiene aproximadamente el 40% de hidrocarburos en forma de partículas suspendidas en un medio acuoso; este es el látex o savia lechosa de las plantas a partir de las cuales es posible obtener el caucho¹².

- **Aditivos.** En la mayoría de los casos, el caucho bruto se mezcla con numerosas sustancias que modifican sus características. Existen sustancias aditivas que estiran el caucho, pero no lo endurecen materialmente, como el carbonato de calcio y la baritina o sulfato de bario.

Otros aditivos reforzantes que se añaden para dar dureza al producto final, como el negro de humo, óxido de cinc, carbonato de magnesio y ciertas arcillas. Otras sustancias que se emplean son pigmentos, como el óxido de cinc, el litopón y muchos tintes orgánicos, y ablandadores, que se usan cuando el caucho es demasiado rígido para mezclarse con otras sustancias, como son ciertos derivados del petróleo (aceites y ceras), la brea de pino o los ácidos grasos.

El principal agente vulcanizante sigue siendo el azufre. El selenio y el telurio también se emplean, pero generalmente con una elevada proporción de azufre. En la fase de calentamiento del proceso de vulcanización, se mezcla el azufre con el caucho a la vez que con el resto de aditivos. Los agentes aceleradores de la vulcanización que se empleaban en un principio eran solamente óxidos metálicos como el blanco de plomo y la cal. A partir de los descubrimientos de Oenslager se empezaron a utilizar una gran variedad de aminas orgánicas¹³.

1.2 PROCESOS DE TRATAMIENTO Y REUTILIZACIÓN DE NEUMÁTICOS

La clasificación que se muestra a continuación sobre procesos de tratamiento y reutilización de neumáticos, está basada en la naturaleza del proceso, los cuales pueden ser físicos o de químicos¹⁴.

¹² GEISSMAN, T.A. Principios de química orgánica. Barcelona, España. Editorial Reverté, 1974. p. 895-890.

¹³ CASTRO. Op. Cit., p. 29.

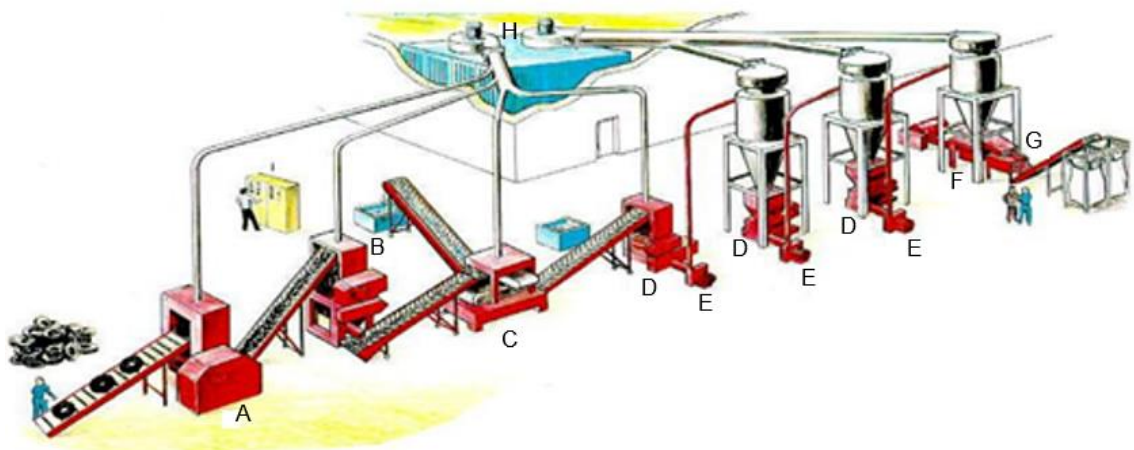
¹⁴ MÉNDEZ, Christian Víctor y SOLANO, Franklin Vinicio. Diseño de triturador de neumáticos usados; capacidad de 1 ton/h, para la empresa municipal de aseo en cuenca (EMAC). Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Mecánico. Cuenca, Ecuador. Universidad Politécnica Salesiana, Facultad de Ingenierías. 2010. p. 55-62.

1.2.1 Procesos físicos-triturado o molido. Se puede triturar o moler un neumático en distintos tamaños, según la aplicación final. No obstante, a menor tamaño, mayor costo del proceso de reducción.

Además, la reducción a menor tamaño consume una gran cantidad de energía, causa desgaste mecánico en el equipo y genera material particulado en la operación¹⁵. A continuación, se presentan dos tipos de procesos de triturado de NFUs que permiten obtener GCR, acero y fibras textiles; difieren con respecto al uso de refrigerantes en las operaciones físicas de trituración y molienda.

- **Triturado a temperatura ambiente.** La Figura 1 muestra una planta de reciclado de neumáticos de desecho a temperatura ambiente, en donde se evidencian múltiples etapas de reducción de tamaño o molido junto a etapas de clasificación o tamizado¹⁶.

Figura 1. Planta de Trituración Mecánica a temperatura ambiente de Neumáticos Usados.



A - Trituradora Preliminar	E - Sistema de Transporte de Neumáticos
B - Granulador	F - Ventisquero
C - Removedor de Acero y Fibras	G - Separación Magnética
D - Molienda Fina	H - Eliminación de Fibras y Polvos

Fuente: RESCHENER, Kurt. Scrap Tyre and Rubber Recycling. A Summary of Prevalent Disposal and Recycling Methods. En: http://www.entyre-engineering.de/Scrap_Tyre_Recycling.pdf. Modificado por autores.

En la etapa A se da un triturado preliminar al neumático hasta reducirlo a trozos de 50mm de largo, posteriormente en la etapa B se reduce aún más el tamaño hasta 10mm por medio de un granulador, en este punto es posible separar las fibras metálicas y textiles en la etapa C por medio de tamices mecánicos o

¹⁵ Ibid. p. 60-61.

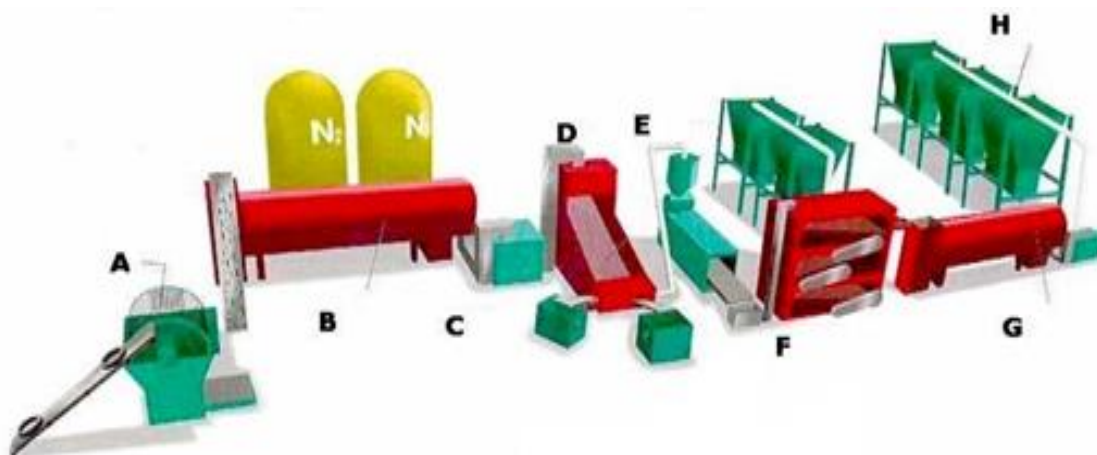
¹⁶ RESCHENER, Kurt. Scrap Tyre and Rubber Recycling. A Summary of Prevalent Disposal and Recycling Methods. [En Línea]. [Citado 7 abril, 2017] disponible en: (http://www.entyre-engineering.de/Scrap_Tyre_Recycling.pdf).

neumáticos junto al uso de imanes; en las etapas siguientes, D a F se dan operaciones de molienda hasta obtener un material particulado muy fino del orden de 0,6-2mm, finalmente se realizan operaciones de separación de fibras metálicas y remoción de polvo y material particulado generado.

- **Molido criogénico de neumáticos.** En comparación al triturado a temperatura ambiente, los neumáticos son enfriados a una temperatura inferior a -80°C utilizando nitrógeno líquido.

Por debajo de esta temperatura el caucho se vuelve tan quebradizo como el vidrio y la reducción de tamaño puede lograrse mediante aplastamiento y molido, con menor demanda energética. Este tipo de reducción de tamaño facilita el molido y la liberación de acero y fibra, lo que se traduce en un producto final más limpio. En la Figura 2 se observa una planta de molido criogénico¹⁷.

Figura 2. Planta de Trituración Criogénica de Neumáticos Usados, mediante Nitrógeno Líquido.



A – Trituradora Preliminar	E – Secadora
B -Túnel de Congelación	F – Clasificador
C – Molino de Martillos	G – Molienda Secundaria
D - Removedor de Acero y Fibras	H - Silos de Almacenamiento de producto

Fuente: RESCHENER, Kurt. Scrap Tyre and Rubber Recycling. A Summary of Prevalent Disposal and Recycling Methods. En: http://www.entyre-engineering.de/Scrap_Tyre_Recycling.pdf. Modificado por autores.

El proceso representado en la Figura 2 se realiza de manera análoga al triturado a temperatura ambiente, salvo que este emplea nitrógeno como medio refrigerante en la operación de molienda y granulado que sufre la llantas entera; el cual reduce la energía requerida para la reducción de tamaño junto a mayor durabilidad mecánica de los equipos involucrados.

¹⁷ Ibid. p. 9-10.

1.2.2 Procesos de regeneración. Es un proceso en el cual, mediante esfuerzos mecánicos y químicos, el caucho del neumático pasa a un estado en que puede mezclarse, procesarse y vulcanizarse nuevamente. El proceso se basa en la desvulcanización, que consiste en el rompimiento de los enlaces intermoleculares de la estructura química, como los enlaces carbono-azufre (C-S) o azufre-azufre (S-S), produciendo así un caucho regenerado con inferiores propiedades mecánicas¹⁸.

1.2.3 Desvulcanización. Se realiza por medio de la reducción del tamaño y la rotura de los enlaces químicos, que se lleva a cabo usando los siguientes tipos de procesos¹⁹:

- **Procesos Químicos.** Las partículas de tamaño reducido se mezclan con reactivos en un reactor a una temperatura aproximada de 180° C y una presión de 15 bar²⁰. Una vez que finaliza la reacción, el producto se pasa por un proceso de filtración y secado para remover los componentes químicos no deseados y se envasa para su comercialización.
- **Proceso ultrasónico.** Las partículas de caucho reducidas se cargan en una tolva y luego se introducen en una extrusora. Ésta empuja y tira mecánicamente de las partículas de caucho, lo que permite que se caliente y ablande el material. A medida que el caucho ablandado es transportado por el interior de la extrusora, el caucho queda expuesto a energía ultrasónica.
- **Procesos microondas.** En este proceso se aplica la energía térmica de forma muy rápida y uniforme sobre el desecho de caucho. No obstante, el caucho vulcanizado que se utiliza en el proceso de microondas debe tener una estructura suficientemente polar como para que pueda absorber la energía de las microondas a la velocidad apropiada para que la desvulcanización sea viable.
- **Procesos biológicos.** Se realiza mezclando caucho finamente molido con un medio que incluye las bacterias adecuadas en un biorreactor en donde se controla la temperatura. Luego se mantiene la lechada a la temperatura y presión indicada durante el período del tratamiento. El tiempo de contacto biológico varía entre diez y varios centenares de días. Posteriormente, el material procesado se filtra para remover los microorganismos.

1.2.4 Pirólisis. Es un proceso de degradación térmica que ocurre en ausencia de oxígeno o en condiciones en que la concentración de oxígeno es suficientemente baja como para no generar combustión u otra reacción de oxidación.

Para el caso de NFUs, este proceso genera los siguientes productos: un residuo sólido que contiene Negro de Humo y otros minerales presentes en el neumático,

¹⁸ MÉNDEZ. Op Cit., p. 55-56.

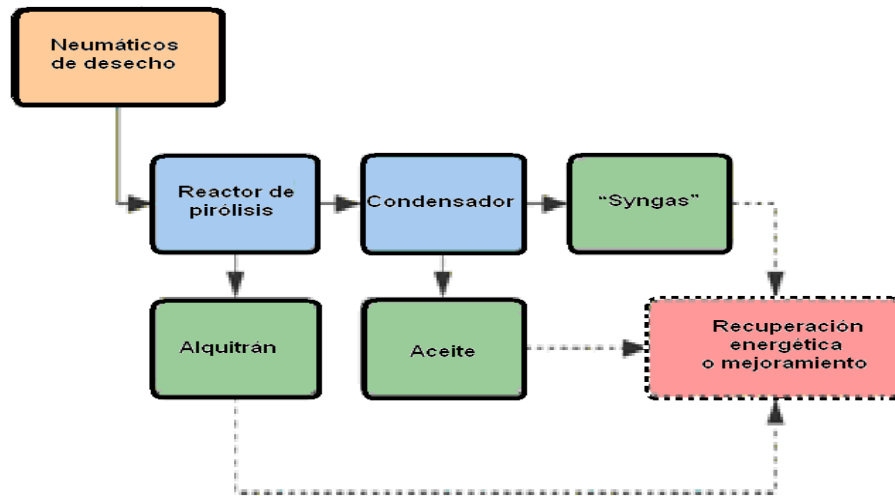
¹⁹ Ibid. p. 56-57.

²⁰ Ibid. p. 58

un líquido que consiste en aceite de alto contenido energético y gas sintético conocido como “syngas”.

A continuación, se muestra un esquema de las operaciones que implica un proceso de tratamiento de pirólisis aplicable a escala piloto o industrial²¹:

Figura 3. Esquema de un proceso Pirólisis de Neumáticos Usados.



Fuente: MÉNDEZ, Christian. Diseño de triturador de neumáticos con capacidad de 1 ton/h para la empresa municipal de aseo en Cuenca (EMAC). Universidad Politécnica Salesiana. Departamento de Ingeniería Mecánica. Cuenca, Ecuador. 2010.

1.2.5 Termólisis. Es un sistema en el que se somete a los materiales de residuos de neumáticos a un calentamiento en un medio libre de oxígeno. Las altas temperaturas y la ausencia de oxígeno tienen el efecto de destruir los enlaces químicos. Aparecen entonces cadenas de hidrocarburos. Es la forma de obtener, de nuevo, los compuestos originales del neumático, por lo que es el método que consigue la recuperación total de los componentes del neumático. Se obtienen metales, carbones e hidrocarburos gaseosos, que pueden volver a las cadenas industriales, ya sea de producción de neumáticos u a otras actividades²².

1.2.6 Incineración. Es un proceso en el que se produce la combustión de los materiales orgánicos del neumático a altas temperaturas en hornos con materiales refractarios de alta calidad, esto debido al elevado poder calorífico del neumático, que oscila entre 32-35 MJ/kg²³. Presenta el inconveniente de que los efluentes gaseosos son muy perjudiciales para la salud humana y para el medio ambiente,

²¹ Ibid. p. 58.

²² Ibid. p. 59.

²³ JUMA, M, *et al.* Pyrolysis and Combustion of scrap Tyre. *En:* Petroleum & Coal. febrero, 2006. vol. 48, no. 1, p. 15-16.

entre estos se encuentran²⁴: monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de zinc, dióxido de azufre, xileno, tolueno, hollín, y hidrocarburos aromáticos policíclicos; por lo tanto, su aplicación es restringida.

1.3 PIRÓLISIS

Inicialmente se presenta un breve contexto histórico acerca del origen del proceso de pirólisis, para posteriormente abarcar fundamentos teóricos sobre la operación del proceso de pirólisis, naturaleza de los productos obtenidos, junto a la descripción de las principales variables del proceso y diferentes tipos de reactor de pirólisis, finalizando con una presentación de los principales esquemas tecnológicos aplicables a plantas industriales de pirólisis.

1.3.1 Contexto histórico. La industria petroquímica moderna, debe mucho a la invención de un proceso de producción de queroseno mediante pirólisis. A mediados de la década de 1840, Abraham Gesner, médico que practicaba en Halifax, Canadá, comenzó a buscar un aceite mineral más limpio para reemplazar el aceite de ballena de fulgincillo utilizado para la iluminación en ese momento²⁵.

Consecuentemente, al destilar cuidadosamente unos cuantos trozos de carbón a 427 °C y purificando el producto con ácido sulfúrico y cal, obtuvo varias onzas de un líquido transparente. Cuando quemó este líquido en una lámpara de aceite, produjo una luz clara y brillante, que era muy superior a la luz ahumada producida por la quema de aceite de ballena; el cual constituía el combustible primario usado en esos tiempos en la Costa Estados Unidos y en Canadá. El doctor Gesner llamó a su combustible: Queroseno²⁶.

Más tarde, en la década de 1850, cuando el crudo comenzó a fluir en Pensilvania y Ontario, Gesner extrajo queroseno de eso también. La invención del queroseno, el primer combustible líquido transportable, provocó una revolución en la iluminación que afectó incluso a las partes más remotas del mundo. También tuvo un gran impacto positivo en la ecología. Por ejemplo, en 1846 más de 730 buques cazaron ballenas para satisfacer la enorme Demanda de aceite de ballena. En pocos años después de la invención del queroseno, la caza se redujo a sólo unos pocos barcos, salvando a las ballenas de una posible extinción.

²⁴ MÉNDEZ. Op. Cit., p. 59.

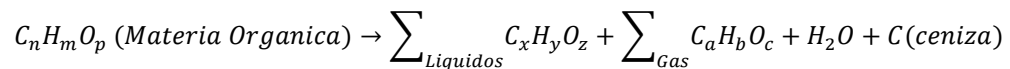
²⁵ BASU, Prabir. Biomass Gasification and Pyrolysis. Practical Design and Theory. Burlington, USA: The Boulevard, 2010. p. 65.

²⁶ Ibid. p. 67.

1.3.2 Fundamentos. La pirólisis consiste en calentar materia orgánica en ausencia de aire u oxígeno a una velocidad especificada o tasa de calentamiento, hasta una temperatura máxima conocida como temperatura de pirólisis, y mantenerla allí durante un tiempo especificado. Los productos de la pirólisis corresponden a: gases condensables y carbón sólido o ceniza; por su parte, el gas condensable puede descomponerse aún más en gases no condensables (CO, CO₂, H₂ y CH₄), líquido y carbón²⁷.

Teóricamente, el proceso de pirólisis puede estar representado la siguiente reacción genérica²⁸, en donde los subíndices representan el número de átomos de cada elemento que constituye tanto la materia prima empleada como los productos obtenidos:

Ecuación 1. Reacción Genérica de Pirólisis.



Fuente: PRABIR, Basu. Biomass Gasification and Pyrolysis. Practical Design and Theory. Burlington, USA. 2010.

Un esquema de una planta de pirólisis, se muestra en la Figura 4, el cual es aplicable para cualquier tipo de materia orgánica en forma sólida; su funcionamiento se describe a continuación²⁹:

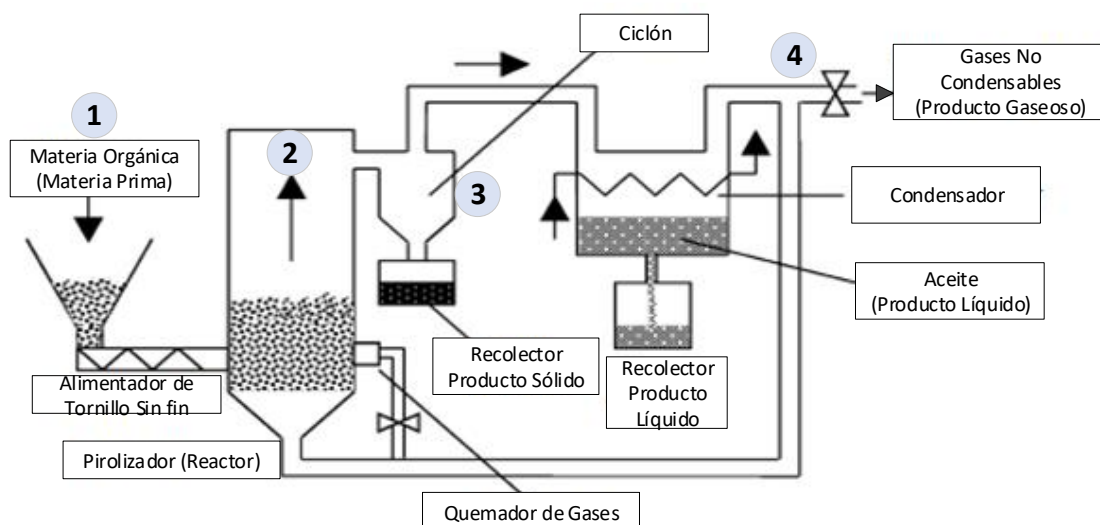
1. La materia orgánica se alimenta a una cámara de pirólisis que contiene sólidos calientes que permiten alcanzar la temperatura de pirólisis, a la cual comienza la descomposición.
2. Los vapores condensables y no condensables liberados salen de la cámara, mientras que el carbón sólido producido permanece parcialmente en la cámara y parcialmente en el gas.
3. El gas se separa del carbón y se enfría después del reactor. El vapor condensable se condensa como aceite de pirólisis; los gases no condensables salen de la cámara como gas producto.
4. La fracción no condensable de gases, puede inyectarse en un quemador para calentar la cámara de pirólisis. De forma similar, el carbón sólido puede recogerse como un producto comercial o quemarse en una cámara separada para producir energía en forma calor, la cual es necesaria para la pirólisis.

²⁷ Ibid. p. 68.

²⁸ Ibid. p. 68-69.

²⁹ Ibid. p. 68-70.

Figura 4. Esquema de una planta de pirólisis de materia orgánica.



Fuente: PRABIR, Basu. **Biomass Gasification and Pyrolysis. Practical Design and Theory.** Burlington, USA. 2010. Modificado por autores.

1.3.3 Caracterización y aplicación de los productos de pirólisis. En esta sección se muestra una descripción de los productos que se obtienen de un proceso de pirólisis a nivel general^{30,31}, cuyo principio implica un desglose o segregación de grandes moléculas complejas en varias moléculas más pequeñas. Su gama de productos se clasifica en tres tipos principales, según su estado físico:

- Fase sólida- residuo sólido (ceniza o carbonilla).
- Fase líquida- líquidos (alquitranes, hidrocarburos y agua).
- Fase gaseosa- gas (gases condensables y no condensables).

La viabilidad de aplicar la pirólisis como método para reutilizar los neumáticos de desecho, depende del mercado existente para los productos obtenidos. Por esta razón, la caracterización de los productos de pirólisis y las posibilidades de su aplicación en otros procesos de la industria es muy importante.

³⁰ JUMA. Op. Cit., p.15-26.

³¹ BASU. Op. Cit., p. 70.

- **Residuo sólido (negro de humo).** Constituye el producto en fase sólida del proceso, que contiene Negro de Humo y otros minerales o componentes inorgánicos presentes en el NFUs³². A su vez, varios estudios han informado de la producción de carbonos y carbón activo de los neumáticos de desecho^{33,34}, estos carbonos activos se han utilizado para adsorber fenoles, tintes y metales básicos, fenoles, butano y gas natural. Las características del carbono (especialmente el área específica) están fuertemente influenciadas por la naturaleza del agente activador (vapor o CO₂) y la temperatura del proceso. Basado en la tecnología actual y en los resultados de la literatura, la activación de los residuos sólidos de neumáticos por debajo de 700 °C parece poco práctica³⁵.

Además, el tamaño de partícula del caucho del neumático tiene influencia sobre la porosidad del carbono resultante, generado por la activación de vapor. Por su parte, el análisis elemental llevado a cabo por Zabaniotou³⁶, muestra que el carbón de pirólisis contiene: 71% en masa de C, 13,3% en masa de O, 5,4% en masa de Fe, 2,8% en masa de S, 2,3% en masa de Zn, 1,3% en masa de Ca y 0,3% en masa de Al.

A continuación, se presenta el análisis próximo y elemental realizado por varios autores para carbón pirolítico junto al valor promedio estimado.

Tabla 2. Análisis Próximo y Elemental del GCR.

Referencia	Tavera ³⁷	Li ³⁸	Casu ³⁹	Martínez ⁴⁰	Roy ⁴¹	Ponderado
Análisis próximo (Base Seca)						
Materia Volátil (%p)	6,94	7	11,08	7,01	7,7	7,95
Cenizas (%p)	13,78	14,77	13,6	14,77	13,1	14
Carbón Fijo (%p)	79,87	78,22	78,42	78,22	79,2	78,79
Análisis Elemental (Sin cenizas)						
C (%p)	92,41	94,83	95,61	94,84	94,20	94,38
N (%p)	0,42	0,62	0,31	0,73	0,30	0,48
H (%p)	0,82	1,71	1,49	1,71	1,20	1,39
S (%p)	2,57	2,83	2,59	2,83	4,20	3,0
O (%p)	3,78	-	-	-	-	0,76

³² JUMA. Op. Cit., p.21.

³⁷ TAVERA, C., *et al.* Production of Oil and Char by Intermediate Pyrolysis of Scrap Tyres: Influence on Yield and Product Characteristics. *En: Chemical Engineering Journal*. 2015. vol. 13, p. 189-200.

³⁸ LI, S.Q. *et al.* Pilot-Scale pyrolysis of scrap tyres in a continuous rotatory kiln reactor. *En: Industrial & Engineering Chemistry Research*. Junio, 2004. vol 43, p. 5141-5143.

³⁹ LI, S.Q. *et al.* Pyrolysis process for the treatment of scrap tries: preliminary experimental results. *En: Waste Management*. Junio, 2002. vol 22, p. 917-923.

⁴⁰ MARTÍNEZ. Op Cit., p. 206-207.

⁴¹ ROY, C. *et al.* Conversion of used tyres to Carbon Black an Oil by pyrolysis. *En: Rubber Recycling*. Taylor & Francis Group, 2005. p. 437-460.

- **Líquidos pirolíticos (fuel Oil).** La fase líquida es el producto más importante del proceso de pirólisis de neumáticos. Laresgoiti⁴², presenta una caracterización detallada de todos los líquidos de pirólisis obtenidos a 300, 400, 500, 600 y 700 °C, a su vez, informa que los líquidos derivados de neumáticos son una mezcla compleja de compuestos orgánicos C6-C24, que contienen una gran cantidad de compuestos aromáticos (53,4-74,8%), algunos compuestos nitrogenados (2,47-3,5%) y algunos compuestos oxigenados (2,29-4,85%).

Cualitativamente, el aceite posee una fracción alifática de alcanos y alquenos junto a una fracción aromática, que contiene los siguientes compuestos⁴³:

- Alcanos: decano, undecano, dodecano, tridecano, octadecano y eicosano.
- Alquenos: propileno, butadieno, 1-penteno, 1,4-pentadieno y octeno.
- Aromáticos: benceno, tolueno, etilbenceno, xileno, estireno, naftaleno, fenantreno y antraceno.

Por su parte, el poder calorífico de los líquidos pirolíticos o GCV “*Gross Calorific Value*” de 42 MJ/kg, es incluso superior al especificado para los aceites de calefacción comerciales, pero el contenido de azufre en porcentaje en masa (1-1,4%) es cercano o ligeramente superior al valor límite permitido ambientalmente en muchos países. En Colombia el valor límite permitido es de 1,5% para uso industrial de aceites tipo combustóleo o del tipo Fuel Oil, en procesos de calentamiento⁴⁴.

En contraste a las demás aplicaciones de combustible, el aceite pirolítico al ser sometido a procesos de destilación, puede producir productos químicos útiles, tales como: benceno, tolueno, xileno y limoneno, dependiendo del tipo de neumáticos de desecho pirolizados y de las condiciones de operación del

³⁸ LI, S.Q. *et al.* Pilot-Scale pyrolysis of scrap tyres in a continuous rotatory kiln reactor. En: Industrial & Engineering Chemistry Research. Junio, 2004. vol 43, p. 5141-5143.

³⁹ LI, S.Q. *et al.* Pyrolysis process for the treatment of scrap tyres: preliminary experimental results. En: Waste Management. Junio, 2002. vol 22, p. 917-923.

⁴⁰ MARTÍNEZ. Op Cit., p. 206-207.

⁴¹ ROY, C. *et al.* Conversion of used tyres to Carbon Black and Oil by pyrolysis. En: Rubber Recycling. Taylor & Francis Group, 2005. p. 437-460.

⁴² LARESGOITI, M.F, *et al.* Characterization of the liquid products obtained in tyre pyrolysis. En: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. Junio, 2004. vol. 71, p. 917-934.

⁴³ GONZÁLEZ, J.F, *et al.* Pyrolysis of automobile tyre waste. Influence of operating variables and kinetics study. En: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. octubre, 2001. vol. 58-59, p. 667-683.

⁴⁴ MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, Colombia. Resolución 898 de 1995. Por el cual se regulan los criterios ambientales de la calidad de los combustibles líquidos y sólidos utilizados en hornos, calderas de uso comercial e industrial y en motores de combustión interna de vehículos automotores. [En Línea]. [Citado 8 abril, 2017]. Disponible en: (http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Normativa/Resoluciones/res_0898_230895.pdf).

proceso de pirólisis⁴⁵. Sin embargo, el aceite de pirólisis se usa principalmente en procesos de combustión para calentamiento⁴⁶, que se lleva a cabo en hornos, calderas, secadores, quemadores etc, lo cual lo cataloga como un crudo o aceite combustible de uso industrial.

- **Gases pirolíticos.** Se refiere a la fracción volátil generada del proceso de degradación térmica, que contiene dos componentes o fracciones: gases condensables (vapor) y gases no condensables (gas primario), los vapores, que están hechos de moléculas más pesadas, se condensan al enfriar con agua de enfriamiento, incrementando el rendimiento de producción de líquido. La mezcla de gas no condensable contiene gases de menor peso molecular como dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano, etano y etileno. Éstos no condensan con el enfriamiento convencional usando agua como refrigerante. Otros gases no condensables producidos por el agrietamiento secundario del vapor se denominan gases secundarios. El producto final de gas no condensable es por lo tanto una mezcla de gases primarios y secundarios, y su rendimiento de producción está ligado a las múltiples configuraciones de operación, que puede tener el proceso.

A modo de ejemplo, Berrueco⁴⁷ obtuvo un rendimiento porcentual de gas del 2,4 - 4,4% en masa, comparado con Chang⁴⁸ del 30-53% en masa. Por otra parte, Laresgoiti⁴⁹, utilizando una autoclave en una atmósfera de nitrógeno a temperaturas entre 400 y 700 ° C, encontró que los gases pirolizados consistieron en CO, CO₂, H₂S e hidrocarburos como CH₄, C₂H₄, C₃H₆ y C₄H₈ y sus derivados insaturados. Berrueco, analizando los gases de pirólisis por cromatografía de gases, encontraron que los principales gases producidos por el proceso de pirólisis son H₂, CO, CO₂ e hidrocarburos: CH₄, C₂H₄, C₃H₆ y C₄H₈. Roy⁵⁰ obtuvo gases por pirólisis al vacío, compuestos principalmente de H₂, CO, CO₂ y unos pocos hidrocarburos gases.

En general, varios autores describieron los principales componentes de los gases de pirólisis como: H₂, H₂S, CO, CO₂, CH₄, C₂H₄, C₃H₆, junto con hidrocarburos ligeros. Los gases pirolíticos pueden ser aprovechados o

⁴⁵ QUEK. Op. Cit., p. 1-3.

⁴⁶ ECOPETROL, Colombia. Catálogo de productos. [En Línea]. [Citado 8 abril, 2017] disponible en: (http://www.ecopetrol.com.co/especiales/Catalogo_de_Productos/pdf/Ecopetrol%20Combustoleo%20VSM-01.pdf.)

⁴⁷ BERRUECO, C, *et al.* Pyrolysis of waste tyres in an atmospheric static-bed *batch* reactor: Analysis of the gases obtained. En: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. Agosto, 2005. vol. 74, p. 245–253.

⁴⁸ CHANG, YU-MIN. On pyrolysis of waste tyre: Degradation rate and product yields. En: Resources, Conservation and Recycling. agosto, 1996. vol. 17, p. 125-139.

⁴⁹ LARESGOITI, M.F, *et al.* Chromatographic analysis of the gases obtained in tyre pyrolysis. En: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. mayo, 2000. vol. 55, p. 43-54.

⁵⁰ ROY, C *et al.* Recycling of scrap tyres to Oil and carbon black by vacuum pyrolysis. En: Resources, Conservation and Recycling. septiembre, 1990. vol. 4, p. 203-213.

realimentados al proceso para aprovechar su poder energético en procesos de calentamiento, como el reactor.

1.3.4 Variables que afectan el proceso de pirólisis. Hay gran cantidad de variaciones en las condiciones de operación en que se lleva a cabo la pirólisis de los residuos de neumáticos para la obtención de los productos deseados. Los parámetros o variables más influyentes son: temperatura, velocidad de calentamiento, tamaño de partícula del neumático, tiempo de residencia, presión de operación rendimiento de reacción.

Las variables antes mencionadas son variables de diseño, debido a que son fijadas por los investigadores y según ellas se obtienen rendimientos y resultados diferentes.

A continuación, se describen las variables antes mencionadas en función de su influencia para un proceso de pirólisis térmica tipo *batch* llevado a cabo en un reactor de horno rotatorio⁵¹:

- **Temperatura.** Es la variable de mayor importancia en el proceso, debido a que permite la degradación térmica del material a pirolizar y garantiza la estabilidad y rendimiento esperado de los productos de interés⁵². Dicha degradación térmica ha sido estudiada por análisis termogravimétrico, en donde se identifica que valores o rango de temperaturas logran pérdidas de peso apreciables en el material a pirolizar⁵³.

Para el caso de llantas, varios autores^{54,55,56} reportan pérdidas de peso del 63% aproximadamente entre 470°C y 500°C, a temperaturas superiores como 800°C reportaron pérdidas de peso despreciables; a su vez, identificaron tres zonas de pérdida de peso apreciables que se dan en los siguientes rangos de temperatura: 100°C y 250 °C en donde se da el secado y descomposición de aditivos y plastificantes, 250°C y 350°C en donde se descompone el caucho

⁵¹ FONSECA, William. Evaluación de un reactor de Lecho Fluidizado en el proceso de pirólisis catalítica usando desecho de caucho de llanta. Trabajo de grado para optar al título de Master en Ingeniería Química. Bogotá D. C.: Universidad de los Andes, 2016. p. 15-17.

⁵² MESA, María Paula; ORTÍZ, Carol Ivonne. Evaluación del proceso de pirólisis para la producción de diésel a nivel de laboratorio a partir de residuos plásticos de industrias de alimentos. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Bogotá D. C.: Fundación Universidad de América, 2016. p. 33.

⁵³ ACOSTA, R., *et al.* Estudio preliminar de la producción de aceite y carbón mediante pirólisis intermedia de caucho de llantas usadas. En: Revista de Investigación Universidad del Quindío. agosto, 2013. vol. 24, p. 139-141.

⁵⁴ *Ibid.* p. 141.

⁵⁵ BETANCUR, M., *et al.* Production of activated carbon by waste tyre thermochemical degradation with CO₂. En: Journal of Hazardous Materials. septiembre, 2009. vol. 168, p. 882-887.

⁵⁶ EDUARD, L., *et al.* Tyre char preparation from waste tyre rubber for dye removal from effluents. En: Journal of Hazardous Materials. marzo, 2010. vol. 175, p. 151-158.

natural (NR), y entre 350°C y 470°C en donde se descomponen el caucho estireno y caucho estireno- butadieno (BR y SBR).

Con respecto a su influencia sobre los productos, se da el siguiente comportamiento⁵⁷: el rendimiento de producción de la fase gaseosa y líquida se incrementa con la temperatura dadas las reacciones más fuertes de craqueo térmico, pero a temperaturas superiores de 500°C los rendimientos de productos líquido disminuyen, la fase sólida presenta un incremento en el rendimiento hasta los 600°C y disminuye conforme disminuye la temperatura.

- **Velocidad de calentamiento.** También conocida como tasa o rampa de calentamiento expresada en °C/min, su influencia sobre el rendimiento de los productos es mínima cuando se tiene establecida la temperatura de operación, es decir cuando la operación es de carácter isotérmica, De manera que entre más rápido se caliente la materia prima a una temperatura dada, se produce menor fracción sólida y mayor fracción líquida y gaseosa⁵⁸.
- **Tamaño de partícula.** Hace referencia al diámetro de partícula o tamaño promedio de la materia prima, en procesos termoquímicos se asumen por lo general que a menor tamaño de partícula se presentan comportamientos isotérmicos y no se dan limitaciones de transferencia de masa, es decir que no existen gradientes de temperatura o masa dentro del material⁵⁹. En el caso de los NFUs para tamaños de partícula inferiores a 5mm, el proceso de pirólisis está gobernado por la reacción química de degradación térmica⁶⁰; de manera que las limitaciones adscritas a fenómenos de transferencia de calor y masa pueden obviarse o despreciarse.
- **Tiempo de residencia.** Corresponde al tiempo de retención o al tiempo de reacción de la materia prima dentro del reactor, es la segunda variable de mayor relevancia en el proceso debido a que su magnitud determina el tamaño de los equipos y los servicios asociados a los mismos⁶¹.

Además, su influencia sobre el rendimiento de los productos está ligada al tipo de reactor seleccionado para la pirólisis, que para el caso de reactores del tipo horno rotatorio de tipo industrial con capacidades de procesamiento de 5 y 10 ton/*batch* pueden llegar a ser de 24 hasta 30horas⁶², los cuales dependen a su vez de la naturaleza de la materia prima.

⁵⁷ SUHANYA, M. *et al.* Recovery of Oil from Waste Tyres using Pyrolysis Method: A Review. En: International Journal of Research in Engineering & Technology. Julio, 2013. vol. 1, no. 2, p. 81-85.

⁵⁸ *Ibid.* p. 84.

⁵⁹ MARTÍNEZ, J., *et al.* Waste tyre pyrolysis-A review. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. vol. 23, p. 198-199.

⁶⁰ GONZÁLEZ. *Op. Cit.*, p. 675.

⁶¹ MARTÍNEZ. *Op. Cit.*, p. 201.

⁶² CALDERÓN, Felipe S. La Producción de Combustibles Vehiculares a partir de Plástico de desecho. 1 ed. Dr. Calderón Laboratorios. Bogotá D.C., Colombia, 2016. p. 163-165.

- **Presión de operación.** La presión dentro del sistema de reacción afecta la naturaleza de los productos de la siguiente manera⁶³: altas presiones promueven la formación de un producto líquido más viscoso, así como la tendencia a reacciones secundarias indeseadas debido al mayor tiempo de residencia de la fracción volátil formada, contrario a trabajar a bajas presiones o al vacío en donde el tiempo de residencia de la fracción volátil es muy corto y se garantiza mayores rendimientos de la fase líquida y gaseosa.

No obstante ambos extremos de operaciones implican mayores costos en la construcción y operación del proceso de pirólisis, lo cual induce a la pirólisis a presiones moderadas o atmosféricas como la mejor alternativa en este tipo de procesos.

- **Rendimiento de reacción.** Es un índice de producción para cada producto de interés del proceso de pirólisis, el cual se expresa en términos de la masa producida de cada producto con respecto a la masa alimentada inicialmente de materia prima⁶⁴. Es considerada la variable de respuesta del proceso y es netamente dependiente de las variables de operación antes descritas.

1.3.5 Tipos de pirólisis. El proceso de pirólisis se puede llevar a cabo de diferentes maneras dependiendo la combinación de las condiciones de operación, como lo son: tasa de calentamiento, ambiente de reacción, tiempo de retención, temperatura máxima alcanzada, uso o no catalizador y forma de calentamiento. Lo anterior sumado a la naturaleza del reactor empleado, confiere diferentes tipos de pirólisis posibles a implementar, los cuales se presentan en la Tabla 3⁶⁵:

Tabla 3. Descripción de los Tipos de Pirólisis según las condiciones de operación manejadas.

Características de algunos tipos de pirólisis				
Proceso de Pirólisis	Tiempo de Residencia	Tasa de Calentamiento	Temperatura Final (°C)	Productos
Carbonización	Días	Muy Baja	400	Carbón
Convencional	5 – 30 Minutos	Baja	700	Ceniza, Aceite Pirolítco, Gas
Rápida	< 2 Segundos	Muy Alta	500	Aceite Pirolítco
Flash	< 1 Segundos	Alta	<650	Aceite Pirolítco, Químicos, Gas
Ultra-Rápida	< 0,5 Segundos	Muy Alta	1000	Químicos, Gas
Al Vacío	2- 30 Segundos	Media	400	Aceite Pirolítco
Hidropirólisis	< 10 Segundos	Alta	<500	Aceite Pirolítco
Metano - Pirólisis	< 10 Segundos	Alta	>700	Químicos

Fuente: PRABIR, Basu. Biomass Gasification and Pyrolysis. Practical Design and Theory. Burlington, USA 2010.

⁶³ MARTÍNEZ. Op. Cit., p. 198.

⁶⁴ FONSECA. Op. Cit., p. 15-18.

⁶⁵ BASU. Op. Cit., p. 72.

Independientemente de las condiciones seleccionadas para el proceso -Ver Tabla 3- junto a la naturaleza del reactor, la pirólisis es un proceso de degradación térmica en ausencia de oxígeno que demanda energía en forma de calor para llevar a cabo las reacciones de craqueo térmico; por lo cual, la forma en cómo se aporta el calor al proceso la divide en dos grandes tipos⁶⁶:

- **Calentamiento directo.** La transferencia de calor se da por convección y conducción, en donde la energía es proporcionada directamente por gases de combustión o sólidos inertes precalentados que entran en contacto directo con la materia prima a procesar.
- **Calentamiento indirecto.** También conocido como calentamiento alotérmico, en donde la transferencia de calor se da por conducción y radiación de las paredes del reactor, la fuente de calentamiento más usada son gases de combustión provenientes de un quemador o empleando sólidos inertes precalentados en cámaras de combustión.
Cada tipo de calentamiento tiene sus ventajas y desventajas desde el punto de vista de la operación y de la forma en cómo se separan y obtienen los productos de interés; en la Tabla 4 se presenta una comparación entre ambos tipos de calentamiento⁶⁷:

Tabla 4. Comparación de los Tipos de Pirólisis según el tipo de calentamiento.

Calentamiento Directo	Calentamiento Indirecto
Mejor eficiencia de la transmisión de calor.	Se precisan Intercambiadores de Calor.
No se puede independizar la temperatura de pirólisis de la de combustión.	Las temperaturas de pirólisis o operación se respetan o pueden controlar.
Los gases de pirólisis o la fracción volátil generada se mezclan con los gases de combustión.	La fracción volátil generada se separa en el reactor de los gases de combustión.
El revestimiento interno del reactor se ha de diseñar para soportar temperaturas de 1250°C.	El revestimiento interno del reactor se ha de diseñar para soportar temperaturas de 750°C.
El material del reactor sufre efectos de dilatación térmica apreciable debido a las altas temperaturas.	El material del reactor no presenta grandes dilataciones, a causa de la temperatura de operación.

Fuente: ELÍAS, Xavier. La Pirólisis. En: Tratamiento y valorización energética de residuos. 1 ed. Ediciones Díaz de Santos. Madrid, España. 2012.

⁶⁶ ELÍAS, Xavier. La Pirólisis. En: Tratamiento y valorización energética de residuos. 1 ed. Ediciones Díaz de Santos. Madrid, España. 2012. p. 478-481.

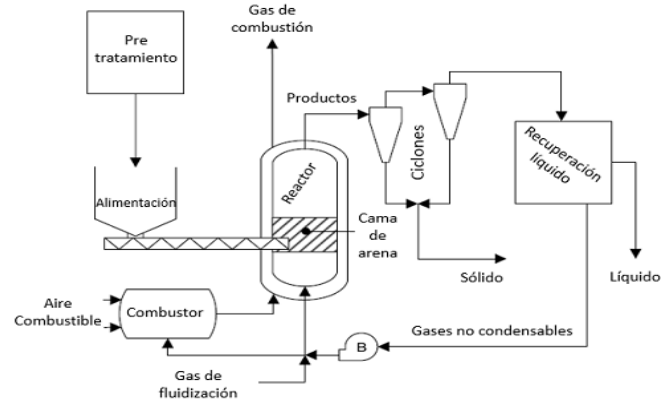
⁶⁷ Ibid. p. 480.

1.3.6 Tipos de reactores de pirólisis. La etapa de reacción donde se lleva a cabo el proceso de pirólisis puede llevarse a cabo usando diferentes tecnologías que dependen de la naturaleza del lecho del reactor y aspectos prácticos de su operación⁶⁸, en seguida se presentan los principales tipos de reactores según la literatura y por su aplicabilidad industrial:

- **Reactor de lecho fluidizado.** Es el reactor más estudiado y desarrollado debido a su amplia aplicabilidad en la industria petrolera para reacciones de cracking catalítico, tiene una configuración vertical y en procesos de pirólisis la materia prima es alimentada por la parte superior del reactor para que al llegar al fondo entre en contacto con el medio fluidizado de transferencia de calor, el cual es por lo general arena u otro sólido inerte⁶⁹. El medio fluidizado cumple la función de mejorar la transferencia de calor o actuar como catalizador del proceso, además su calentamiento puede ser directo o de forma indirecto por medio del Gas de Fluidización que es de carácter inerte con respecto a la materia prima o sustrato a descomponer térmicamente.

En la Figura 5 se presenta un esquema para un proceso de pirólisis que emplea un reactor de lecho fluidizado⁷⁰, en donde se observan operaciones de separación características de este reactor como lo es el Ciclón, que separa la corriente volátil y el material sólido en suspensión que contenga para después continuar con la etapa de condensación que separa el producto líquido y gaseoso:

Figura 5. Esquema de un proceso de pirólisis con reactor de lecho fluidizado con calentamiento indirecto, tolva de alimentación, ciclón y condensador de líquidos.



Fuente: FONSECA, William. Evaluación de un reactor de Lecho Fluidizado en el proceso de pirólisis catalítica usando desecho de caucho de llanta. Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería Química. Bogotá D. C., Colombia. 2016.

⁶⁸ CALDERÓN. Op. Cit., p. 38-44.

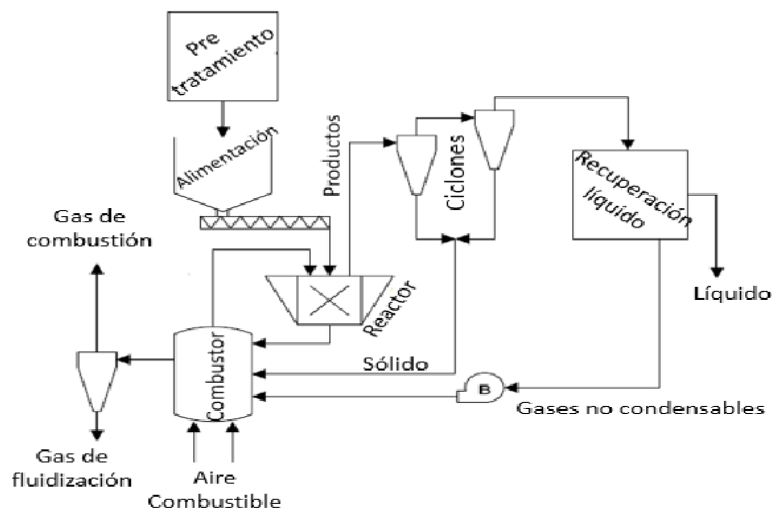
⁶⁹ FONSECA. Op. Cit., p. 23.

⁷⁰ Ibid. p. 24.

- **Reactor de cono rotatorio.** Consta de un recipiente de reacción vertical donde un lecho o cama de materia prima está en contacto directo con un lecho de calentamiento de arena u otro sólido inerte, donde se mezcla mecánicamente aprovechando el momento angular del cono⁷¹. Esto reduce el consumo de Gas de Fluidización y mejora la transferencia de calor, su calentamiento también puede ser directo o indirecto; sin embargo, no ha sido escalado a escala industrial y su uso se ha restringido a plantas piloto⁷².

En la Figura 6 se presenta un esquema para un proceso de pirólisis que emplea un reactor de cono rotatorio⁷³, en donde sumado al Ciclón se observa una cámara de combustión que permite aprovechar tanto los Gases Pirolíticos o Gases no Condensable como el producto sólido en el calentamiento del proceso.

Figura 6. Esquema de un proceso de pirólisis con reactor de cono rotatorio con calentamiento indirecto, tolva de alimentación, ciclón y condensador de líquidos.



Fuente: FONSECA, William. Evaluación de un reactor de Lecho Fluidizado en el proceso de pirólisis catalítica usando desecho de caucho de llanta. Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería Química. Bogotá D. C., Colombia. 2016.

⁷¹ SÁNCHEZ, Daniel Jose. Synthetic diesel production through catalytic pyrolysis of biomass-waste tyre mixtures. Trabajo de grado Maestría en Ciencias en Ingeniería Química. Bogotá D. C.: Universidad de los Andes, 2015. p. 9-10.

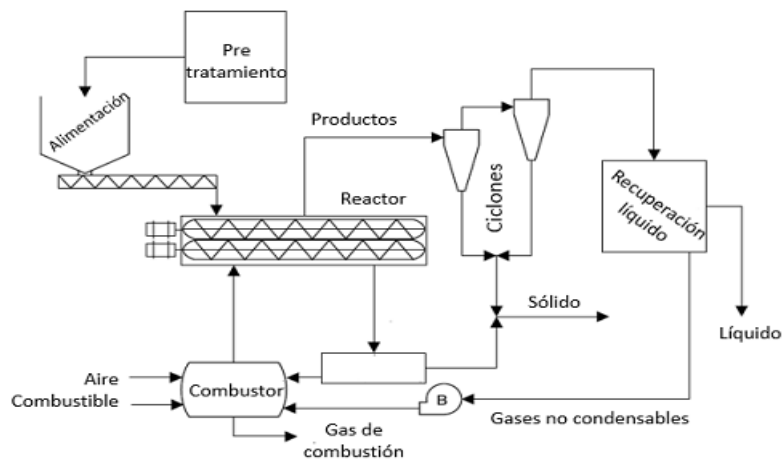
⁷² FONSECA. Op. Cit.,p. 24.

⁷³ Ibid. p. 24.

- **Reactor de tornillo sin fin.** Su funcionamiento es análogo al esquema de funcionamiento para un reactor de cono rotatorio -Ver Figura 6-, en donde la materia prima entra en contacto directo con el lecho de calentamiento y se mezcla el conjunto en un recipiente horizontal por medio de un tornillo sin fin⁷⁴. Este no usa Gas de Fluidización y su calentamiento es de tipo indirecto por medio de una chaqueta de calentamiento con gases de combustión.

En la Figura 7 se presenta un esquema para un proceso de pirólisis que emplea un reactor de tornillo sin fin⁷⁵, en donde aún se requiere el Ciclón para separar material sólido suspendido de la corriente efluente del reactor para posteriormente recuperar el producto en fase líquida por medio de un proceso de condensación que permite separar el Gas Pirolítico o no condensable para su posterior quema en el combustor que provee la energía necesaria para el reactor de tornillo sin fin por medio de la chaqueta de calentamiento.

Figura 7. Esquema de un proceso de pirólisis con reactor de tornillo sin fin con calentamiento indirecto, tolva de alimentación, colector de sólidos, ciclón y condensador de líquidos.



Fuente: FONSECA, William. Evaluación de un reactor de Lecho Fluidizado en el proceso de pirólisis catalítica usando desecho de caucho de llanta. Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería Química. Bogotá D. C., Colombia. 2016.

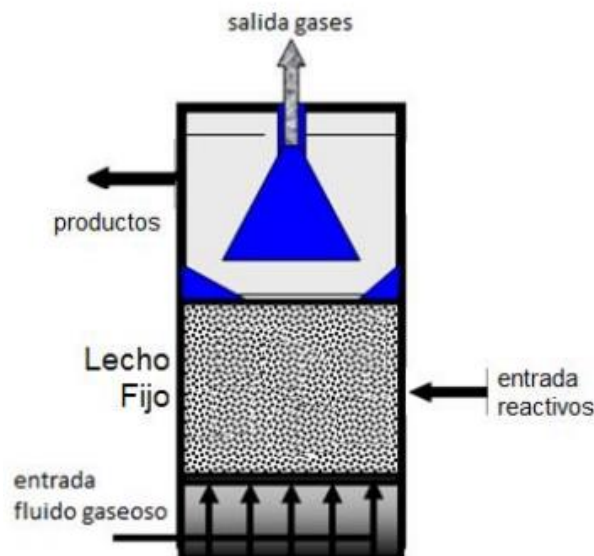
⁷⁴ Ibid. p. 25.

⁷⁵ Ibid. p. 26.

- **Reactor de lecho fijo.** A diferencia de un reactor de lecho fluidizado, son recipientes verticales en donde se calienta únicamente el fondo del reactor lo que genera un perfil térmico a lo largo de las paredes del reactor⁷⁶, su calentamiento es en la mayoría de los casos indirecto para evitar fluidización en el lecho fijo, aunque en algunos casos emplea una corriente de gas inerte de arrastre que extraiga la fracción volátil generada para evitar fenómenos de reflujo de condensados y reacciones de craqueo secundarias indeseadas⁷⁷.

Desde el punto de vista mecánico son de gran versatilidad y simplicidad de construcción; no obstante, tiene grandes desventajas operacionales, tales como: limitada transferencia de calor y masa, adhesión de material sólido o coque en las paredes del reactor, deformación del material de construcción del cuerpo del reactor y la limpieza y remoción del producto en fase sólida. En la Figura 8 se presenta el esquema de un reactor de lecho fijo⁷⁸:

Figura 8. Esquema de un reactor de Lecho Fijo con separador de gases.



Fuente: OBANDO, Gabriel. Condiciones de Diseño de un Reactor de Pirólisis a escala de laboratorio para la obtención de Biocarbón a partir de Residuos Orgánicos Sólidos. Universidad de Manizales. Manizales, Colombia. 2015.

⁷⁶ CALDERÓN. Op. Cit., p. 38.

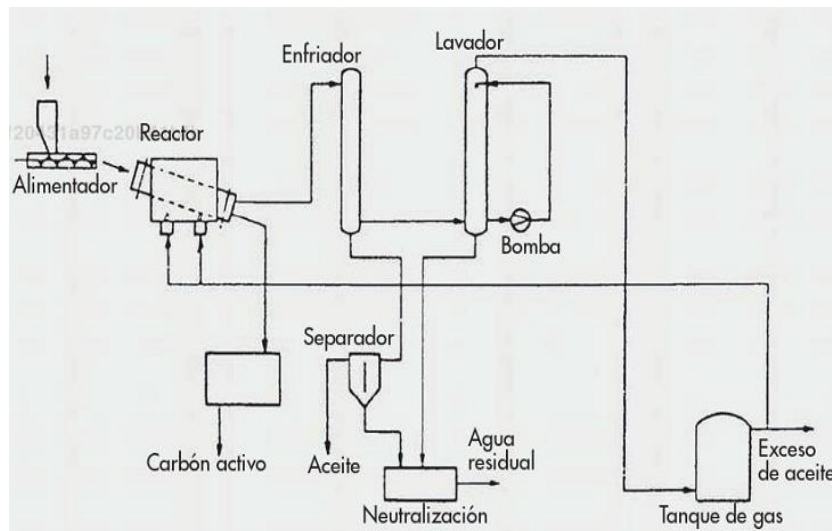
⁷⁷ Ibid. p. 44-45.

⁷⁸ OBANDO, Gabriel. Condiciones de Diseño de un Reactor de Pirólisis a escala de laboratorio para la obtención de Biocarbón a partir de Residuos Orgánicos Sólidos. Trabajo de Grado Magister en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Manizales, Colombia. Universidad de Manizales, 2015. p. 14-23.

- **Reactores de horno rotatorio.** Es el tipo de reactor más usado industrialmente debido a su gran similitud con los hornos rotatorios de la industria cementera⁷⁹, aunque en procesos de pirólisis su calentamiento se da de manera indirecta con gases de combustión para prevenir fluidización de la materia prima y operaciones de separación de material sólido suspendido en la fracción volátil. La configuración del reactor es totalmente horizontal o horizontal con una leve inclinación, lo cual permite operar el proceso de manera discontinua o continua respectivamente.

Dada la rotación radial que tienen sobre su propio eje, se garantiza una mayor área de transferencia de calor y mayores coeficientes de transferencia de masa y calor dentro de la masa de reacción debido a la remoción continua del material en las paredes internas del reactor. Además, este tipo de reactores permite separar el producto sólido de la fracción volátil en el mismo reactor, lo cual evita operaciones de separación como ciclones. En la Figura 9 se presenta un esquema para un proceso de pirólisis que emplea un reactor de horno rotatorio, que opera de forma continua⁸⁰:

Figura 9. Proceso de pirólisis con reactor de horno rotatorio inclinado de operación continua.



Fuente: ELÍAS, Xavier. La Pirólisis. En: Tratamiento y valorización energética de residuos. 1 ed. Ediciones Díaz de Santos. Madrid, España. 2012.

⁷⁹ SÁNCHEZ. Op Cit., p. 14.

⁸⁰ ELÍAS. Op Cit., p. 483.

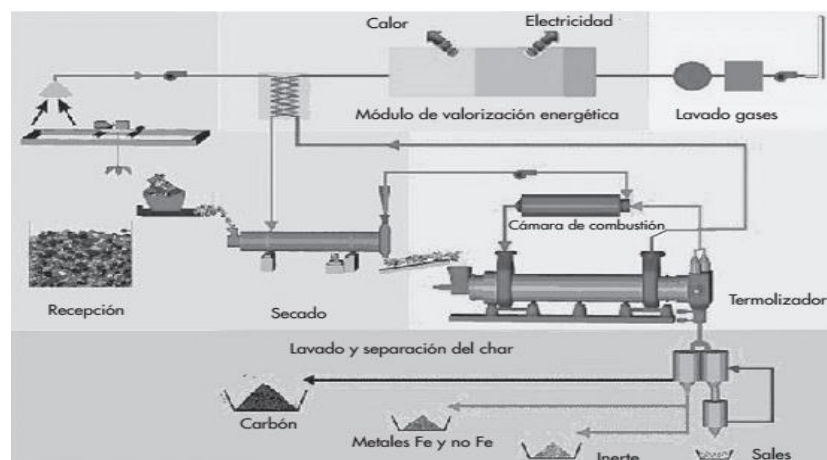
1.3.7 Esquemas tecnológicos de pirólisis. En seguida se presentan los principales proceso y tecnologías de pirólisis de plantas piloto e industriales para el aprovechamiento térmico de residuos por medio de pirólisis, enfocados a la obtención del aceite pirolítico y producto en fase sólida⁸¹:

- **Proceso Babcock KraussMaffei Industrieanlagen GmbH (BKMI).** Es una tecnología basada en hornos rotatorios calentados indirectamente con gases de combustión generados en una cámara de combustión, en donde la temperatura de pirólisis es de 470°C a 500°C, en donde los gases pirolíticos efluentes del reactor se pasan por un ciclón para eliminar sólidos en suspensión y ser quemados con 30% o 50% de exceso de aire, los condensables posteriormente se enfrían en un condensador en húmedo con agua.

Debido a que se queman totalmente los gases pirolíticos, el proceso se integra en centrales termoeléctricas en la generación de vapor térmico o de servicio⁸².

- **Proceso EDDITH®.** Es una tecnología adscrita a la empresa Thide Enviromental S.A de Francia, comprenden un secador rotario con aire caliente, sumado a un reactor de horno rotatorio horizontal calentado indirectamente con gases de combustión a temperaturas promedio de 500°C. No posee ciclones o separadores de material sólido suspendido y posee un módulo de valorización energética para los gases de pirólisis. La Figura 10 presenta el esquema del proceso EDDITH®⁸³.

Figura 10. Esquema del Proceso EDDITH®.



Fuente: ELÍAS, Xavier. La Pirólisis. En: Tratamiento y valorización energética de residuos. 1 ed. Ediciones Díaz de Santos. Madrid, España. 2012.

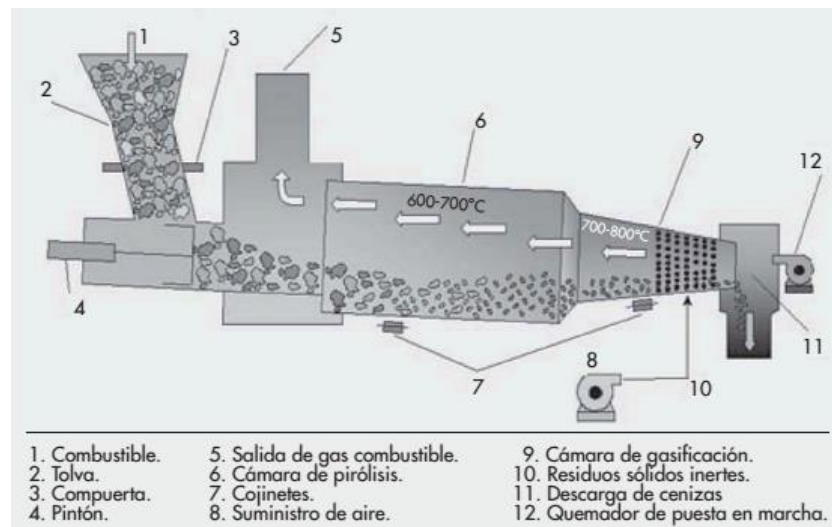
⁸¹ Ibid. p. 513-525.

⁸² Ibid. p. 513-514.

⁸³ Ibid. p. 514.

- Proceso SERPAC.** Conocido como proceso P.I.T Pyroflam de BS Engineering S.A. de la empresa SERPAC Enviromental de Francia, se lleva acabo en un reactor inclinado dividido en dos cámaras de geometría cilíndrica y cónica interconectadas entres sí. La materia prima es alimentada mediante un pistón a la cámara de pirólisis que opera en temperaturas de 600°C a 700°C, en donde se degrada el material produciendo el gas de pirólisis que abandona el reactor o tambor rotatorio. El calentamiento el sistema es directo con gas de gasificación obtenido de la materia prima que se quema en presencia de aire suministrado al sistema. En la Figura 11 se presenta un esquema del proceso SERPAC⁸⁴:

Figura 11. Esquema del proceso SERPAC.



Fuente: ELÍAS, Xavier. La Pirólisis. En: Tratamiento y valorización energética de residuos. 1 ed. Ediciones Díaz de Santos. Madrid, España. 2012.

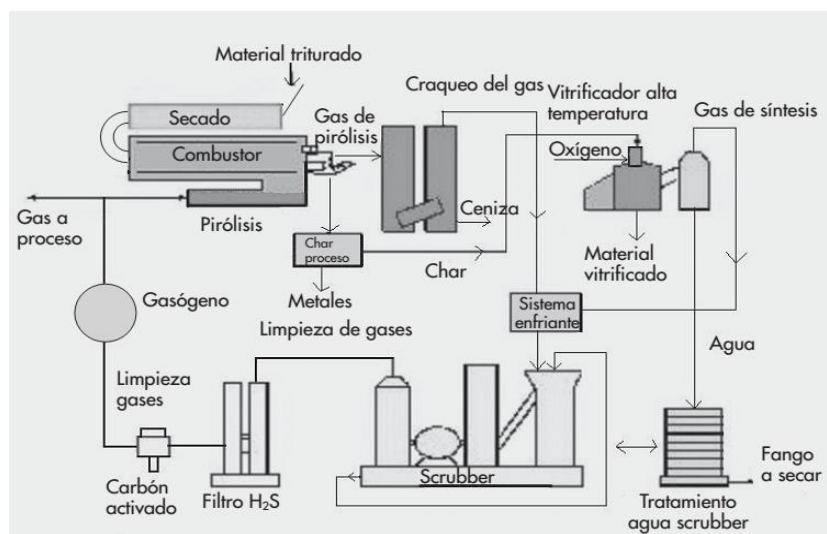
- Proceso PKA.** La tecnología PKA Umwelttechnik GmbH & Co. KG, incorpora pirólisis y gasificación, el proceso inicia con pirólisis térmica a unas temperaturas entre 500°C A 550°C empleando tiempos de residencia 45 a 60 minutos dentro de un reactor de horno rotatorio calentado indirectamente; la fracción volátil generada se transporta a una cámara de craqueo que opera a 1000°C para obtener una corriente gaseosa homogénea rica en H₂ y CO (Gas de Síntesis).

El residuo sólido se transporta a un módulo de gasificación que opera a temperaturas de 1400°C a 1500°C hasta obtener un gas combustible y la escoria vitrificada; por su parte la corriente homogénea de gas se enfría súbitamente con agua antes de ser utilizado en plantas de energía eléctrica con motores a gas. El proceso PKA es aplicable tanto para residuos de

⁸⁴ Ibid. p. 514.

automóvil, neumáticos en desuso ó residuos de plástico, en donde el producto de interés es el gas de síntesis obtenido de la pirólisis y gasificación de la respectiva materia prima. En la Figura 12 se presenta un esquema del proceso PKA⁸⁵:

Figura 12. Esquema del proceso PKA^{86,87}.



Fuente: ELÍAS, Xavier. La Pirólisis. En: Tratamiento y valorización energética de residuos. 1 ed. Ediciones Díaz de Santos. Madrid, España. 2012.

1.3.8 Planta de pirólisis de horno rotatorio. Acorde a los esquemas tecnológicos presentados para el aprovechamiento energético de residuos sólidos por medio de pirólisis, comercialmente se fabrican plantas de procesamiento a nivel industrial con base a los fundamentos teóricos y técnicos del tipo de pirólisis, tipo de reactor, condiciones de operación etc.

A continuación, en la Figura 13 se muestra el diagrama de bloques de una planta de pirólisis industrial para el tratamiento de neumáticos usados, en la cual es posible alimentar el neumático entero sin ningún tipo de tratamiento físico previo o el gránulo del caucho de neumático molido⁸⁸. Vale la pena aclarar que el proceso de pirólisis, únicamente ocurre en la unidad de proceso reactiva o reactor de horno rotatorio, la cual está integrada a operaciones de separación o condensadores en seco con agua con el fin de obtener los productos deseados, es decir el producto en fase líquida o Fuel Oil y el producto residual en fase sólida o Negro de Humo.

⁸⁵ Ibid. p. 516.

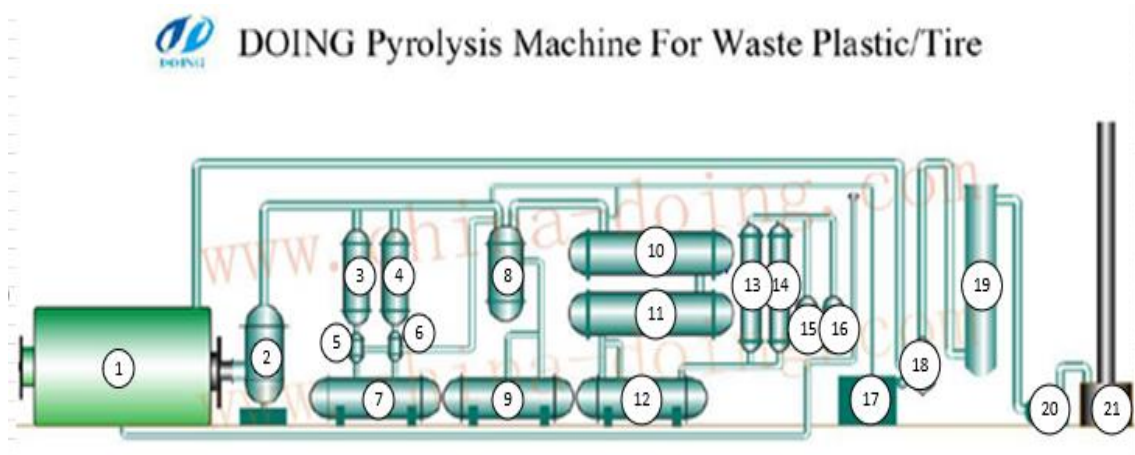
⁸⁶ El Scrubber representa un lavador de gases que retiene gases contaminantes y material particulado de efluentes gaseosos.

⁸⁷ Char corresponde al producto en fase sólida obtenido del proceso de pirólisis.

⁸⁸ DOING. Pyrolysis Machine Products. Pyrolysis Plant. [En Línea]. [Citado 9 abril, 2017] disponible en: (<http://www.china-doing.com>)

En la Figura 13, se observa que la planta de pirólisis abarca una serie de equipos y maquinaria, como: reactor, cámara catalítica, condensadores verticales, tanques de almacenamiento etc.

Figura 13. Esquema de una Planta de Pirólisis una capacidad de procesamiento de 10 ton/batch, para el aprovechamiento de Neumáticos Usados.



1	Reactor Horno Rotatorio	11	Condensador Horizontal B
2	Cámara Catalítica	12	Tanque Almacenamiento Corte de Aceite Liviano
3	Condensador Vertical A	13	Condensador Vertical C
4	Condensador Vertical B	14	Condensador Vertical D
5	Separador Gas-Líquido A	15	Dispositivo de Sello de Agua A
6	Separador Gas-Líquido B	16	Dispositivo de Sello de Agua B
7	Tanque Almacenamiento Corte de Aceite Pesado	17	Sistema de Vacío
8	Condensador en Húmedo	18	Filtro removedor de material suspendido
9	Tanque Almacenamiento Corte de Aceite Mediano	19	Torre de Lavado de Gases de Combustión Efluentes
10	Condensador Horizontal A	20 - 21	Ventilador- Chimenea

Fuente: Henan Doing Mechanical Equipment Co. China 2017. Modificado por Autores.

El proceso inicia en la unidad de reacción de horno rotatorio, en donde se carga la materia prima con la granulometría deseada, en este caso son NFUs que se pueden cargar enteros o en forma de gránulos al reactor de horno rotario ya sea de forma manual o mecánica empleando cintas transportadoras o brazos hidráulicos. En esta unidad se da el proceso de descomposición térmica o craqueo térmico, en donde se produce la fracción volátil y se separa la fracción sólida remanente, por tanto se evita el uso de ciclones o equipos para depurar la fracción volátil de sólidos en suspensión.

Además, su calentamiento es de tipo indirecto con gases de combustión provenientes de un quemador el cual se construye en la base del reactor que opera tanto con combustibles sólidos (carbón mineral, biomasa etc.), líquidos (gas licuado de petróleo, kerosene etc.) y gaseosos (gas natural); no obstante, este quemador quema cierta fracción de los gases no condensables generados por la planta, permitiendo así la sostenibilidad energética del calentamiento del reactor. Posteriormente, existen operaciones de separación que abarcan intercambiadores de calor y separadores gas-líquido; que permiten obtener la fracción líquida o Fuel Oil y la fracción no condensable o gases no condensables. Puntualmente existen tres tipos de intercambiadores de calor o condensadores, usados en este tipo de procesos: verticales o de tubos concéntricos, horizontales o de tubos y coraza y por contacto directo o vía húmeda; en donde los verticales y horizontales son de contacto indirecto o vía seca que emplean como fluido de servicio agua de enfriamiento.

Como se aprecia en la Figura 13, se pueden obtener varios cortes de aceite o fracción líquida según los diferentes puntos de ebullición pertenecientes a los compuestos del aceite, lo cual implica varias etapas o equipos de separación gas-líquido; no obstante, se puede realizar una sola etapa de condensación para obtener la fracción líquida o producto de interés como lo es el Fuel Oil. Finalmente, se observan operaciones de depuración de los gases de combustión efluentes del reactor de horno rotatorio, que retienen material suspendido u otros contaminantes gaseosos como: monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de azufre y nitrógeno.

2. ANÁLISIS DE MERCADO NEGRO DE HUMO Y FUEL OIL EN COLOMBIA

El análisis de mercado tiene como objetivo determinar la cantidad y precio de un bien o servicio, que cierta población o consumidor estaría dispuesto a adquirir para satisfacer cierta necesidad⁸⁹. Puntualmente, los productos a analizar son Negro de Humo y Fuel Oil; estos hacen parte de los productos que se obtienen a partir de pirólisis de GCR y son los productos de interés en este proyecto.

Tanto el Negro de Humo y el Fuel Oil corresponden a productos o bienes industriales que sirven como precursores e insumos en procesos de producción y manufactura industrial, tales como: producción de carbones activados y como combustible en procesos de calentamiento respectivamente. En este capítulo se analizó el producto, el consumidor y el mercado actual para el Negro de Humo y Fuel Oil en Colombia por medio de proyecciones empleado el Método de Winters basado en datos históricos de Oferta y Demanda obtenidos del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), esto con el propósito de realizar una adecuada segmentación del mercado y establecer una capacidad de producción de la planta, siendo esto último, fundamental en el diseño conceptual del proceso.

2.1 CADENA DE VALOR

Una de las herramientas de análisis estratégico que se considera en el ciclo de vida de un producto consta de detectar aquellas actividades, que son necesarias para que una Industria o Empresa produzca y comercialice efectivamente los bienes o servicios que ofrece ⁹⁰. Dichas actividades inician con la extracción de materias primas, continúan pasando por diversas etapas de procesamiento y concluyen con las ventas a los consumidores.

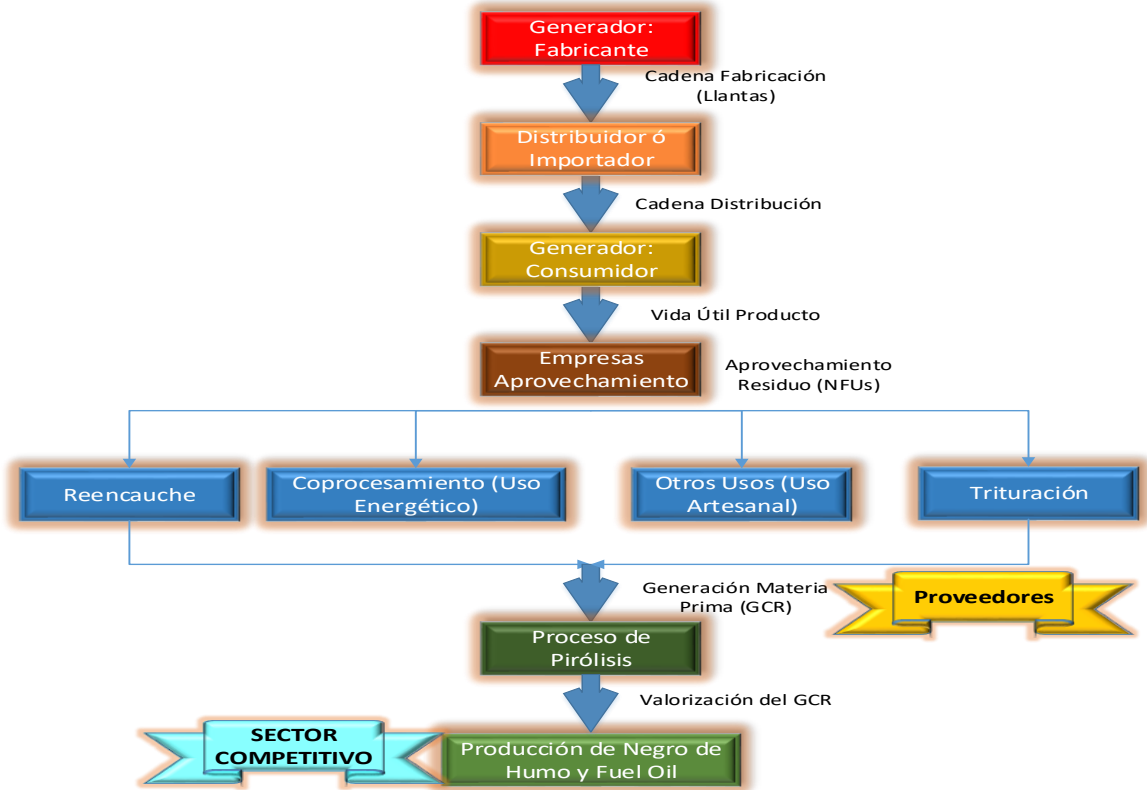
A continuación, en la Figura 14 se presenta la cadena de valor para ambos productos, que parte desde la gestión de los NFUs⁹¹ hasta el aprovechamiento y valorización de la materia prima por medio de pirólisis:

⁸⁹ MIRANDA, Juan José. Estructura Financiera del Proyecto. En: Gestión de Proyectos: Identificación-Formulación- Evaluación Financiera, Económica, Social, Ambiental. 4 ed. MM Editores. Bogotá D. C., 2003. p. 89-92.

⁹⁰ HORNGREN, Charles, *et al.* La contabilidad Administrativa y la Organización en los Negocios. En: Contabilidad Administrativa. 13 ed. Pearson Educación. México, 2006. p. 13-17.

⁹¹ CÁMARA DE COMERCIO DE BOGOTÁ D.C., Colombia. Guía para el manejo de llantas usadas. Bogotá D. C.

Figura 14. Cadena de Valor en la producción de Negro de Humo y Fuel Oil a partir de GCR.



Para este proyecto la cadena de valor inicia con la producción y manufactura de neumáticos, los cuales son distribuidos y comercializados hacia el consumidor, éste, se considera el generador del residuo que corresponde a NFUs, dicho residuo constituye la materia prima para las empresas de gestión, procesamiento y aprovechamiento que le dan diversos usos; sin embargo, sólo las empresas dedicadas a la trituración y reencauche constituirán los proveedores de la materia prima del presente proyecto, es decir GCR.

Posteriormente, se aprovecha y valoriza el GCR mediante el proceso de pirólisis para la producción de Negro de Humo y Fuel Oil, que son los productos de interés que pretende obtener el proyecto. La cadena finaliza con la distribución y comercialización al consumidor final, que en este caso corresponde a empresas o industrias ya establecidas en el sector de Industria y Manufactura; específicamente hacia los subsectores de: Cemento y Construcción y Fabricación de otros productos químicos.

2.2 IDENTIFICACIÓN COMERCIAL

2.2.1 Código de clasificación industrial internacional y código arancelario.

Ambos productos corresponden al sector Industrial y o Manufactura, que en Colombia se identifican de acuerdo al código CIIU (Clasificación Industrial Internacional Uniforme)⁹² y código arancelario⁹³ mostrado a continuación:

Tabla 5. Código CIIU y Arancelario de Negro de Humo y Fuel Oil en Colombia.

Producto	Código CIIU	Código Arancelario
Negro de Humo	D 242919	2803.00.90.00
Fuel Oil	D 232202	2710.19.22.00

2.2.2 Análisis estructural de la industria. Para comprender la estructura competitiva de la industria, se empleó las 5 Fuerzas de Porter, que abarcan los siguientes aspectos: rivalidad entre los competidores, poder de negociación con los proveedores (Proveedores), poder de negociación de los clientes (Posibles Compradores), la amenaza procedente de los productos sustitutos (Productos Sustitutos) y finalmente el sector de la economía donde se desempeñara el proyecto o empresa. A continuación, se pueden describen las diferentes fuerzas que estructuran e influyen en el entorno competitivo de ambos productos⁹⁴:

- **Negro de humo.** Inicialmente el sector competitivo representa la amplia gama de industrias en donde se podría desempeñar el Negro de Humo como insumo o materia prima, posteriormente se segmenta específicamente a qué tipo de industrias o clientes se quiere llegar con este producto, el cual corresponde a empresas encargadas de producir carbón activado; para producir Negro de Humo se analizó los principales proveedores de materia prima o GCR, que corresponden a empresas dedicadas a la gestión y trituración de NFUs.

Los productos sustitutos identificados, corresponden a carbón coque extraído directamente de minería extractiva y como posibles entrantes se identificó Negro de Humo que puede ser obtenido de residuos de biomasa por medio de procesos de gasificación. Finalmente, los competidores constituyen empresas

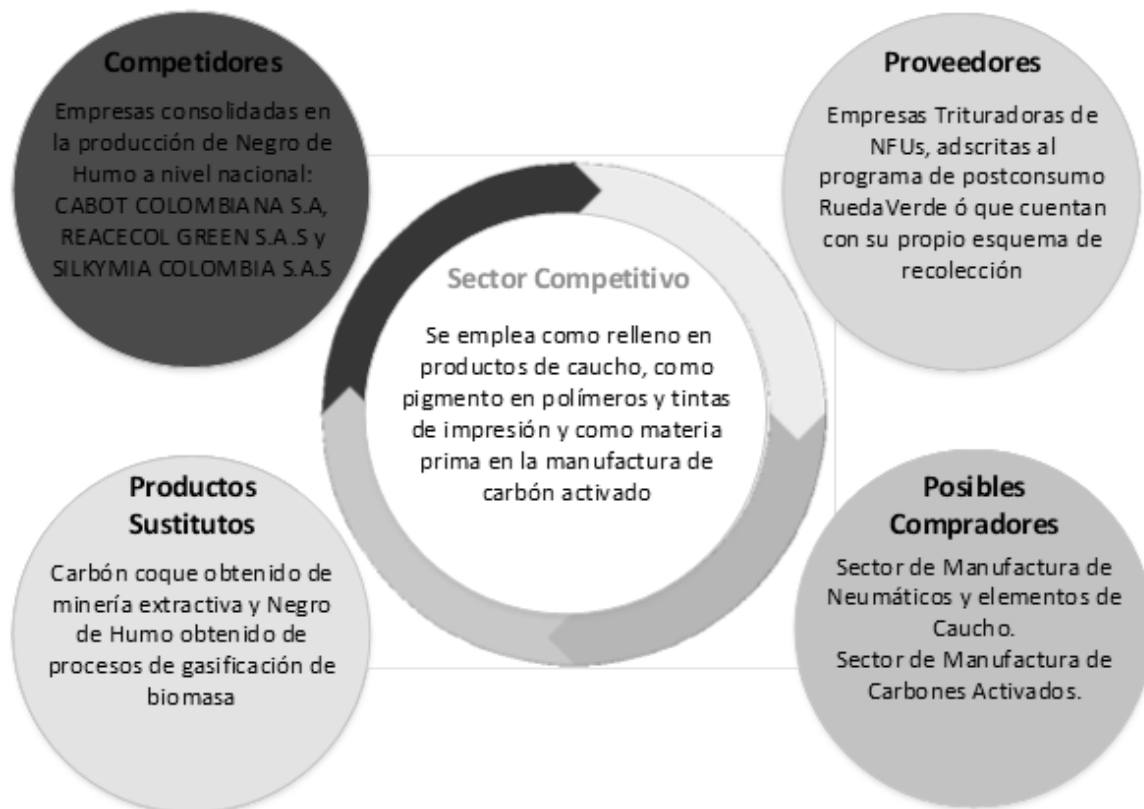
⁹² CÁMARA DE COMERCIO DE BOGOTÁ D.C., Colombia. Registro Mercantil. Cómo clasificar correctamente su negocio y no fracasar en el intento. Revisión 3.1. Bogotá D. C. Unipresarial: 2007.

⁹³ DIRECCIÓN DE IMPUESTOS Y ADUANAS NACIONALES (DIAN), Colombia. Índice Alfabético Arancelario. [En Línea]. [Citado 5 junio, 2017]. Disponible en: (<https://muisca.dian.gov.co/WebArancel/DefConsultaIndiceAlfabetico.faces>)

⁹⁴ COYUNTURA ECONÓMICA. Las Cinco Fuerzas Competitivas de Michael Porter. [En Línea]. [Citado 14 agosto, 2017]. Disponible en: (<http://coyunturaeconomica.com/marketing/cinco-fuerzas-competitivas-de-michael-porter>).

nacionales e internacionales dedicadas a la extracción de carbón mineral como: CABOT COLOMBIANA S.A.

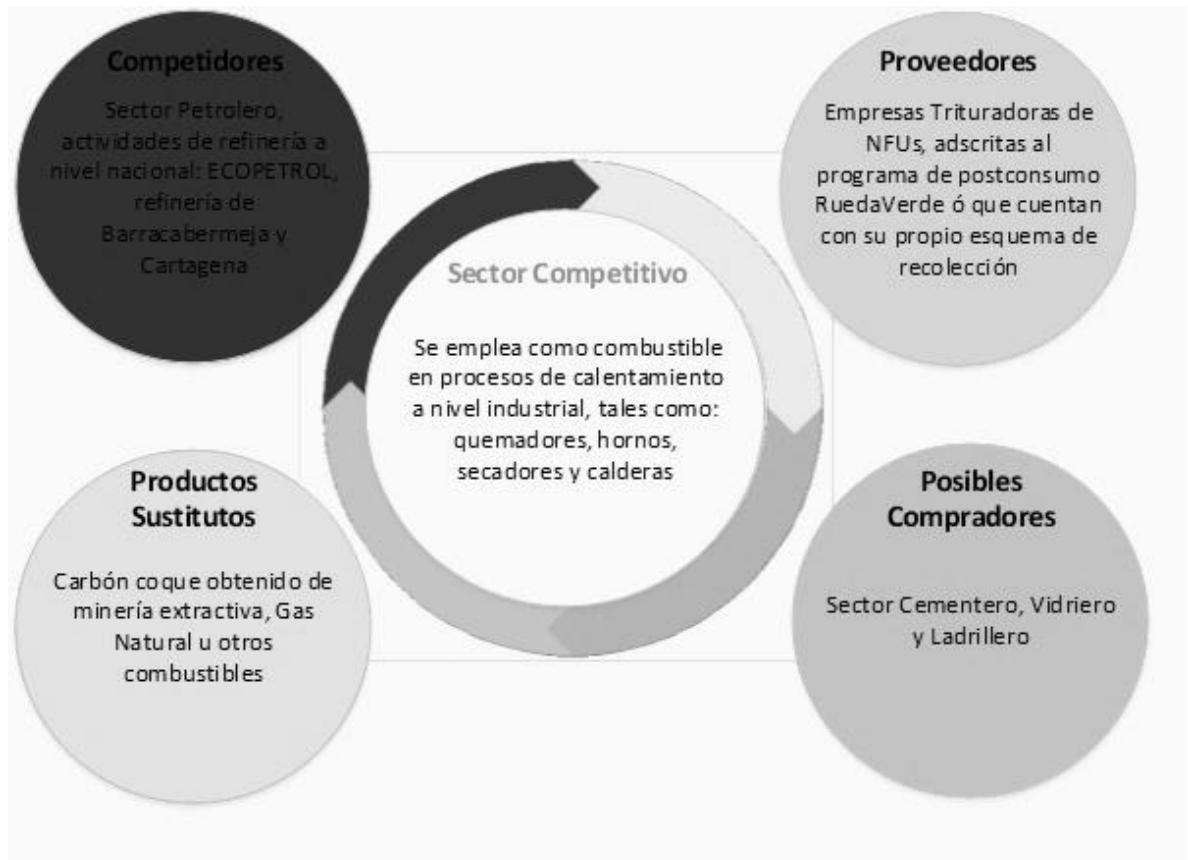
Figura 15. Análisis Estructural de la Industria para Negro de Humo.



- **Fuel Oil.** En el caso del Fuel Oil, su sector competitivo abarca cualquier industria que emplee procesos de calentamiento llevado a cabo en hornos, quemadores, y secadores, para la elaboración de sus productos. Específicamente se escogió industrias del sector cemento y construcción, encargadas de producir cemento, vidrio y ladrillo; al igual que con el Negro de Humo, los proveedores de la materia prima constituyen empresas de gestión y trituración de NFUs.

Con respecto a productos sustitutos, el carbón coque es la principal amenaza debido a su bajo costo y elevada disponibilidad, finalmente los principales competidores corresponden a la industria de producción de Fuel Oil u otros combustibles a nivel de refinería.

Figura 16. Análisis Estructural de la Industria para Fuel Oil.



2.3 IDENTIFICACIÓN DE OFERTA Y DEMANDA

De acuerdo al código CIU y por medio de la Encuesta Anual Manufacturera (EAM) realizada por el DANE, se obtuvieron registros históricos de Producción (Oferta) y Consumo (Demanda) de: Negro de Humo y Fuel Oil, desde el año 2006 hasta el año 2014 a nivel nacional, junto con su respectivo registro de ventas en millones de pesos colombianos⁹⁵. Los valores reportados por el DANE son de carácter anual y nacional, es decir, que la información corresponde a valores totales o globales de Oferta y Demanda de ambos productos, los cuales no tienen ningún tipo de discriminación o tipificación por sector o subsector industrial.

⁹⁵ DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (DANE), Colombia. Encuesta Anual Manufacturera. [En Línea]. [Citado 5 junio, 2017]. Disponible en: (<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/industria/encuesta-anual-manufacturera-enam/eam-historicos>)

2.3.1 Identificación y análisis de oferta. Debido a que el Negro de Humo y el Fuel Oil son productos comercializados en Colombia, se debe conocer la magnitud en toneladas métricas y miles de barriles respectivamente, junto con el valor en ventas para la Oferta ó producción de ambos productos; esto, con el fin de analizar el comportamiento que tuvieron dichos valores históricos en aras de entender su futuro comportamiento, es decir hasta el año 2022 debido al alcance del proyecto (horizonte de planeación de 5 años).

Posteriormente, el comportamiento a futuro de la Oferta se estimó con el método de proyección de Winters, el cual se eligió de acuerdo al comportamiento de los datos históricos identificado para la Oferta de cada producto. Así mismo, el pronóstico tiene en cuenta la tendencia histórica de una serie temporal dada sin diferenciar escenarios favorables o desfavorables para los valores pronosticados.

- **Históricos de oferta.**

- Negro de humo. En la Tabla 6 se presentan datos históricos de producción en toneladas o cantidades de Oferta y su valor de ventas en millones de pesos colombianos (\$COP), para el Negro de Humo en Colombia durante los años 2006 a 2014:

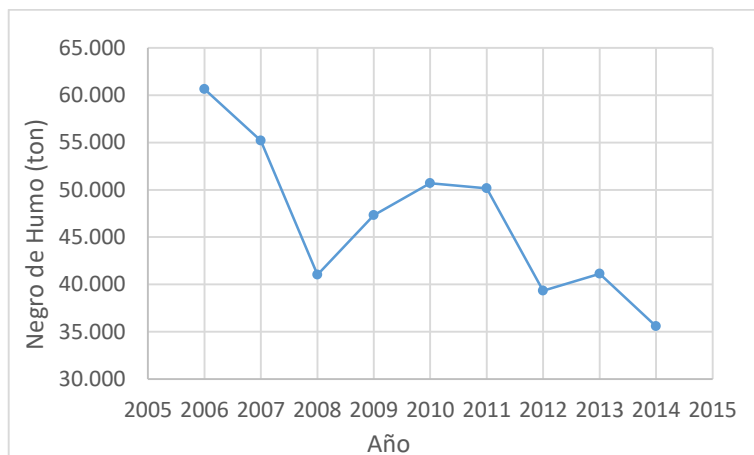
Tabla 6. Histórico de Producción para Negro de Humo en Colombia del año 2006 al 2014.

Año	Producción (ton)	Ventas Producción (Millones \$COP)
2006	60.645	\$ 118.902,37
2007	55.192	\$ 101.760,48
2008	41.015	\$ 102.865,62
2009	47.316	\$ 95.513,15
2010	50.687	\$ 105.001,28
2011	50.171	\$ 132.249,10
2012	39.340	\$ 89.150,04
2013	41.113	\$ 113.875,22
2014	35.567	\$ 108.140,95

Fuente: EAM, DANE. Modificado por autores.

El comportamiento que presentan los datos de la Tabla 6, se analizó gráficamente usando un diagrama de dispersión o serie de tiempo, que relaciona la producción y sus ventas con respecto al periodo de tiempo disponible:

Gráfica 1. Histórico de Cantidades de Oferta para Negro de Humo en Colombia del año 2006 al 2014.



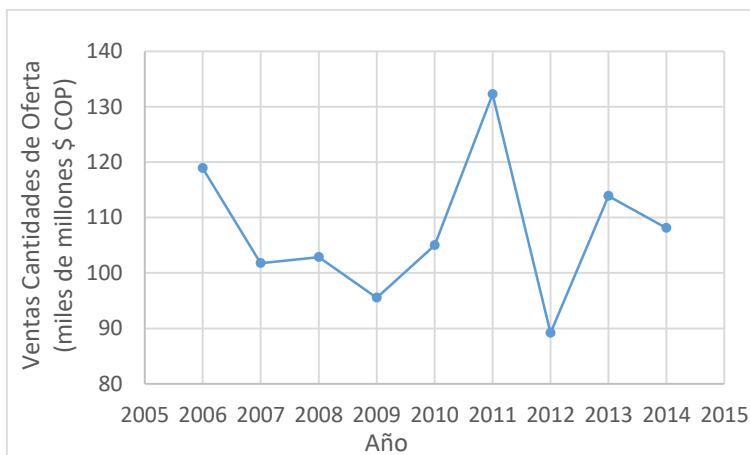
Fuente: EAM, DANE. Modificado por autores.

En la Gráfica 1 se observa un comportamiento estacional de los datos de Oferta, debido a la existencia de un patrón de cambio que se repite en un intervalo de tiempo determinado. A su vez se observó una tendencia a largo plazo decreciente para la Oferta o producción de Negro de Humo en Colombia, por lo tanto, se prevé que para el año 2022 la Oferta sea inferior a 35.000 toneladas.

A pesar de existir una tendencia decreciente, la distribución de los datos es de carácter totalmente aleatorio; es decir, los valores sucesivos para cada serie de tiempo, no están relacionados entre sí⁹⁶. Por lo tanto, el comportamiento de los datos no presenta ninguna correlación adecuada, que permita analizarlos mediante una regresión lineal, polinomial, potencial etc. El comportamiento de las ventas de Oferta para Negro de Humo en la Gráfica 2 es tiene una tendencia a largo plazo que oscilará entre los valores mínimos y máximos reportados, es decir que las ventas para el año 2022 de Oferta se encontrarán entre 90.000 y 132.000 millones de \$COP respectivamente.

⁹⁶ HANKE. Ibid. p. 68.

Gráfica 2. Histórico de las Ventas de cantidades de Oferta para Negro de Humo en Colombia del año 2006 al 2014.



Fuente: EAM, DANE. Modificado por autores.

- **Fuel Oil:** En la Tabla 7 se presentan datos históricos de producción en miles de barriles o cantidades de Oferta y su valor de ventas en millones de pesos colombianos para Fuel Oil en Colombia durante los años 2006 a 2014:

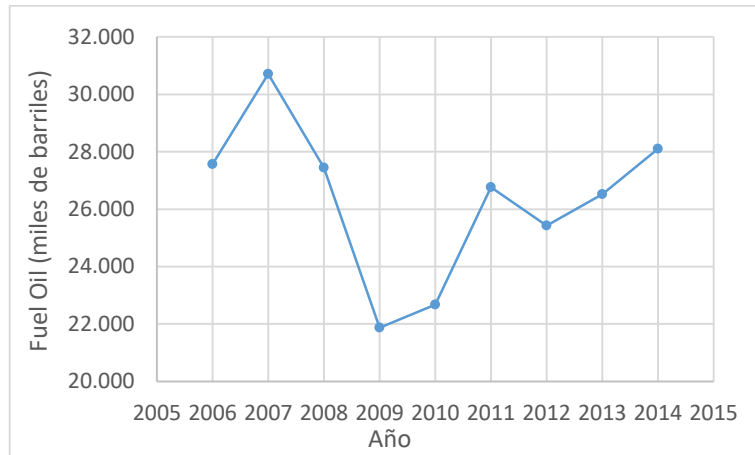
Tabla 7. Histórico de Producción para Fuel Oil en Colombia del año 2006 al 2014.

Año	Producción (Miles de barriles)	Ventas Producción (Millones \$COP)
2006	27.563	\$ 2.639.827,25
2007	30.717	\$ 3.030.057,36
2008	27.442	\$ 4.013.032,40
2009	21.876	\$ 2.316.347,78
2010	22.678	\$ 2.902.567,97
2011	26.763	\$ 3.885.089,03
2012	25.430	\$ 4.679.532,74
2013	26.521	\$ 4.489.245,84
2014	28.099	\$ 4.595.518,11

Fuente: EAM, DANE. Modificado por autores.

El comportamiento que presentan los datos de la Tabla 7, se analizó gráficamente usando un diagrama de dispersión, que relaciona la producción y sus ventas con respecto al periodo de tiempo disponible:

Gráfica 3. Histórico de Cantidades de Oferta para Fuel Oil en Colombia del año 2006 al 2014.

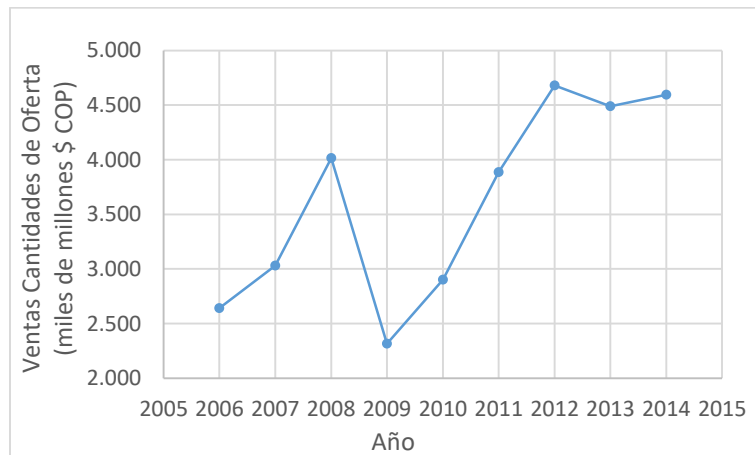


Fuente: EAM, DANE. Modificado por autores.

La Gráfica 3 posee una tendencia a largo plazo que oscilará entre 22.000 y 30.000 miles de barriles de Fuel Oil, es decir que la producción a nivel nacional para el año 2022 se encontrará en este rango.

Por otro lado, en la Gráfica 4 para las ventas de la Oferta de Fuel Oil se evidencia que en los tres primeros periodos presenta un incremento en el valor de las ventas, luego disminuye significativamente para posteriormente seguir aumentando en los últimos tres periodos. Particularmente, la tendencia a largo plazo es creciente y por lo tanto se prevé que para el año 2022 las ventas superen los 4.500.000 millones de \$COP a nivel nacional.

Gráfica 4. Histórico de las Ventas de cantidades de Oferta para Fuel Oil en Colombia del año 2006 al 2014.



Fuente: EAM, DANE. Modificado por autores.

- **Proyecciones de oferta.** Debido a que las series de tiempo para la Oferta de Negro de Humo y Fuel Oil, presentaron un patrón estacional junto a una tendencia decreciente y creciente respectivamente, se eligió el Método de Suavización Exponencial Ajustada a la Tendencia y a la Variación Estacional, conocido como el Método de Winters⁹⁷, para la elaboración de los pronósticos para el año 2022. El desarrollo matemático del Método de Winters se presenta en el Anexo A, junto a la medición de error del mismo⁹⁸, lo cual respalda la confiabilidad del método seleccionado.
- Negro de Humo: En la Tabla 8 se presenta el pronóstico de la producción en toneladas y su valor de ventas en millones de pesos colombianos para el Negro de Humo en Colombia durante los años 2007 a 2022:

Tabla 8. Pronóstico de Oferta para Negro de Humo en Colombia para el año 2022, Aplicando el Método de Winters.

Año	Pronóstico (ton)	Pronóstico (Millones \$COP)
2006		
2007	60.645	\$ 118.902,37
2008	57.405	\$ 113.414,29
2009	47.147	\$ 109.929,77
2010	50.556	\$ 105.145,38
2011	46.117	\$ 104.838,85
2012	40.072	\$ 117.136,32
2013	37.715	\$ 110.932,59
2014	41.353	\$ 108.233,66
2015	37.547	\$ 104.366,69
2016	30.368	\$ 104.099,92
2017	28.838	\$ 110.655,40
2018	27.688	\$ 107.074,41
2019	24.934	\$ 110.374,96
2020	22.181	\$ 106.773,61
2021	19.428	\$ 106.535,12
2022	16.674	\$ 106.296,63

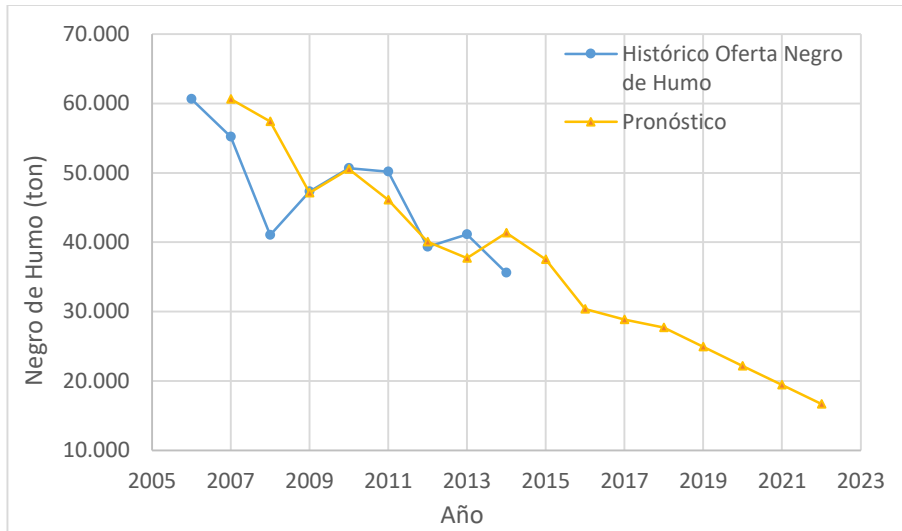
En la Tabla 8 se observa que para el año 2022 en Colombia se estarán produciendo 16.674 toneladas al año de Negro de Humo, lo cual representará unas ventas por un monto de 106.296 millones de \$COP aproximadamente. La información de la Tabla 8 se presenta en las siguientes gráficas, en donde se observa el pronóstico para la serie histórica al año 2014 junto al estimado de cada año hasta el año 2022.

⁹⁷HANKE. Ibid. p. 79.

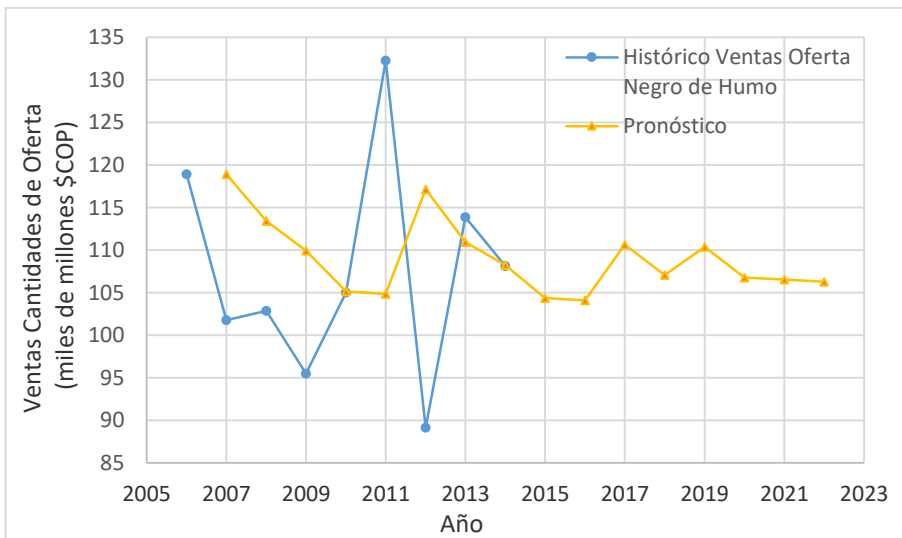
⁹⁸HANKE. Ibid. p. 82-86.

El comportamiento obtenido del Método de Winters para cantidades de Oferta y su valor en ventas para Negro de Humo hasta el año 2022 se observa en la Gráfica 5 y 6 respectivamente:

Gráfica 5. Pronóstico Obtenido Mediante el Método de Winters, para las cantidades de Oferta para Negro de Humo en Colombia para el año 2022.



Gráfica 6. Pronóstico Obtenido Mediante el Método de Winters, para las Ventas de cantidades de Oferta para Negro de Humo en Colombia para el año 2022.



- Fuel Oil: En la Tabla 9 se presenta el pronóstico de la producción en miles de barriles y su valor de ventas en millones de pesos colombianos para Fuel Oil en Colombia durante los años 2007 a 2022:

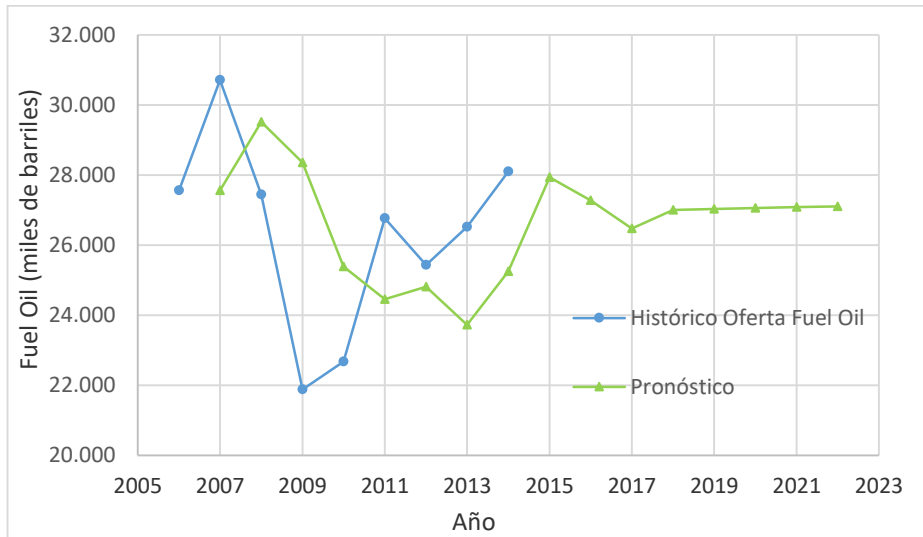
Tabla 9. Pronóstico de Oferta para Fuel Oil en Colombia para el año 2022, Aplicando el Método de Winters.

Año	Pronóstico (Miles de barriles)	Pronóstico (Millones \$COP)
2006		
2007	27.563,06	\$ 2.639.827
2008	29.520,80	\$ 2.882.162
2009	28.360,26	\$ 3.603.041
2010	25.389,85	\$ 2.869.253
2011	24.455,99	\$ 2.902.431
2012	24.815,38	\$ 3.321.337
2013	23.727,72	\$ 4.071.450
2014	25.250,58	\$ 4.631.490
2015	27.937,21	\$ 4.393.636
2016	27.275,05	\$ 4.525.815
2017	26.475,19	\$ 4.898.371
2018	27.006,12	\$ 5.032.369
2019	27.032,03	\$ 5.065.273
2020	27.057,95	\$ 5.405.936
2021	27.083,86	\$ 5.538.487
2022	27.109,77	\$ 5.671.039

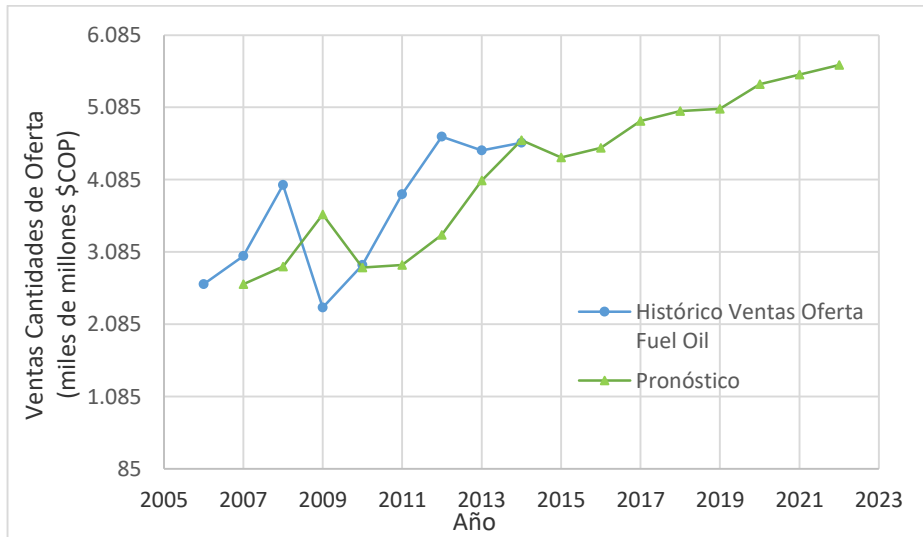
En la Tabla 9 se observa que para el año 2022 en Colombia se estarán produciendo 27.109 miles de barriles al año de Fuel Oil, lo cual representara unas ventas por un monto de 5.671.039 millones de \$COP aproximadamente. La información de la Tabla 9 se presenta en las siguientes gráficas, en donde se observa el pronóstico para los datos de la serie histórica al año 2014 junto al estimado de cada año hasta el año 2022.

El comportamiento obtenido del Método de Winters para cantidades de Oferta y su valor en ventas de Fuel Oil hasta el año 2022 se observa en la Gráfica 7 y 8 respectivamente:

Gráfica 7. Pronóstico Obtenido Mediante el Método de Winters, para las cantidades de Oferta para Fuel Oil en Colombia para el año 2022.



Gráfica 8. Pronóstico Obtenido Mediante el Método de Winters, para las Ventas de cantidades de Oferta para Fuel Oil en Colombia para el año 2022.



2.3.2 Identificación y análisis de demanda. Acorde al análisis efectuado sobre la Oferta de Negro de Humo y Fuel Oil en Colombia, es imprescindible conocer la Demanda de ambos productos en términos de cantidades y ventas, con el fin de poder analizar el comportamiento de esta a través de datos históricos, para posteriormente predecir su comportamiento a futuro, es decir para el año 2022.

- **Históricos de demanda.**

➤ Negro de humo: En la Tabla 10 se presentan datos históricos de consumo en toneladas o cantidades de Demanda y su valor de ventas en millones de pesos colombianos para el Negro de Humo en Colombia durante los años 2006 a 2014:

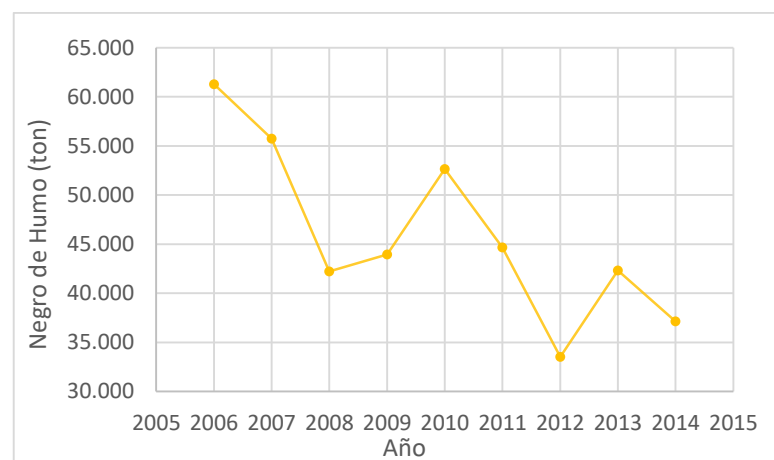
Tabla 10. Histórico de Consumo para Negro de Humo en Colombia del año 2006 al 2014.

Año	Demanda (ton)	Ventas Demanda (Millones \$COP)
2006	61.292	\$ 119.498,48
2007	55.750	\$ 102.789,29
2008	42.222	\$ 105.895,12
2009	43.958	\$ 88.734,28
2010	52.646	\$ 109.207,76
2011	44.653	\$ 117.703,82
2012	33.537	\$ 98.269,19
2013	42.312	\$ 117.177,24
2014	37.133	\$ 112.901,84

Fuente: EAM, DANE. Modificado por autores.

El comportamiento que presentan los datos de la Tabla 10, se representa gráficamente usando un diagrama de dispersión ó serie de tiempo, que relaciona el consumo y sus ventas con respecto al periodo de tiempo disponible:

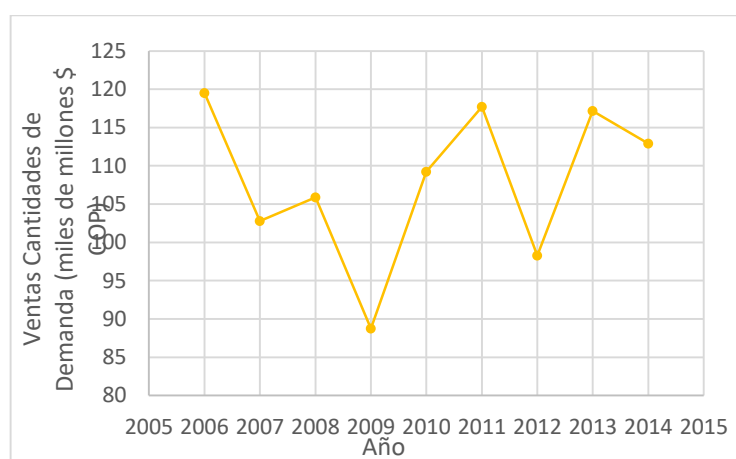
Gráfica 9. Histórico de Cantidades de Demanda para Negro de Humo en Colombia del año 2006 al 2014.



Fuente: EAM, DANE. Modificado por autores.

En la Gráfica 9 se observa un comportamiento estacional de los datos de Demanda, debido a la existencia de un patrón de cambio que se repite en un intervalo de tiempo determinado. Se observó una tendencia a largo plazo decreciente para la Demanda o Consumo de Negro de Humo en Colombia, por lo tanto, se prevé que para el año 2022 la Demanda sea inferior a 37.000 toneladas. Conforme se analiza la Gráfica 10 para las ventas de demanda de Negro de Humo, se observa un comportamiento similar al de la Gráfica 2 con una tendencia a largo plazo que oscilará entre los valores mínimos y máximos reportados, es decir que las ventas para el año 2022 de Demanda tendrán un estimado entre 90.000 y 120.000 millones de \$COP respectivamente.

Gráfica 10. Histórico de las Ventas de cantidades de Demanda para Negro de Humo en Colombia del año 2006 al 2014.



Fuente: EAM, DANE. Modificado por autores.

- **Fuel Oil:** En la Tabla 11 se presenta datos históricos de consumo en miles de barriles o cantidades de Demanda y su valor de ventas en millones de pesos colombianos para Fuel Oil en Colombia durante los años 2006 a 2014:

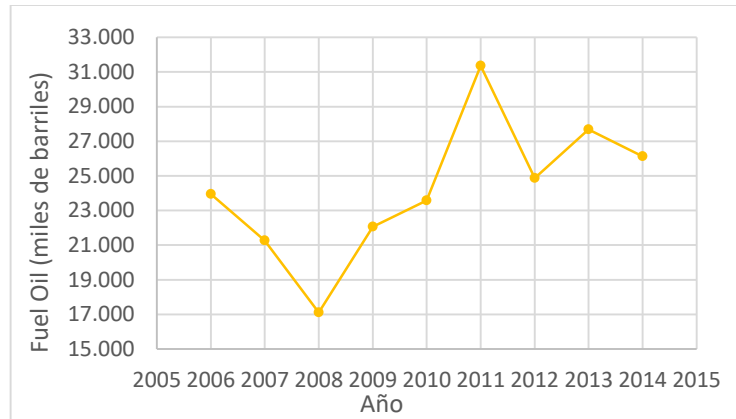
Tabla 11. Histórico de Consumo para Fuel Oil en Colombia del año 2006 al 2014.

Año	Demanda (Miles de Barriles)	Ventas Demanda (Millones \$COP)
2006	23.949	\$ 2.368.455,73
2007	21.263	\$ 2.319.831,90
2008	17.107	\$ 2.516.005,09
2009	22.056	\$ 2.335.680,02
2010	23.579	\$ 2.937.536,22
2011	31.360	\$ 4.486.205,32
2012	24.869	\$ 4.595.315,96
2013	27.688	\$ 4.723.770,97
2014	26.135	\$ 4.275.528,25

Fuente: EAM, DANE. Modificado por autores.

El comportamiento que presentan los datos de la Tabla 11, se analizó gráficamente usando un diagrama de dispersión, que relaciona el consumo y sus ventas con respecto al periodo de tiempo disponible:

Gráfica 11. Histórico de Cantidades de Demanda para Fuel Oil en Colombia del año 2006 al 2014.

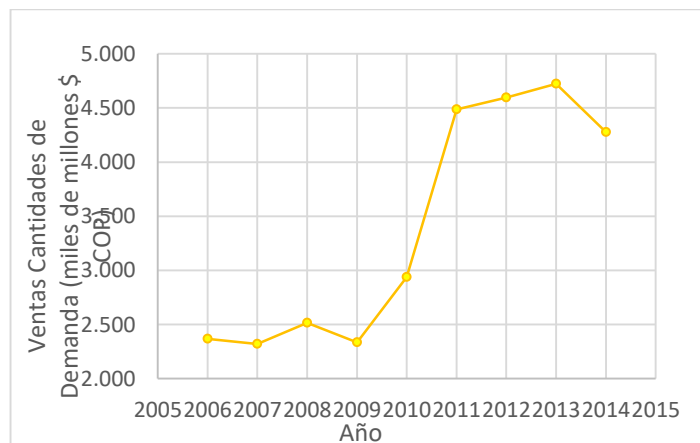


Fuente: EAM, DANE. Modificado por autores.

La Gráfica 11 posee una tendencia a largo plazo que oscilará entre 17.000 y 31.000 miles de barriles de Fuel Oil, es decir que el consumo a nivel nacional para el año 2022 se encontrará en este rango.

Finalmente, en la Gráfica 12 se aprecia una tendencia creciente con respecto a las ventas de Fuel Oil en Colombia, las cuales no han presentado variaciones negativas o disminuciones apreciables como es el caso de las ventas de Oferta de Fuel Oil (Ver Gráfica 12); del año 2009 a 2011 se dio un incremento abrupto del 92,1% en las cantidades de oferta con respecto al año 2009:

Gráfica 12. Histórico de las Ventas de cantidades de Demanda para Fuel Oil en Colombia del año 2006 al 2014.



Fuente: EAM, DANE. Modificado por autores.

- **Proyecciones de demanda.** Al igual que las series de tiempo para la Oferta de Negro de Humo y Fuel Oil, la Demanda para ambos productos presentó una tendencia decreciente y creciente respectivamente; por lo tanto, el Método de Winters, para la elaboración de los pronósticos para el año 2022 sigue siendo acertado.
- Negro de humo: En la Tabla 12 se presenta el pronóstico del consumo en toneladas y su valor de ventas en millones de pesos colombianos para el Negro de Humo en Colombia durante los años 2007 a 2022:

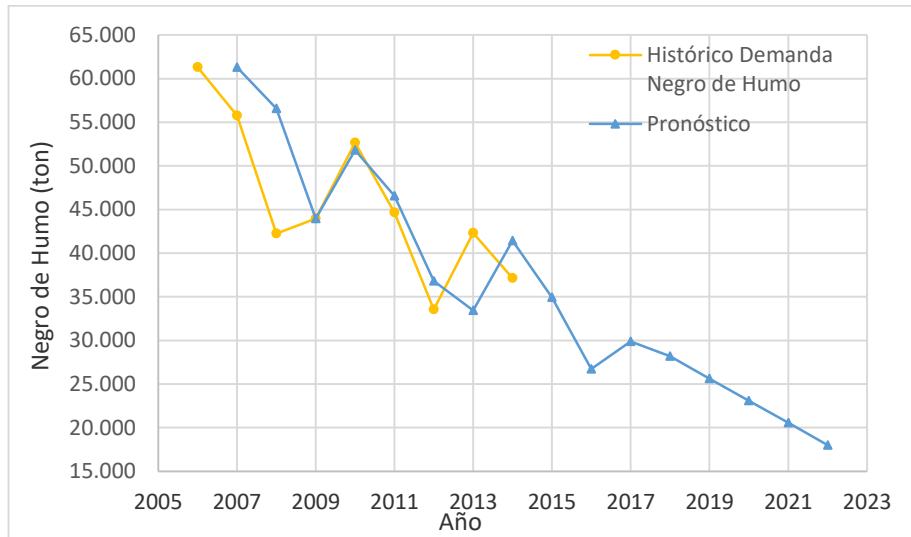
Tabla 12. Pronóstico de Demanda para Negro de Humo en Colombia para el año 2022, Aplicando el Método de Winters.

Año	Pronóstico (ton)	Pronóstico (Millones \$ COP)
2006		
2007	61.292,00	\$ 119.498
2008	56.587,88	\$ 114.149
2009	43.969,38	\$ 111.401
2010	51.814,70	\$ 103.997
2011	46.552,93	\$ 105.372
2012	36.803,22	\$ 116.623
2013	33.420,25	\$ 111.081
2014	41.439,06	\$ 109.131
2015	34.940,51	\$ 103.416
2016	26.743,14	\$ 104.500
2017	29.893,37	\$ 107.349
2018	28.183,83	\$ 109.927
2019	25.641,04	\$ 111.736
2020	23.098,24	\$ 108.882
2021	20.555,44	\$ 108.644
2022	18.012,64	\$ 108.405

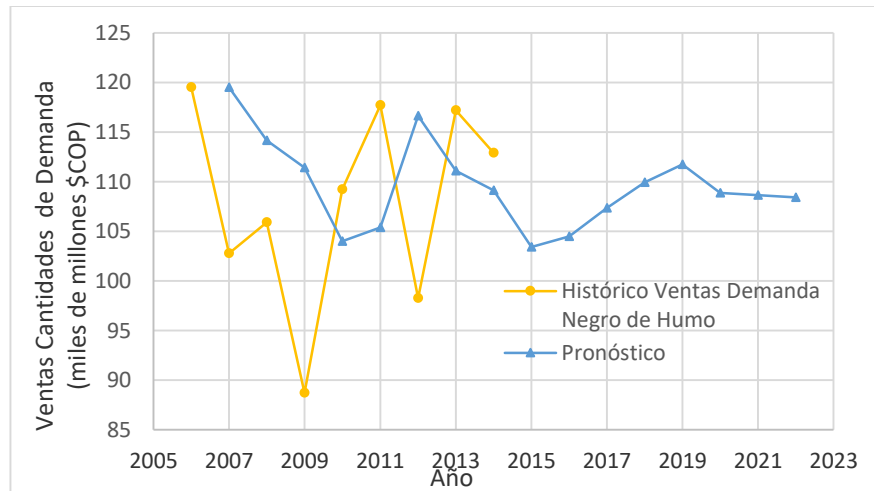
En la Tabla 12 se observa que para el año 2022 en Colombia se estarán consumiendo o demandando 18.012 toneladas al año de Negro de Humo, lo cual representara unas ventas por un monto de 108.405 millones de \$COP aproximadamente. La información de la Tabla 12 se presenta en las siguientes gráficas, en donde se observa el pronóstico para la serie histórica al año 2014 junto al estimado de cada año hasta el año 2022.

El comportamiento obtenido del Método de Winters para cantidades de Demanda y su valor en ventas para Negro de Humo hasta el año 2022 se observa en la Gráfica 13 y 14 respectivamente:

Gráfica 13. Pronóstico Obtenido Mediante el Método de Winters, para las cantidades de Demanda para Negro de Humo en Colombia para el año 2022.



Gráfica 14. Pronóstico Obtenido Mediante el Método de Winters, para las Ventas de cantidades de Demanda para Negro de Humo en Colombia para el año 2022.



- **Fuel Oil.** En la Tabla 13 se presenta el pronóstico del consumo en miles de barriles y su valor de ventas en millones de pesos colombianos para Fuel Oil en Colombia durante los años 2007 a 2022:

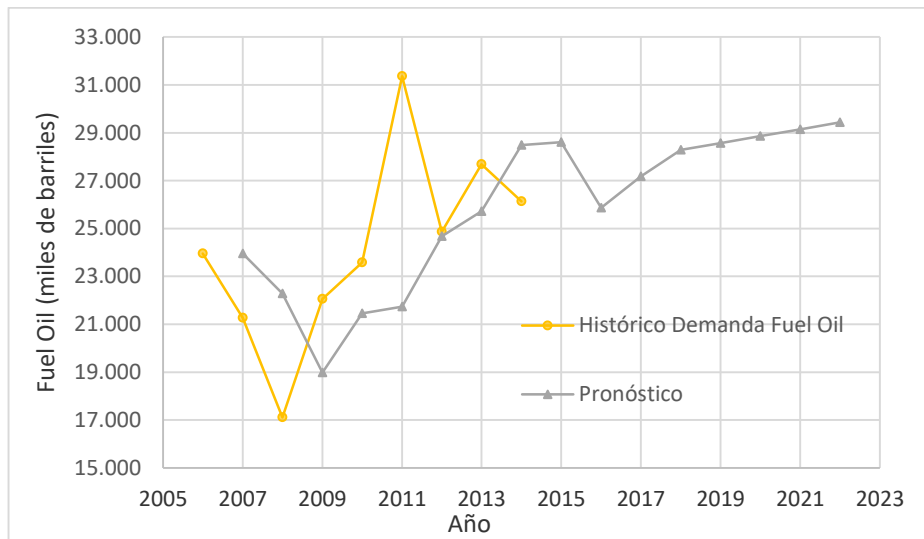
Tabla 13. Pronóstico de Demanda para Fuel Oil en Colombia para el año 2022, Aplicando el Método de Winters.

Año	Pronóstico (Miles de barriles)	Pronóstico (Millones \$COP)
2006		
2007	23.949,18	\$ 2.368.456
2008	22.286,15	\$ 2.338.316
2009	18.984,42	\$ 2.446.614
2010	21.460,39	\$ 2.383.067
2011	21.735,84	\$ 2.728.513
2012	24.676,90	\$ 3.391.889
2013	25.717,48	\$ 3.997.034
2014	28.491,20	\$ 4.514.144
2015	28.609,56	\$ 4.540.590
2016	25.864,86	\$ 4.879.262
2017	27.170,66	\$ 5.509.003
2018	28.279,26	\$ 5.291.145
2019	28.567,95	\$ 5.307.212
2020	28.856,65	\$ 5.326.129
2021	29.145,35	\$ 5.484.525
2022	29.434,04	\$ 5.642.922

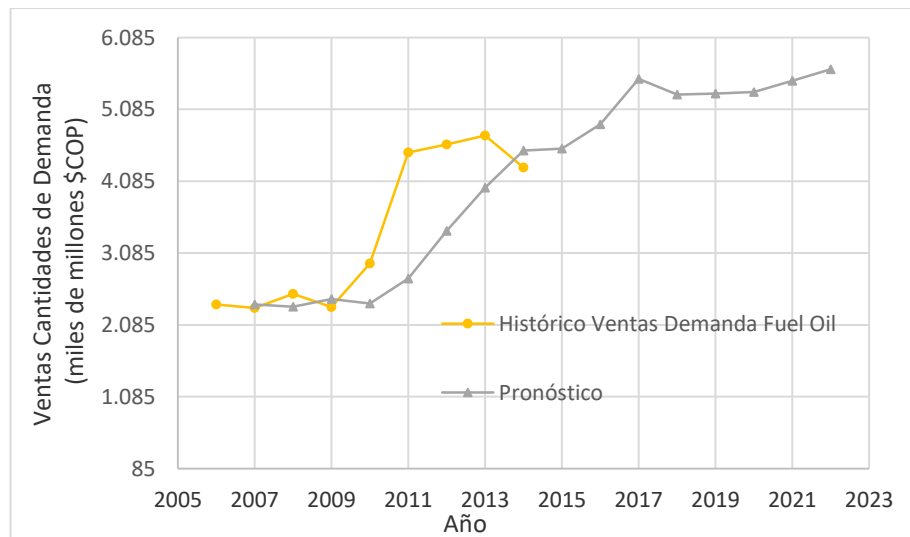
En la Tabla 13 se observa que para el año 2022 en Colombia se estarán consumiendo o demandando 29.434 miles de barriles al año de Fuel Oil, lo cual representara unas ventas por un monto de 5.642.922 millones de \$COP aproximadamente. La información de la Tabla 13 se presenta en las siguientes gráficas, en donde se observa el pronóstico para los datos de la serie histórica al año 2014 junto al estimado de cada año hasta el año 2022.

El comportamiento obtenido del Método de Winters para cantidades de Demanda y su valor en ventas de Fuel Oil hasta el año 2022 se observa en la Gráfica 15 y 16 respectivamente:

Gráfica 15. Pronóstico Obtenido Mediante el Método de Winters, para las cantidades de Demanda para Fuel Oil en Colombia para el año 2022.



Gráfica 16. Pronóstico Obtenido Mediante el Método de Winters, para las Ventas de cantidades de Demanda para Fuel Oil en Colombia para el año 2022.



2.4 ANÁLISIS DEMANDA VS. OFERTA

Una vez estimada la Oferta y Demanda de Negro de Humo y Fuel Oil tanto en cantidades como en ventas para el año 2022 en Colombia, es necesario determinar si existe déficit de Oferta o Demanda Insatisfecha ó lo contrario, es decir si existe Sobreoferta; esto se entiende como un margen, que constituye verdaderamente el

mercado potencial de ambos productos en términos cuantitativos⁹⁹. La finalidad de dicho margen, es que permita realizar una estimación de la futura participación de mercado que tendría el proyecto bajo un marco nacional. El análisis Demanda vs. Oferta se llevó a cabo con la siguiente expresión:

Ecuación 2. Análisis Demanda Vs Oferta.

$$\begin{aligned} \text{Demanda Satisfecha} &\rightarrow \text{Demanda} - \text{Oferta} = 0 \\ \text{Demanda Insatisfecha} &\rightarrow \text{Demanda} - \text{Oferta} > 0 \\ \text{Sobreoferta} &\rightarrow \text{Demanda} - \text{Oferta} < 0 \end{aligned}$$

Fuente: MIRANDA, Juan. El Mercado. En: Gestión de Proyectos: Identificación, Formulación, Evaluación Financiera, Económica y Social. 4 ed. MM Editores. Bogotá D.C, Colombia 2003.

En seguida se resumen los pronósticos obtenidos de cantidades y ventas para ambos productos:

- **Negro de humo.** A continuación, se presenta el pronóstico de la Oferta y Demanda en toneladas y su valor en millones de pesos colombianos para el Negro de Humo en Colombia para el 2022, junto a su respectivo análisis de Demanda vs. Oferta (Tabla 14 y 15):

Tabla 14. Análisis de Demanda VS. Oferta para cantidades de Negro de Humo en Colombia para el año 2022.

Pronóstico Año 2022 (ton)	
Oferta	16.674
Demanda	18.013
Margen Año 2022 (ton Negro Humo)	1.338,63

Tabla 15. Análisis Demanda VS. Oferta de ventas de Negro de Humo en Colombia para el año 2022.

Pronóstico Año 2022 (Millones \$COP)	
Oferta	\$ 106.297
Demanda	\$ 108.405
Margen Año 2022 (Ventas Negro Humo Millones \$COP)	\$ 2.108

Con base en las Tablas 14 y 15, se observa que el Negro de Humo presenta una demanda insatisfecha del orden de 1.339 toneladas aproximadamente, que equivaldrían a un mercado de 2.108 millones de \$COP en ventas, en el caso de comercializarse por completo sin tener en cuenta fluctuaciones de precios en el mercado; esto para el año 2022 en Colombia. Por lo tanto, para

⁹⁹ MIRANDA. Op. Cit., p. 113-115.

el proyecto es factible incursionar en este tipo de producto desde el punto de vista comercial y de mercado.

- **Fuel Oil.** A continuación, se presenta el pronóstico de la Oferta y Demanda en miles de barriles y su valor en millones de pesos colombianos para Fuel Oil en Colombia para el año 2022, junto a su respectivo análisis de Demanda vs. Oferta (Tabla 16 y 17):

Tabla 16. Análisis de Demanda VS. Oferta para cantidades de Fuel Oil en Colombia para el año 2022.

Pronóstico Año 2022 (Miles de barriles)	
Oferta	27.110
Demanda	29.434
Margen Año 2022 (Miles de barriles Fuel Oil)	2.324,27

Tabla 17. Análisis Demanda VS. Oferta de ventas de Fuel Oil en Colombia para el año 2022.

Pronóstico Año 2022 (Millones \$COP)	
Oferta	\$ 5.671.039
Demanda	\$ 5.642.922
Margen Año 2022 (Ventas Fuel Oil Millones \$COP)	-\$ 28.116

A partir de las Tablas 16 y 17, se aprecia una demanda insatisfecha de Fuel Oil del orden de 2.324 miles de barriles equivalentes a 97.620 miles de galones para el año 2022 en Colombia; tomando como referencia un barril norteamericano de 42 galones¹⁰⁰. Del mismo modo, su incursión en el mercado es viable para el proyecto.

El margen en ventas que se espera obtener arroja un valor negativo, esto se da a fenómenos económicos y geopolíticos que influyen directamente en el precio del barril de crudo de petróleo y por lo tanto en sus productos de refinería, como el Fuel Oil. No obstante, para efectos prácticos se considera que el margen en ventas de Fuel Oil equivale a 28.116 millones de \$COP. Con base en lo anterior, ambos productos presentan un déficit de oferta o demanda insatisfecha, lo cual, en términos porcentuales representa el 100% del mercado que el proyecto podría abarcar a futuro, es decir al año 2022 a nivel nacional.

¹⁰⁰ ECOPETROL, Colombia. Glosario, Barril Petróleo. [En Línea]. [Citado 20 junio, 2017]. Disponible en: (<http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/servicios-de-informacion-al-ciudadano/glosario/a-b>).

2.5 IDENTIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE LA OFERTA DE GCR

La materia prima del proyecto corresponde a GCR, el cual va a ser obtenido de empresas dedicadas a la gestión y trituración de NFUs, este comercialmente se conoce como: Gránulo de Caucho Reciclado (GCR) malla 10 con un diámetro de partícula de 2 mm, proveniente de neumáticos en desuso o fuera de uso (NFUs). La disponibilidad u oferta de esta materia prima constituye una restricción fundamental al momento de establecer la capacidad de producción y el porcentaje de participación de mercado que tendría el proyecto para el año 2022.

Por lo tanto, se identificó la magnitud de generación de GCR por parte de estas empresas a Nivel Nacional y Local, es decir para la ciudad de Bogotá D.C; debido al alcance geográfico establecido en el proyecto. Esto con el fin de estimar el porcentaje de participación de oferta de GCR que tiene Bogotá a nivel nacional, para poder finalmente fijar una tasa o cuota de aprovechamiento de la oferta total de GCR a Nivel Local que emplearía el proyecto.

2.5.1 Oferta Nacional de GCR. Debido a la falta de disponibilidad de datos históricos de producción nacional de GCR, se realizó una analogía a datos disponibles de producción anual de ripio de llanta generado en procesos de reencauche, para el cual se encontraron históricos de producción hasta 2010¹⁰¹.

Tabla 18. Histórico de Oferta para Ripio de llanta desde 1999 hasta el año 2010 en Colombia.

Año	Ripio de Llanta (ton)
1999	12.076
2004	12.768
2005	12.927
2006	13.093
2007	13.270
2008	13.451
2009	13.639
2010	13.834

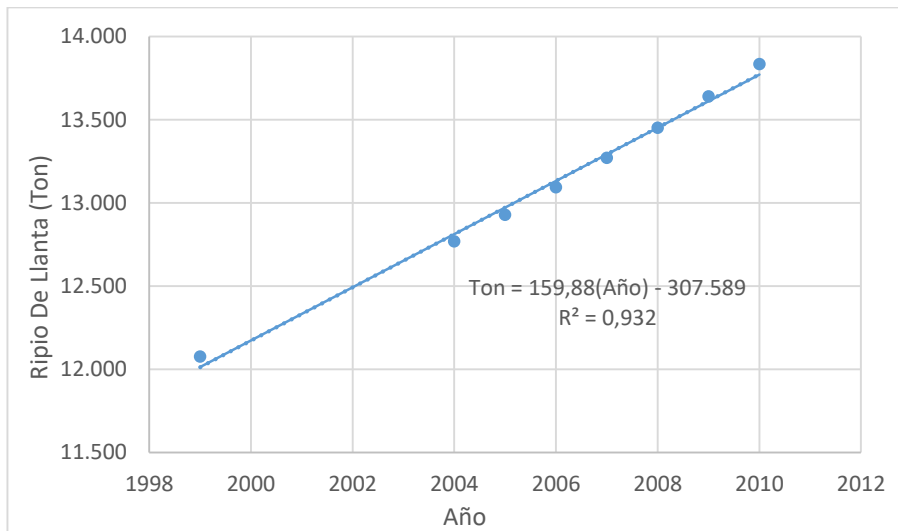
Fuente: Proexport, 2012. Modificado por autores.

Una vez Graficados y analizados los datos históricos de la Tabla 18- Ver Gráfico 17 -, se observó que estos tienen una tendencia creciente que se acopla a una línea recta; por otra parte, debido a que el coeficiente de correlación es cercano a 1 ($R^2 = 0,9932$), es posible realizar el pronóstico bajo un modelo de regresión lineal. Dicho

¹⁰¹ Proexport. Citado por: DEL RIO, Félix Gustavo; RODRÍGUEZ, Diego Nicolás y VARGAS, Nelson Leonardo. Elaboración de los estudios de pre factibilidad para la reutilización de desechos sólidos de llantas como agregado en mezclas asfálticas para capas de rodadura dentro del marco investigativo de la empresa Renovoy S.A. Trabajo de grado Especialista en Desarrollo y Gerencia Integral de Proyectos. Bogotá D. C.: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2012. p. 62-64.

comportamiento lineal, permite estimar la Oferta total de Ripio de llanta para el año 2022, la cual se prevé sea mayor a 13.800 toneladas de materia prima.

Gráfica 17. Histórico de Producción de Ripio de Llanta en Colombia desde 1999 Hasta el 2010.



Fuente: Proexport, 2012. Modificado por autores.

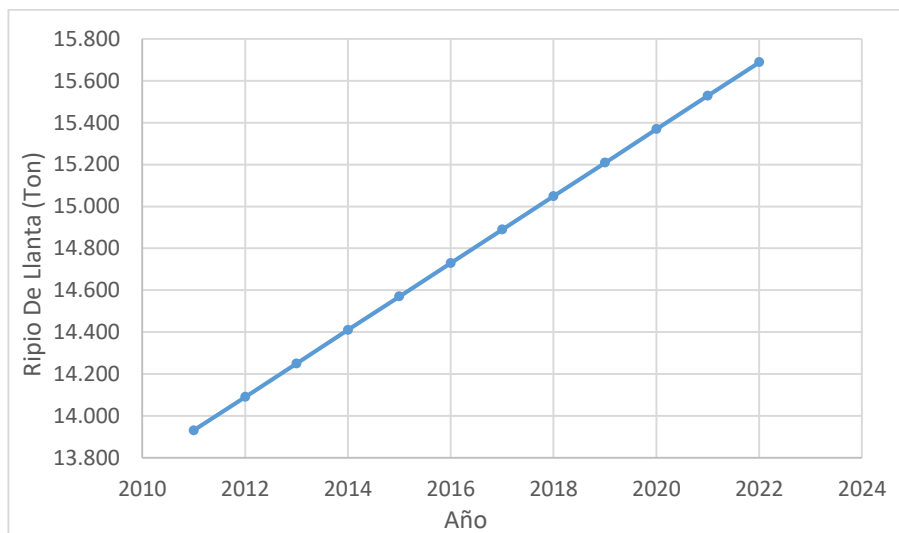
Tabla 19. Proyección de Oferta de Ripio de Llanta en Colombia para el año 2022.

Año	Pronóstico Ripio De Llanta (ton) +- 576,46¹⁰²
2011	13.929,68
2012	14.089,56
2013	14.249,44
2014	14.409,32
2015	14.569,20
2016	14.729,08
2017	14.888,96
2018	15.048,84
2019	15.208,72
2020	15.368,60
2021	15.528,48
2022	15.688,36

El comportamiento gráfico de los datos pronosticados de la Tabla 19 se muestra a continuación:

¹⁰² 576,46 corresponde a la desviación estándar de los valores pronosticados para la oferta de materia prima o ripio de llanta.

Gráfica 18. Pronóstico obtenido Mediante Regresión Lineal, para la Oferta de Rípio de Llanta en Colombia Hasta el año 2022.






Para el año 2017 y 2022 se tiene un estimado de 14.889 y 15.688 toneladas métricas de GCR respectivamente a nivel nacional, lo cual, sirve como base para conocer el porcentaje de participación que tiene Bogotá D.C actualmente en términos de generación de GCR, es decir al año 2017.

2.5.2 Oferta local de GCR en la ciudad de Bogotá D.C. Se identificó la oferta actual de GCR en la ciudad de Bogotá D. C. de manera singular, esto debido al alcance que cubre el proyecto en cuanto a la disponibilidad geográfica de materia prima que se pretende aprovechar. Por lo tanto, se identificó las principales empresas trituradoras de NFUs que se encuentran adscritas al programa de postconsumo Rueda Verde, fomentado por la Asociación Nacional de Industriales de Colombia (ANDI) a nivel del departamento de Cundinamarca; las cuales obtienen su materia prima, en este caso NFUs generados principalmente en el perímetro urbano de la ciudad Bogotá D. C.




A su vez, se identificó un grupo industrial encargado de la disposición final y trituración de NFUs, que cuentan con su propio esquema de recolección del residuo; es decir no forman parte de ningún programa de postconsumo, como es el caso del GRUPO GERCONS COLOMBIA. Se identificaron 3 empresas consolidadas en esta actividad, las cuales se muestran en el Cuadro 1:

Cuadro 1. Empresas trituradoras de NFUs, proveedoras de GCR (2017).

Empresa	Nombre- Razón Social	Ubicación
	RECICLAIR S.A.S	Barrio Lucero, Carrera 2 #3-14 Mosquera, Cundinamarca
	GRÁNULO DE CAUCHO RECICLADO S.A.S- GCR SOLUCIONES S.A.S	Parque Industrial Santa Cruz, Bodega 23 Km 2,3 Vía Los Árboles Puente Piedra, Madrid, Cundinamarca
	GRUPO GERCONS COLOMBIA S.A.S- GERCONS COLOMBIA S.A.S	Calle 132D No, 160-47 Suba, Bogotá D. C.

Consecuentemente, se contactó directamente las empresas presentadas en el Cuadro 1, con el fin de conocer su oferta actual (año 2017) de GCR en toneladas producidas por día y por mes, lo cual se presenta en el Cuadro 2:

Cuadro 2. Oferta promedio diaria y mensual de GCR, de las empresas identificadas.

Empresa	Oferta GCR (ton/día)	Oferta GCR (ton/mes)
	15	360
	4	96
	3	60
Total	22	516

Los valores de oferta de GCR son valores promedios sugeridos por cada empresa, dados los contratiempos que surgen en el proceso de trituración que retrasan la oferta diaria y mensual. Con base en el Cuadro 2, se estima que en Bogotá D. C. se cuentan con 516 toneladas de GCR mensuales; lo cual equivale a 6.192 toneladas de GCR para el año 2017.

Por consiguiente, la ciudad de Bogotá D.C cuenta con un porcentaje de participación del 42% a Nivel Nacional con respecto a la disponibilidad u oferta de GCR al año 2017 (14.889 toneladas); lo cual ratifica que la localización del proyecto es adecuada en cuanto a la locación asequible de la materia prima.

2.5.3 Capacidad de procesamiento. El proyecto prevé aprovechar del 20 al 25% de la disponibilidad de materia prima existente para la ciudad de Bogotá D. C. para el año 2017, lo cual equivale de 100 a 130 toneladas de GCR que deben procesarse o usarse mensualmente. Lo anterior sirve como base para establecer la capacidad de procesamiento que tendría la planta por *batch*, de manera que se procesarán 10 toneladas de GCR por *batch*, trabajando 6 días a la semana para alcanzar la meta propuesta de procesamiento de GCR; tanto el porcentaje de aprovechamiento como la capacidad de procesamiento son parámetros establecidos por el proyecto.

2.6 SEGMENTACIÓN DE MERCADO

Con base a la meta de procesamiento establecida, que oscila entre 100 y 130 toneladas de GCR mensuales, es necesario estimar las cantidades de Negro de Humo y Fuel Oil que se llegarían a producir con dicha materia prima mensualmente para posteriormente estimar el porcentaje de participación o la cuota de mercado que cubrirá el proyecto con base a los márgenes insatisfechos de Demanda que se calcularon para Negro de Humo y Fuel Oil en el año 2022- Ver Tablas 14 y 16-.

Dichas cantidades de Negro de Humo y Fuel Oil parten de rendimientos porcentuales de producción obtenidos de resultados experimentales en banco de laboratorio para una temperatura de 650°C- Ver Tabla 27-, junto al tiempo de operación del proceso estimado del diseño conceptual.

2.6.1 Rendimientos porcentuales de producción. Los rendimientos porcentuales de producción para Negro de Humo y Fuel Oil están expresados como porcentajes o índices promedio másicos de conversión¹⁰³, que representan cuantas toneladas de producto se producen por cada tonelada de GCR procesado. Dichos índices dependen fuertemente de las condiciones de operación del proceso de pirólisis, debido a que el proceso se puede operar bajo distintas condiciones de temperatura, presión, tasa de calentamiento etc.

A continuación, se muestran valores promedios sugeridos en la literatura que cubren amplios rangos de operación y configuración del reactor:

Cuadro 3. Rendimiento Teórico Porcentual de Producción para los productos pirolíticos.

Producto	Rendimiento Porcentual (%)
Sólido (Negro de Humo)	30-50%
Líquido (Fuel Oil)	35-50%
Gas Residual	15-25%

Fuente: Recovery of Oil from Waste Tyres using Pyrolysis Method: A Review, International Journal of Research in Engineering & Technology, 2013.

¹⁰³ SUHANYA. Op. Cit., p. 81-85.

Experimentalmente se estableció un porcentaje másico de conversión para el Negro de Humo y Fuel Oil, correspondiente a: 52.20% y 23.80% respectivamente -Ver Sección 3.3.3-. Es decir que por cada tonelada procesada de GCR se obtienen 522 kg de Negro de Humo y 238 kg de Fuel Oil, en donde los 240 kg restantes corresponden a gases generados en el proceso.

2.6.2. Capacidad de producción de la planta. Con base a los índices de producción establecidos para Negro de Humo y Fuel Oil de 52,20% y 23,80%, junto a la meta de procesamiento de materia prima o GCR por cada mes, se calculó el rango de la capacidad de producción que tendría el proyecto para cada producto.

No obstante, debido a que los índices de producción son de carácter másico, es necesario conocer la densidad del Fuel Oil que se va a producir; para ello, se utilizó un valor promedio de densidad (a 15°C) para el Combustóleo o Fuel Oil reportado en la ficha técnica del producto¹⁰⁴, el cual corresponde a 822 kg/m³, esto se muestra a continuación:

Cuadro 4. Capacidad de Producción de la planta con base a la capacidad de procesamiento.

Capacidad de Procesamiento (ton GCR/mes)	Negro de Humo (ton/mes)	Fuel Oil (ton/mes)	Fuel Oil (gal/mes)
100	52.2	23.8	7.647
130	67.9	30.9	9.941

Sin embargo, el tiempo de operación por *batch* hallado del diseño corresponde a 48 horas o 2 días, por lo cual se procesan 3 *batch* por semana en 6 días respectivamente -Ver Sección 3.4.1-. En seguida se presenta la capacidad de producción efectiva o real del proyecto:

Cuadro 5. Capacidad de Procesamiento y Producción Real de la Planta.

Porcentaje de Aprovechamiento GCR		23,26%	
Capacidad Procesamiento (ton GCR/mes)	Negro de Humo (Ton/mes)	Fuel Oil (Ton/mes)	Fuel Oil (gal/mes)
120	63	29	9.176

¹⁰⁴ ECOPETROL, Colombia. Catálogo de Productos, Combustóleo (Fuel Oil No 6), Especificaciones Técnicas. [En Línea]. [Citado 21 junio, 2017]. Disponible en: (http://www.ecopetrol.com.co/especiales/Catalogo_de_Productos/Combustibles6.html)

2.6.3. Porcentaje de participación de mercado. Con base al Cuadro 5 y el análisis de Demanda vs. Oferta -Ver Tablas 14 y 16-, se calculó la cuota de participación de mercado para cada producto para el año 2022, asumiendo una producción mensual constante:

Cuadro 6. Porcentaje de Participación de Mercado para ambos productos al año 2022.

Capacidad Procesamiento (ton GCR/mes)	Porcentaje de Participación de Mercado	
	Negro de Humo	Fuel Oil
120	56,15%	0,10%

2.7 MICROLOCALIZACIÓN DE LA PLANTA

La macrolocalización del proyecto abarca la ciudad de Bogotá D. C. debido a la disponibilidad geográfica de la materia prima; no obstante, para realizar la microlocalización del proyecto se evaluó tres locaciones posibles ubicadas en las afueras de la ciudad, correspondientes a parques o zonas industriales. Para determinar la microlocalización, se empleará el Método de Análisis Dimensional, el cual es un procedimiento de selección de localización basado en la eliminación sistemática de una entre dos alternativas comparadas¹⁰⁵.

Dicha selección parte de la identificación de factores locacionales que garantizan al proyecto utilizar al máximo las ventajas económicas, técnicas, geográficas, de seguridad y de infraestructura de la zona¹⁰⁶, estas ventajas recalcan la selección del método de análisis dimensional para la selección de la microlocalización.

2.7.1 Locaciones evaluadas. Las tres posibles microlocalizaciones evaluadas para el proyecto constituyen las principales zonas industriales ubicadas en las afueras de la ciudad, como lo son: Zona Industrial de Fontibón, Zona Industrial Autopista Norte y Zona Industrial de Madrid, identificadas como locación A, B y C respectivamente.

¹⁰⁵ Apuntes de preparación y evaluación de proyectos, El análisis dimensional. [En Línea]. [Citado 21 junio, 2017] Disponible en: (<http://proyectos.ingenotas.com/2012/09/>).

¹⁰⁶ MIRANDA. Op. Cit., p. 138.

2.7.2 Selección de localización según el método de análisis dimensional. A continuación, se muestra el desarrollo conceptual del método, que parte de generar una matriz de comparación entre posibles ubicaciones comparando factores críticos, objetivos y subjetivos, que poseen una jerarquía o prioridad. La prioridad que se le dio a cada uno de los factores mencionados anteriormente se muestra en el Cuadro 7 y fue establecida por el proyecto teniendo en cuenta su importancia en el proceso de pirólisis de GCR.

Cuadro 7. Prioridad de los factores analizados en la Microlocalización.

Factor	Tipo de Factor	Prioridad*
Infraestructura necesaria	Critico	3
Disposición de materia prima	Critico	5
Transporte	Subjetivo	4
Tarifas de arriendo	Objetivo	4
Tarifas de servicios	Objetivo	3

* *Se mide en escala de 1 a 5 con respecto a su importancia en general, donde 5 es la mayor prioridad. Donde los críticos son fundamentales en la operación de la planta como: infraestructura y disposición de materias primas, los factores objetivos son factores de interés en las necesidades y sostenibilidad de la empresa, como: costo de arriendo y de servicios, y por último los factores subjetivos, enfocados a la facilidad del transporte principalmente.*

Cuantitativamente el método estima índices de comparación entre las posibles opciones de locación escogidas mediante la siguiente expresión:

Ecuación 3. Índices de comparación de localizaciones.

$$I_{AB} = \prod_{k=1}^m \left[\frac{C_{AK}}{C_{BK}} \right]^{P_k}$$

Donde:

I = Índice de comparación de localizaciones.

K = factores considerados.

m = Numero total de K factores considerados.

C = Puntaje o costo de la localización i asociada al factor K.

P_k = Factor de Prioridad del factor K.

Fuente: Apuntes de preparación y evaluación de proyectos. Análisis Dimensional. En:

<http://proyectos.ingenotas.com/2012/09/>

Los factores a analizar se van a medir en forma de puntos o unidades monetarias en el caso de los servicios necesarios, en donde se consultó el precio de las tarifas para los servicios de agua y alcantarillado, comunicaciones y energía eléctrica para

uso industrial en la ciudad de Bogotá D.C.^{107,108}, luego se dividió en una base de 1000 para poder medir el factor en unidades monetarias. De la misma manera, los factores cualitativos se les asignó un puntaje netamente subjetivo dado el conocimiento de primera mano que se tuvo para cada locación evaluada.

Tabla 20. Factores De Análisis de Microlocalización.

Descripción-Factor	Unidad de Medida.	A (Fontibón)	B (AutoNorte)	C (Madrid)	Factor Prioridad
Factores Cuantitativos*					
Tarifa – Acueducto	Unidades (\$/m ³)	19,61	19,61	19,61	3
Tarifa – Alcantarillado	Unidades (\$/m ³)	11,37	11,37	11,37	3
Tarifa – Comunicaciones	Unidades (\$/mes)	200,00	200,00	200,00	3
Tarifa - Energía eléctrica	Unidades (\$/kWh)	0,53	0,53	0,53	3
Tarifa – Arriendo	Unidades (\$/m ²)	20,00	11,00	9,50	4
Factores Cualitativos**					
Infraestructura necesaria ¹⁰⁹	Puntos	1	7	4	3
Disposición de materia prima	Puntos	2	9	1	5
Transporte	Puntos	1	8	1	4

**Para acueducto, alcantarillado y energía eléctrica, las tarifas impuestas corresponden a tarifas vigentes dadas por las empresas que ofrecen el servicio para el sector industrial con contribución y en jornada diurna.*

***La escala definida para expresar la posición relativa de una opción de localización con respecto a la otra es de cero a diez, donde se asigna un puntaje menor a la mejor opción.*

De los factores cuantitativos expuestos en la Tabla 20, se concluyó que las tarifas para los servicios de acueducto, alcantarillado, comunicaciones y energía eléctrica son del mismo valor sin importar la locación, por su parte la tarifa de arriendo se diferencia ampliamente, siendo la opción C Madrid la que ofrece un mayor beneficio económico. Con respecto a los factores cualitativos, la opción A y C muestran una ventaja amplia frente a la opción B debido a su cercanía a la disposición y transporte de la materia prima, junto a una mayor disponibilidad de terreno para el montaje y operación del proceso (infraestructura necesaria).

Finalmente, se calculan los índices AB, AC y BC respectivamente, cuyo desarrollo matemático se muestra en el Anexo B. El análisis de los índices recae:

¹⁰⁷ Acueducto de Bogotá D.C. Servicios. Tarifas Cargo Fijo y Consumo año 2017. [En Línea]. [Citado 22 junio, 2017] Disponible en: (<http://www.acueducto.com.co/wpsv61/wps/portal>).

¹⁰⁸ Codensa, Bogotá D. C. Tarifas de Energía. [En Línea]. [Citado 22 junio, 2017] Disponible en: (<https://www.codensa.com.co/hogar/tarifas>).

¹⁰⁹ Hace referencia a la presencia de infraestructura física o construcción presente en el terreno presentado para cada locación evaluada en la microlocalización.

$I_{AB} > 1 =$ La localización B es mejor que la localización A
 $I_{AB} < 1 =$ La localización A es mejor que la localización B
 $I_{AB} = 1 =$ La localización B es indiferente a la localización A

Los resultados obtenidos al realizar los cálculos correspondientes se pueden observar en la Tabla 21.

Tabla 21. Índices de comparación.

I_{AB}	I_{AC}	I_{BC}
4,2E-09	9,8E+00	2,3E+09

Según los índices obtenidos la opción B resulta ser mejor que la A, de la misma manera la opción C resulta ser mejor que la A, por lo tanto, la localización de planta estaría dada por el índice I_{BC} el cual indica que la mejor opción para la ubicación de la planta corresponde a la opción C, es decir Madrid, Cundinamarca.

3. DISEÑO CONCEPTUAL

El diseño conceptual o síntesis de proceso es la etapa en la cual se arma la topología del proceso, es decir el esquema o diagrama de flujo básico que presenta la secuencia de operaciones necesarias para transformar las materias primas en los productos deseados. En este capítulo el diseño se desarrolló siguiendo la siguiente secuencia lógica:

- I. Identificación del Diagrama de Bloques y de Flujo de Proceso para la planta, junto a las corrientes involucradas en los equipos.
- II. Parametrización de criterios de diseño con respecto a: tipo de pirólisis, materia prima a procesar y los productos a obtener.
- III. Obtención de rendimientos de producción de los productos de interés por medio de experimentación en banco de laboratorio, junto a la determinación de temperatura y presión de operación para ciertas unidades de la planta.
- IV. Realización de los respectivos balances de masa de la planta en general y balances de energía para la unidad de reacción e intercambio térmico.
- V. Diseño Conceptual de los equipos principales que conforman la planta.
- VI. Descripción operacional o filosofía operacional del proceso.

3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

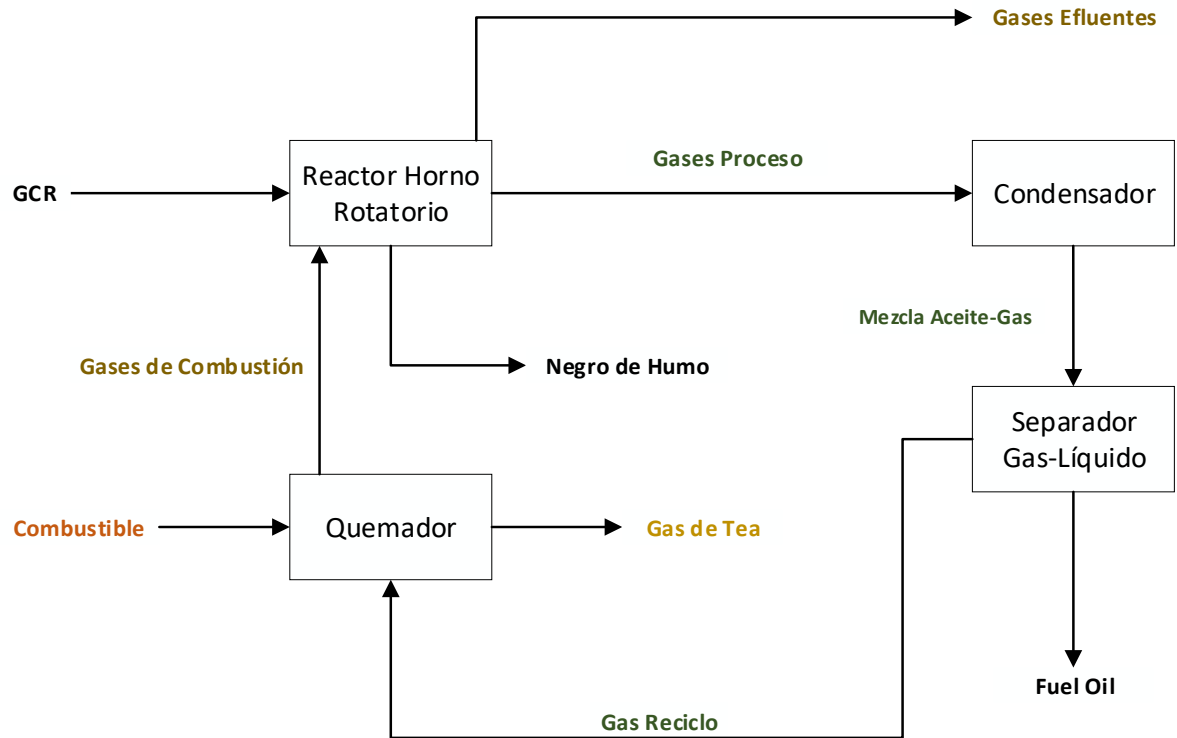
Mediante el uso de diagramas de flujo de proceso se representa la información técnica más relevante con respecto a los procesos y operaciones unitarias involucradas, con la finalidad de conocer cómo opera el proceso y la relación entre las unidades que conforman la planta, para ello se inicia con un diagrama de bloques el cual es una descripción básica del proceso y continúa con el diagrama de flujo de proceso que describe la planta más detalladamente.

3.1.1 Diagrama de bloques. El diagrama de flujo de bloques o BFD "*block flow diagram*" constituye el paso inicial en la comprensión del funcionamiento de la planta debido a que usa bloques los cuales representan los procesos y operaciones involucrados, estos están interconectados entre sí mediante corrientes de entrada y salida que constituyen flujos de materia prima, insumos, productos terminados, etc.¹¹⁰

Estos bloques describen la naturaleza de cada proceso y operación junto a las corrientes con las que interactúan los mismos, en la Figura 17 se presenta el BFD de la planta:

¹¹⁰ TURTON, Richard, *et al.* Diagrams for understanding chemical processes. En: Analysis, Synthesis, and design of Chemical Processes. 4 ed. USA: Pearson Education, 2012. p. 11-19.

Figura 17. Diagrama de Bloques de la Planta.



Con base a los esquemas tecnológicos presentados -Ver Sección 1.3.7- se evidencia que la mejor configuración para el tipo de pirólisis y configuración del reactor corresponde a pirólisis térmica convencional con un reactor de horno rotatorio de calentamiento indirecto con gases de combustión generados en un quemador o cámara de combustión; teniendo en cuenta que esta cámara hace parte del mismo reactor, dado que se construye un solo equipo. A su vez se decide implementar una sola etapa de condensación y posterior separación Gas-Líquido para la separación del Fuel Oil y los Gases no Condensables.

Por ende, en la Figura 17 la planta consta de un proceso unitario de reacción para llevar a cabo la pirólisis de GCR, que conduce a una unidad de intercambio de calor realizada en un condensador de contacto seco, luego se encuentra una operación unitaria de separación líquido-gas y finaliza con un proceso de aprovechamiento de gases que permite el calentamiento del reactor, lo cual se da en el quemador.

3.1.2 Diagrama de flujo de proceso. El diagrama de flujo de proceso o PFD "*process flow diagram*" representa el siguiente nivel de detalle del BFD descrito en la Figura 18, debido a que provee: información de los equipos representados en los bloques e información de las corrientes de proceso. Dicha información abarca condiciones de operación como: temperatura, presión, porcentajes de conversión, composición, entre otros; además, identifica cada equipo con un número o descripción y las corrientes involucradas con su respectiva enumeración¹¹¹.

En seguida se presenta el PFD de la planta, junto con la descripción de las corrientes de proceso presentes:

Tabla 22. Descripción de corrientes de proceso del diagrama PFD de la planta.

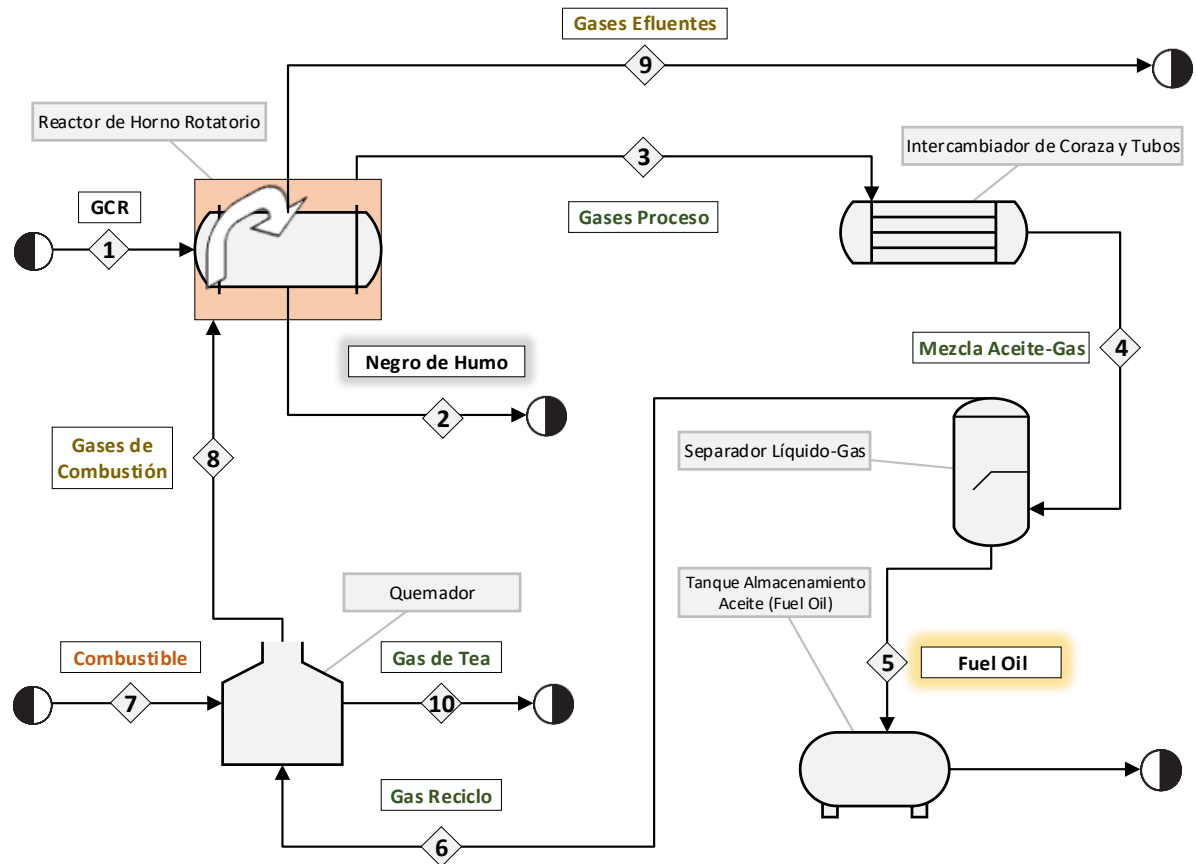
Corriente	Nombre	Descripción
1	GCR	Materia prima alimentada al proceso en forma sólida o granulada en cada <i>batch</i> o corrida.
2	Negro de Humo	Producto en fase sólida obtenido del proceso con diferente composición elemental y propiedades físicas, con respecto a la materia prima.
3	Gases Proceso	Gases volátiles obtenidos del reactor de horno rotatorio que contienen una fracción condensable y no condensable.
4	Mezcla Aceite-Gas	Mezcla Gas-Líquido obtenida del condensador en seco, la cual contiene la fracción condensada junto a los demás componentes volátiles.
5	Fuel Oil	Fracción condensada de los gases volátiles, considerado un producto del proceso.
6	Gas Reciclo	Corriente gaseosa obtenida del separador Gas-Líquido libre de componentes condensados, conocida como gases no condensables.
7	Combustible	Fuente de energía empleada en la operación del reactor, en forma de un combustible sólido, líquido o gaseoso; además, se emplea el gas de reciclo como fuente energética cuando este empieza su producción en el proceso.
8	Gases Combustión	Gases que provienen de la combustión de: combustible y del gas de reciclo alimentado al quemador.
9	Gases Efluentes	Gases efluentes o de emisión final del proceso.
10	Gas de Tea	Fracción de los gases no condensables no utilizada en el calentamiento del reactor, y son quemados en una Tea o flauta.

La Figura 18 muestra como el reactor de tipo horno rotatorio es de calentamiento indirecto con gases de combustión provenientes de la quema de carbón mineral o gas natural llevada a cabo en una cámara de combustión o quemador integrado al reactor; no obstante, el PFD representa los dos procesos por aparte para entender mejor la lógica del proceso.

¹¹¹ Ibid. p. 17.

La corriente efluente del reactor (Corriente 3) es homogénea, dado que no posee material sólido suspendido, la cual pasa por el condensador de tubos y coraza que emplea como fluido de servicio de enfriamiento agua, que permite reducir la temperatura del gas de proceso para que este se separe posteriormente en el equipo de separación bifásico gas-líquido en la fracción condensable o Fuel Oil (Corriente 5) y la fracción No Condensable (Corriente 6), finalmente se encuentra el tanque de almacenamiento de producto líquido, aceite o Fuel Oil.

Figura 18. Diagrama de Flujo de Proceso de la Planta.



3.2 CRITERIOS DE DISEÑO

Los criterios de diseño son factores o variables independientes que tienen la mayor injerencia en el proceso y por ende son tenidos en cuenta para llevar a cabo el diseño de la planta de producción en general. Dentro de estas variables se encuentran: tipo de pirólisis, materia prima a procesar, la naturaleza y propiedades físicas tanto de los productos obtenidos como de las corrientes involucradas en el PFD.

3.2.1 Tipo de pirólisis. La elección del tipo de pirólisis depende del producto de interés que se pretenda obtener en mayor proporción de los tres tipos posibles. Siendo la convencional la que permite obtener la gama de los tres productos en comparación a los demás tipos que permiten obtener ya sea sólo productos en fase sólida o en fase líquida -Ver Sección 1.3.5-.

Esta se caracteriza por: ausencia de catalizadores, de tipo lenta con tiempo de retención del orden de horas, de calentamiento indirecto, a presión atmosférica y obtención de los tres productos en fase sólida, líquida y gas¹¹². Se establece el tipo de calentamiento indirecto para llevar a cabo el diseño conceptual de la planta, junto a un reactor de tipo horno rotatorio -Ver Sección 1.3.6-, debido a su amplia aplicabilidad a escala industrial para este tipo de procesos al momento de permitir un mayor control de la temperatura de operación, junto a la versatilidad al momento de separar los productos de interés desde la unidad de reacción.

3.2.2 Tipo de reactor. El reactor elegido en el diseño de la planta corresponde a un reactor de horno rotatorio, este tipo de reactores reúne algunas ventajas en cuanto a la Transferencia de Calor, debido a que posee una mayor superficie de calentamiento o transferencia comparada con un reactor de lecho fijo o vertical estacionario -Ver Sección 1.3.5-.

Por otra parte, el movimiento continuo de los materiales en contacto con la superficie interna de transferencia, mejora enormemente los coeficientes de transferencia de calor; además evita la formación de costras o capas internas que están presentes en otro tipo de reactores¹¹³.

3.2.3 Caracterización de la materia prima. La materia prima a trabajar en el presente proyecto consiste en gránulo de caucho reciclado proveniente de NFU's generados por el desecho de los mismos luego de su tiempo de vida útil; este gránulo de caucho es fabricado y comercializado en distintas presentaciones por empresas en la ciudad de Bogotá D. C.

La empresa Gránulos de Caucho Reciclado SAS ubicada en Madrid -Cundinamarca, es una empresa dedicada a la producción de distintas granulometrías de GCR, allí, mediante procesos físicos las fibras textiles y metálicas son separadas del caucho del neumático, este caucho es triturado y comercializado como GCR. Esta empresa suministro la materia prima para la realización de las pruebas de laboratorio y se estableció que esta misma será la que la planta procesará a lo largo de su operación.

¹¹² MARTÍNEZ. Op. Cit., p. 179-213.

¹¹³CALDERÓN. Op. Cit., p. 38-44.

- **Condiciones físicas.** En el Cuadro 8 se presenta la caracterización física de la materia prima antes mencionada y que se va aprovechar por medio de pirólisis, que corresponde a un material granulado constituido por caucho de neumático libre de fibras textiles y metálicas.

Cuadro 8. Características físicas del GCR.

Características	
Malla N° (Según ASTM E 11-87) ¹¹⁴	10
Apertura Nominal (mm)	2
Color	Negro
Densidad (kg/m ³)*	360

**La densidad del material corresponde a la densidad aparente aireada, en donde se empaca y transporta de forma natural el material sin ningún tipo de compresión.*

- **Análisis Próximo y Elemental.** Estos análisis son metodologías analíticas que permiten identificar los constituyentes de materiales específicos, en este caso el granulo de caucho reciclado. Por un lado, el análisis próximo o inmediato representa el contenido de cenizas, carbono fijo, humedad y material volátil, mientras que el análisis elemental o último representa el porcentaje en peso de carbono, azufre, nitrógeno, hidrógeno y oxígeno.

Puesto que no fue posible realizar los análisis próximo y elemental dentro del presente proyecto, se recurrió a fuentes teóricas de distintos autores relacionados con el tema, con la intención de ponderar los valores y usar estos en el presente trabajo, los datos teóricos recopilados se pueden observar en la Tabla 23.

¹¹⁴ NEWARK WIRE CLOTH COMPANY. Test Sieves. [En Línea]. [Citado 24 enero, 2018] Disponible en: (<http://www.newarkwire.com/astm-e-11-test-sieves.html#5-dia>).

Tabla 23. Análisis Próximo y Elemental del GCR.

Referencia	Acosta ¹¹⁵	Williams ¹¹⁶	Li ¹¹⁷	Roy ¹¹⁸	Sánchez ¹¹⁹	Ponderado
Análisis próximo (Base Seca)						
Materia Volátil (%p)	66,20	67,04	62,96	68,63	71,48	67,33
Cenizas (%p)	6,15	2,42	4,4	6,42	3,84	4,65
Carbón Fijo (%p)	27,64	30,54	32,65	30,21	33,7	30,95
Análisis Elemental (Sin cenizas)						
C (%p)	86,00	85,9	88,95	86,79	76,94	84,92
N (%p)	1,68	0,4	0,52	0,53	0,33	0,69
H (%p)	7,55	8,00	7,10	7,56	7,52	7,55
S (%p)	1,60	1,00	1,60	1,49	1,59	1,46
O (%p)	3,15	4,70	1,83	3,62	13,57	5,37

- **Composición Química.** Como se mencionó en la Sección 1.1.1, Los principales componentes del caucho de un neumático son: caucho natural (NR), caucho de estireno butadieno (SBR), polibutadieno y caucho butílico, con pequeñas cantidades de aditivos orgánicos e inorgánicos (Ver Tabla 1).

3.2.4 Naturaleza y propiedades físicas de los productos.

- **Negro de humo.** Constituye el producto en fase sólida que se extrae del reactor al finalizar cada *batch*, con diferente composición y estructura microscópica; también conocido como Carbonilla o Carbón Pirofítico.

¹¹⁵ ACOSTA. Op. Cit., p. 139-145.

¹¹⁶ WILLIAMS, P.T *et al.* Combustion of tyre pyrolysis Oil. En: Process Safety Environmental Protection. 1998. vol 76, p. 291-301.

¹¹⁷ LI. Op Cit., p. 5133-5145. LI, S.Q. *et al.* Pilot-Scale pyrolysis of scrap tyres in a continuous rotatory kiln reactor. En: Industrial & Engineering Chemistry Research. Junio, 2004. vol 43, p. 5133-5145.

¹¹⁸ ROY, C. *et al.* Pilot-Scale plant demonstration of used tyres vacuum pyrolysis. En: Pyrolysis and Gasification. 1989.

¹¹⁹ SÁNCHEZ. Op. Cit., p. 18-21.

- **Gases de proceso (fuel Oil y gases no condensables).** El aceite producido en la planta o Fuel Oil es una mezcla compleja de hidrocarburos de diferente naturaleza- Ver Sección 1.3.3-, su composición se expresa en términos de una curva de destilación atmosférica que relaciona la temperatura de destilación “*normal boiling point*” (NBP) con respecto a porcentajes volumétricos de los destilados obtenidos.

Por su parte, la composición de la fracción volátil o Gases de Proceso (Corriente 3) puede ser obtenida de técnicas de cromatografía y termogravimétricas expresada en porcentajes volumétricos o molares, debido a que el comportamiento de esta mezcla de gases a la temperatura trabajada de 450-650°C en la Corriente 3 es ideal. En la Tabla 24 se observa la composición de la fracción volátil o Corriente 3, obtenida de la literatura¹²⁰.

Tabla 24. Composición Corriente Gas Proceso.

Fracción No Condensable (Corriente 6)			Fracción Condensable (Corriente 5)	
Nombre Compuesto	Formula Molecular	% Molar	Punto Ebullición (°C)	% Molar
Agua	H ₂ O	0,25	85	3,26
Nitrógeno Molecular	N ₂	5,1	99	3,21
Sulfuro de Hidrógeno	H ₂ S	1,62	110	2,41
Monóxido de Carbono	CO	2,92	128	1,27
Dióxido de Carbono	CO ₂	3,95	141	1,46
Hidrógeno Molecular	H ₂	3,95	156	1,99
Metano	CH ₄	8,99	170	3,22
Etano	C ₂ H ₆	4,36	182	3
Propano	C ₃ H ₈	4,04	196	1,79
Etileno	C ₂ H ₄	2,92	211	1,37
Propileno	C ₃ H ₆	1,84	225	1,39
1-buteno	C ₄ H ₈	8,04	239	1,4
n-butano	C ₄ H ₁₀	1,8	253	1,33
n-pentano	C ₅ H ₁₂	1,62	267	1,26
2,3-metil-1-buteno	C ₆ H ₁₂	0,72	281	1,24
3-metilpentano	C ₆ H ₁₄	0,4	295	1,25
2-metil-2-buteno	C ₅ H ₁₀	1,71	309	1,29

Fuente: MURILLO, Ramón. Process for the Separation of Gas Products from Waste Tyre Pyrolysis. En: Industrial & Engineering Chemistry Research, 2006.

En la Tabla 25 se presenta la composición de la fracción condensable de la Corriente 3, es decir el Fuel Oil o Corriente 5 según sus puntos de ebullición.

¹²⁰ MURILLO, R. *et al.* Process for the Separation of Gas Products from Waste Tyre Pyrolysis. En: Industrial & Engineering Chemistry Research. Abril, 2006. vol 45, p. 1734-1738.

Tabla 25. Composición Molar de la Fracción Condensable según Puntos de Ebullición.

Fracción Condensable (Corriente 5)	
Punto Ebullición (°C)	% Molar
323	1,35
337	1,53
351	1,77
366	2,11
377	3,78
390	3,07

Fuente: MURILLO, Ramón. Process for the Separation of Gas Products from Waste Tyre Pyrolysis. En: Industrial & Engineering Chemistry Research, 2006.

Lo anterior permite simular las propiedades físicas y químicas de las Corrientes 3, 4, 5 y 6 empleando un software de simulación de proceso, se hizo uso de Aspen HYSYS 8.8 para estimar la densidad, la capacidad calorífica (Cp) y la fracción de vapor o calidad teniendo en cuenta la temperatura y presión de cada corriente. Estas propiedades son vitales en el dimensionamiento y diseño del intercambiador de calor y del separador bifásico gas-líquido; los valores finales obtenidos de dichas propiedades se muestran en los balances de masa y energía de la planta –Ver Sección 3.5-.

3.2.5 Rendimientos teóricos producción. La recopilación de resultados obtenidos por varios autores bajo distintas condiciones de operación, se observa a continuación¹²¹:

¹²¹ MARTÍNEZ. Op. Cit., p. 189-196.

Tabla 26. Rendimientos Teóricos de producción para diferentes configuraciones de reactor.

Rendimientos promedio			Temperatura (°C)	Tipo de reactor
Gas (wt%)	Líquido (wt%)	Sólido (wt%)		
17,9	41,5	40,6	600	Reactor de tornillo
29,7	31,3	39,0	700	
31,5	27,5	41,0	800	
9,0	47,0	44,0	425	Reactor de lecho fijo
10,0	49,0	41,0	425	
19,0	41,0	40,0	575	
4,5	58,1	37,4	450	Reactor de lecho fijo a gran escala
5,2	56,9	37,8	525	
8,9	53,1	38,0	600	
6,0	55,4	38,6	500	Reactor de lecho fijo
10,8	52,2	37,0	600	
26,7	36,6	36,7	700	
14,0	46,0	38,0	500	Reactor de lecho fijo continuo
18,0	43,0	38,0	600	
22,0	38,0	38,0	700	
2,4	38,1	49,1	550	Reactor horno rotatorio
8,2	33,0	47,4	600	
10,7	31,8	48,9	680	

Fuente: MARTÍNEZ, Juan. Waste tyre pyrolysis-A review. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013.

La revisión bibliográfica presentada en la Tabla 26, permitió elegir los diferentes niveles de temperatura a escoger para el procedimiento experimental que se llevó a cabo en el banco de laboratorio; estos niveles iniciaron en 450°C y se incrementaron en 50°C hasta llegar a 650°C. Teniendo en cuenta que estos niveles de temperatura corresponden a la temperatura del sistema de calentamiento y no a la temperatura de la masa de reacción, la cual se prevé se encuentre entre 450°C y 550°C es decir el rango de descomposición térmica del caucho-Ver Sección 1.3.4-.

3.3 DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE RENDIMIENTOS DE NEGRO DE HUMO Y FUEL OIL

Para el diseño conceptual de la planta se realizaron procedimientos experimentales a nivel laboratorio con la materia prima seleccionada para comparar los rendimientos teóricos de producción con respecto a los obtenidos experimentalmente. Vale la pena aclarar que únicamente se llevara a cabo experimentos en la unidad reactiva, ya que de las proporciones obtenidas en el reactor de fase sólida y fase gaseosa va a depender el diseño en general de la planta.

Se realizó una selección de las condiciones que mejor trabajan en la pirólisis de GCR, con el fin de: identificar la proporción de las fases obtenidas de gas, líquido y sólido que van a seguir el proceso dentro de la planta y tomarlo como base para el diseño de los equipos que siguen dentro del proceso de producción a nivel industrial.

3.3.1 Montaje experimental. Los equipos para llevar a cabo las corridas experimentales del proceso de pirólisis de GCR a nivel de laboratorio, fueron suministrados por la empresa: Dr. Calderón Laboratorios Asistencia Técnica Agrícola, ubicada en la AK 20 N 87- 81 en Bogotá D. C.

La Figura 19 muestra el montaje completo donde se llevaron a cabo los ensayos de pirólisis de GCR:

Figura 19. Montaje a Nivel de Laboratorio empleado para la pirólisis de GCR.

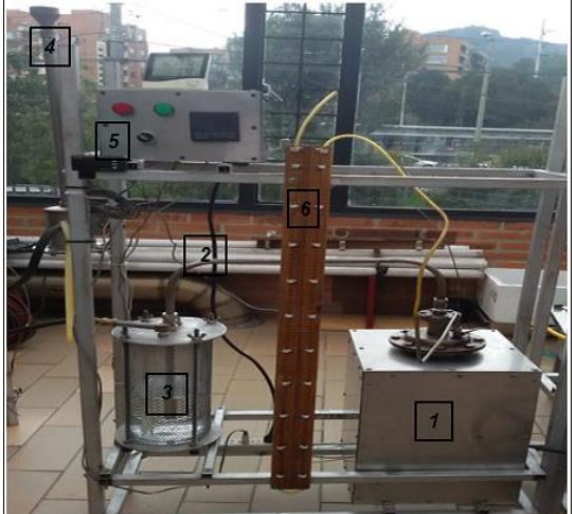


Aunque el diseño conceptual de la planta comprende un reactor de horno rotatorio con un proceso de condensación de vía seca es decir empleando un intercambiador de calor; a nivel de laboratorio se cumple el mismo principio de funcionamiento del proceso de pirólisis, el cual consiste en un proceso de descomposición térmica a presión atmosférica en ausencia de catalizador llevado a cabo por *batch* o lotes en donde se descompone el GCR en dos productos principales como lo son: la fracción condensable de los volátiles producidos obtenida de un proceso de condensación en húmedo por medio de un trampa de gases y la fracción en fase sólida remanente.

Además, en el Cuadro 9 se presenta la identificación de las partes del montaje de la Figura 19 con sus posteriores especificaciones y funcionamiento¹²²:

¹²² MESA. Op. Cit., p. 39-42.

Cuadro 9. Montaje Experimental empleado en la determinación de los rendimientos de producción.

Montaje	Partes
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Reactor <i>Batch</i> de Lecho Fijo. 2. Conector de Gases. 3. Condensador en húmedo. 4. Tea. 5. Controladores de temperatura. 6. Medidor de presión diferencial.

Fuente: Evaluación del proceso de pirólisis para la producción de diésel a nivel de laboratorio a partir de residuos de plásticos de industria de alimentos, 2016.

- **Reactor *Batch*.** El reactor consta de un cilindro vertical construido en acero inoxidable, con capacidad de 3 L, rodeado por una resistencia eléctrica en el fondo y distribuida a lo largo del reactor, activada por un controlador PID; Además cuenta con un aislamiento en cerámica y ladrillo contenidos dentro de una caja metálica. Este tipo de reactor es conocido como “marmita vertical” o reactor de lecho fijo, y se presenta en la Figura 20.

Las dimensiones del reactor corresponden a diámetro externo e interno de 0.230m y 0.173m respectivamente, con una profundidad de 0.382 m.

Figura 20. Reactor tipo marmita vertical.



- **Conector de gases.** El tubo está fabricado en acero inoxidable y este tiene como función conectar el reactor de pirolisis al condensador en húmedo por la parte superior de ambos equipos, permiti3endo el desplazamiento de los gases condensables y no condensables, ver Figura 21.

Figura 21. Conector de Gases.



El diámetro interno y externo de la tubería corresponden a 0.40m y 0.495 m respectivamente

- **Condensador en húmedo.** Es un recipiente en donde se almacena el agua de enfriamiento que se encuentra a temperatura ambiente, aproximadamente a 20°C, que permite un contacto directo con el efluente gaseoso proveniente del reactor, dando lugar a la condensación de la fracción condensable o aceite pirolítico que posteriormente va a ser extraído por decantación.

Este permite también el paso de los gases no condensables a la Tea y posee una malla metálica protectora alrededor del vidrio, Ver Figura 22.

Figura 22. Condensador en Húmedo o trampa de gases condensables.



El diámetro externo e interno del condensador corresponden a de 0.155m y 0.14m respectivamente, con una profundidad de 0.35 m.

- **Quemador de gases de proceso (Tea).** En la parte exterior del condensador en húmedo, se encuentra una conexión hacia un quemador de gases que recibe los gases no condensables en el proceso, para que puedan ser quemados y posteriormente expulsados al exterior del sistema, Ver Figura 23.

Figura 23. Quemador de gases de proceso no condensables, Tea.



- **Controladores e Indicadores de temperatura.** El montaje posee un controlador y un indicador de temperatura ó termocupla conectados en el fondo del reactor y en la tapa de la pared externa del mismo, respectivamente. El indicador permite observar la temperatura en la parte superior del proceso, mientras que el controlador en la parte inferior indica y controla la temperatura de la unidad de reacción, Ver Figura 24.

No obstante, el controlador no posee una forma para programar la rampa o rata de calentamiento deseada para cada ensayo, dado que solo permite ajustar la temperatura máxima deseada en grados Celsius.

Figura 24. Controlador e indicador de temperatura.



- **Medidor de presión diferencial.** El montaje cuenta con un medidor de presión diferencial que hace uso de un manómetro de tubo en U para medir la presión del efluente volátil del reactor en centímetros de agua (cm.c.a), con respecto a la presión ambiente del laboratorio.

3.3.2 Metodología experimental. Se realizaron un total de 5 ensayos experimentales a diferentes temperaturas de operación y a un tiempo de residencia y presión constante para identificar y seleccionar definitivamente cuáles serán las condiciones precisas dentro del reactor para el diseño conceptual de la planta. La descripción de las condiciones para cada ensayo se muestra en el Cuadro 10:

Cuadro 10. Especificaciones de los ensayos realizados.

Ensayo	Materia Prima (kg)	Temperatura Reactor (°C)	Presión (kPa)	Tiempo de Residencia (horas)	Tiempo total por corrida (horas)
1	0,5	450	74,60	4	12
2	0,5	500	74,60		
3	0,5	550	74,60		
4	0,5	600	74,60		
5	0,5	650	74,60		

La metodología seguida inicio con el ensamblaje de los módulos del montaje mostrado en el Cuadro 9 y la verificación de las conexiones y funcionamiento de cada uno de los equipos que hacen parte de la instalación. Posteriormente se realizó la preparación de la materia prima que va a ser sometida a pirólisis (GCR malla 10 suministrado por la empresa GCR Soluciones S.A ubicada en Madrid-Cundinamarca), asegurándose de que se encontraba libre de impurezas, esta se distribuyó en muestras de 0,5 kg (cantidad que se usó por ensayo). Antes de iniciar el proceso se cargó la trampa de enfriamiento para gases condensables con 2,5 L de agua a 10°C aproximadamente.

El reactor se cargó con la cantidad de materia prima antes mencionada a condiciones ambiente para la ciudad de Bogotá D. C., luego se cerró herméticamente la unidad de reacción empleando un empaque marca “Cranflex” y se dio inicio al proceso de calentamiento indirecto por medio de una resistencia eléctrica hasta llegar a la temperatura tope establecida para cada corrida. El tiempo total transcurrido por ensayo fue de doce horas, de las cuales: una hora se destinó a la puesta en marcha y estabilización del proceso, tres horas de tiempo de residencia del GCR dentro del reactor y finalmente ocho horas en el enfriamiento del montaje experimental y en la determinada extracción y pesaje de los productos; en el Anexo J se presenta el protocolo seguido para llevar a cabo las corridas experimentales.

3.3.3 Resultados. El Anexo C contiene los resultados obtenidos de la experimentación en donde se presentan las mediciones de temperatura de la parte superior e inferior del reactor junto a la medición de la presión del sistema con respecto al tiempo de reacción establecido, además se presenta la cantidad de productos obtenidos.

- **Rendimientos de producción vs temperatura de operación.** En seguida se muestran los resultados de los rendimientos de producción obtenidos para Negro de Humo, Fuel Oil y Gases No condensables, dichos rendimientos son determinados mediante gravimetría de acuerdo a la siguiente expresión:

Ecuación 4. Rendimiento de Producción.

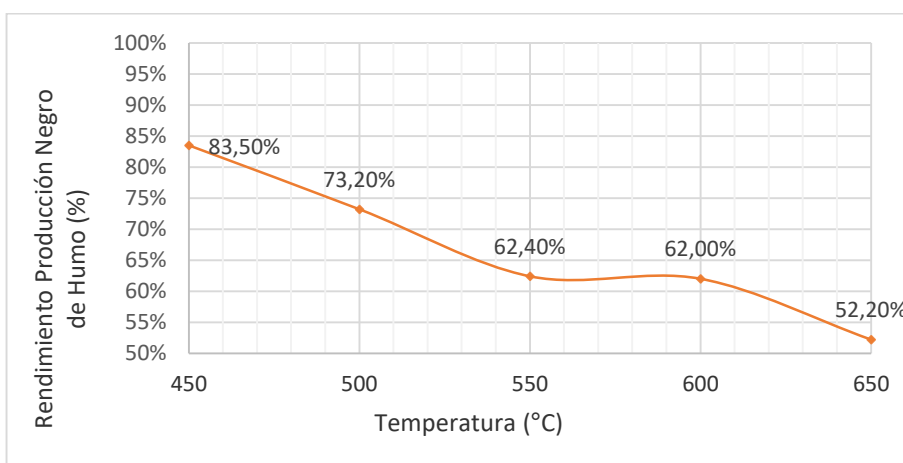
$$\text{Rendimiento Producción (\%)} = \frac{\text{masa producto obtenido (g)}}{\text{masa materia prima (g)}} * 100\%$$

Tabla 27. Rendimientos Experimentales Obtenidos en la pirólisis de GCR.

T (°C)	Rendimiento Negro de Humo (%)	Rendimiento Fuel Oil (%)	Rendimiento Gas (%)
450	83,50%	4,20%	12,30%
500	73,20%	11,60%	15,20%
550	62,40%	15,60%	22,00%
600	62,00%	15,80%	22,20%
650	52,20%	23,80%	24,00%

La Gráfica 19 presenta el comportamiento gráfico del rendimiento de Negro de Humo en función de la temperatura de operación del reactor:

Gráfica 19. Rendimiento de Producción de Negro de Humo con respecto a la Temperatura de Operación en la Unidad de Reacción.



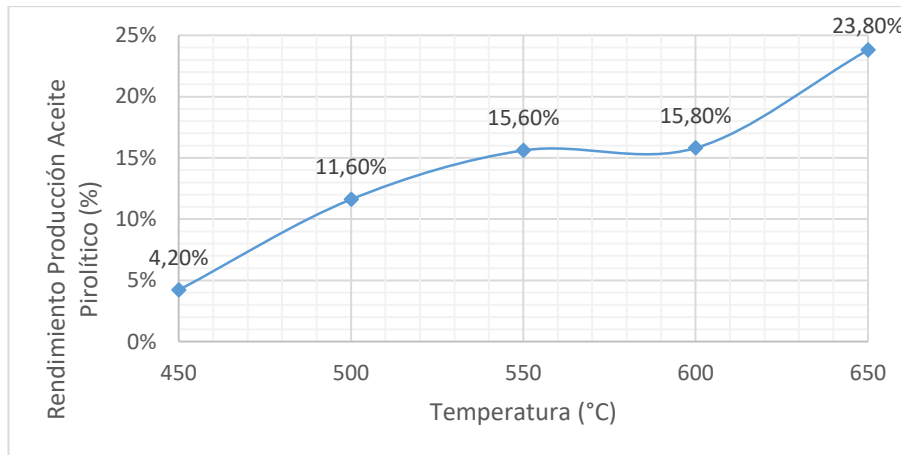
Para el caso de las temperaturas de 450°C y 500°C, el residuo sólido obtenido no es totalmente Negro de Humo debido a que la pérdida de masa de la materia prima alimentada no supera el 30%; en donde la pérdida de masa constituye la suma del porcentaje de Fuel Oil y Gases No condensables producidos. Lo cual equivale a rendimientos de producción de Negro de Humo superiores al 70%¹²³.

Adicionalmente, en la Gráfica 19 se observa una disminución en el rendimiento de producción de Negro de Humo o producto en fase en sólida conforme se incrementa la temperatura de operación por encima de los 500°C, esto se debe principalmente al incremento en la tasa de transferencia de calor y mayor proporción en las reacciones de descomposición térmica que favorecen la formación de una fase volátil. En donde la fase volátil está compuesta de los gases condensables y no condensables que conforman el Fuel Oil y Gas de proceso generados en el proceso de pirólisis.

¹²³ ACOSTA. Op. Cit., p. 141.

De la misma forma la Gráfica 20 muestra el comportamiento gráfico del rendimiento de Fuel Oil en función de la temperatura de operación del reactor:

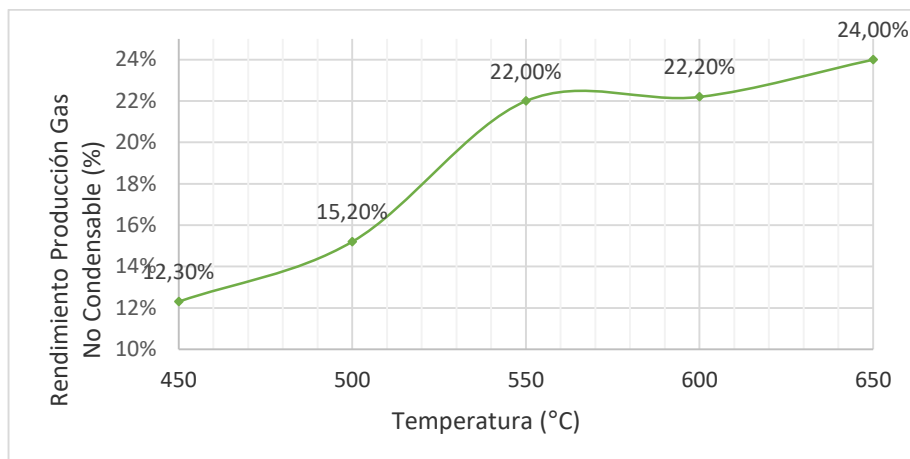
Gráfica 20. Rendimiento de Producción de Fuel Oil con respecto a la Temperatura de Operación en la Unidad de Reacción.



Por su parte, la Gráfica 20 muestra como el rendimiento en la producción de Fuel Oil ó Aceite Pirolítico es proporcional al aumento de la temperatura debido a la generación de una mayor fase volátil tal como se mencionó anteriormente, asimismo a mayor energía térmica dentro del sistema se favorecen las reacciones de descomposición térmica de los constituyentes del GCR en compuestos de menor masa molecular, lo cual se conoce como cracking térmico.

Además, se deduce que a temperaturas de operación menores de 450°C este tipo de pirólisis es inviable prácticamente debido a que nos hay pérdidas de masa causadas por la descomposición térmica -Ver Sección 1.3.4-. En comparación el rango de temperatura adecuado para el proceso está entre 600-650°C, teniendo en cuenta que esta temperatura corresponde a la pared externa del reactor y no a la temperatura interior del GCR alimentado. La Gráfica 21 muestra el comportamiento gráfico del rendimiento de gases no condensables en función de la temperatura de operación del reactor:

Gráfica 21. Rendimiento de Producción de Gas no Condensable con respecto a la Temperatura de Operación en la Unidad de Reacción.



De igual manera, en la Gráfica 21 se observa una relación proporcional entre la producción de fracción gaseosa no condensable con respecto a la temperatura de operación, esta fracción está compuesta principalmente por: H₂, CO, CH₄, C₂H₄, C₂H₆ y CO₂; cuya composición tiene como base, índices de generación establecidos por cromatografía de gases de procesos de pirólisis de llantas, que fueron consultados en la literatura.¹²⁴

En resumen, por cada tonelada procesada de GCR se obtienen: 522 kg de Negro de Humo y 238 kg de Fuel Oil, en donde los 240 kg restantes corresponden a gases no condensables generados en el proceso, debido a los rendimientos porcentuales de producción obtenidos de 52,20% de Negro de Humo y 23,80% de Fuel Oil para una temperatura de operación de 650°C en el sistema de calentamiento indirecto al reactor.

- **Comportamiento de la presión de operación.** Otra variable a analizar corresponde a la presión de operación del sistema, que se midió empleando el medidor de presión diferencial de agua que tiene el montaje experimental -Ver Figura 11-, la gráfica de esta medición en función del tiempo para cada temperatura trabajada se presenta a continuación:

¹²⁴ GONZÁLEZ. Op. Cit.,p. 667-683.

Gráfica 22. Comportamiento de la Presión de Operación del sistema en función del Tiempo a diferentes Temperaturas.



Por medio de la Gráfica 22 para el rango de temperatura trabajado se observa que la presión de operación no es mayor a los 76.400 Pa (76,4 kPa) ó 573,05 mm Hg, esto implica que el proceso es viable realizarlo a presión ambiente o atmosférica, que para el caso de Bogotá D.C es de 74.660 Pa o 560 mm Hg¹²⁵. Para temperaturas por debajo de 550°C, la presión no supera los 75.800 Pa y se estabiliza aproximadamente luego de 1 hora de operación, en el caso de 650°C la presión se estabiliza cerca de las 3 horas de operación bajo el mismo valor.

3.4 DISEÑO DE EQUIPOS PRINCIPALES

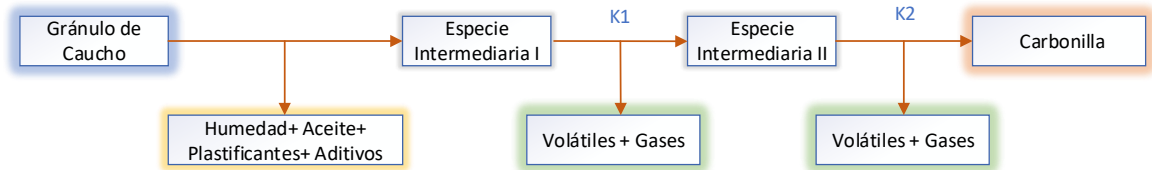
El diseño conceptual de los equipos identificados en el diagrama de flujo de proceso que conforman la planta-Ver Figura 18-, abarca parámetros tales como: dimensionamiento y material de construcción, condiciones y tiempos de operación junto con los servicios auxiliares necesarios para su funcionamiento.

3.4.1 Diseño unidad de reacción. Como se mencionó anteriormente el tipo de pirólisis del proceso es: térmica, lenta con tiempos del orden de horas, de calentamiento indirecto con gases de combustión y a presión atmosférica en atmósfera libre de oxígeno; lo anterior se llevará cabo en un reactor del tipo horno rotatorio el cual opera en forma discontinua o *batch* con remoción continua de los gases de proceso generados por tiro natural, que permite que la presión de operación sea constante y no supere los 76,4 kPa.

¹²⁵Diseño e Ingeniería de Ventilación y Climatización. Presión Atmosférica. [En Línea]. [Citado 17 enero, 2018] disponible en: (<https://efrainpuerto.wordpress.com/2011/02/26/f1-2/>).

Inicialmente, se analizó la cinética de reacción para el proceso de degradación térmica de GCR que asume la materia prima constituida principalmente por: caucho natural (NR), caucho estireno butadieno (SBR) y caucho butílico (BR), en donde la reacción se representa de la siguiente manera¹²⁶:

Figura 25. Diagrama del proceso de degradación térmica de GCR.



Fuente: LEUNG, D.Y. Kinetic Study of scrap tyre pyrolysis and combustion. En: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 1998.

La complejidad de la reacción de descomposición implica especies intermediarias generadas y dos etapas de reacción endotérmicas en donde la rapidez de reacción puede ser modelada bajo la Ley de Arrhenius de primer orden de reacción¹²⁷. No obstante, la reacción puede ser generalizada bajo una reacción de un solo paso de carácter endotérmico que sigue una cinética de primer orden, siempre y cuando se realice isotérmicamente la operación, esto conduce a modelar la reacción como:



Los cálculos y resolución de ecuaciones respectivas al reactor, se presentan en el Anexo D. La rapidez de reacción se expresa de la siguiente manera:

Ecuación 5. Constante de Velocidad de Reacción.

$$K_1 = K_0 * \exp\left(\frac{-Ea}{RT}\right)$$

A su vez, la expresión de la velocidad de reacción o desaparición de GCR en términos de la conversión se reduce a:

Ecuación 6. Cinética de Reacción Propuesta.

$$-r_{GCR} = K_1 * (C_{GCR})^1 \qquad C_{GCR} = C_0 * (1 - X)$$

¹²⁶ LEUNG, D.Y; WANG, C.L. Kinetic study of scrap tyre pyrolysis and combustion. En: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. febrero, 1998. vol. 45, p. 153-169.

¹²⁷ JUMA. Op. Cit.,p. 22-23.

Ecuación 7. Cinética de Reacción en Función de la Conversión.

$$-r_{GCR} = \left[K_0 * \exp\left(\frac{-Ea}{RT}\right) \right] * C_0(1 - X)$$

Teóricamente la conversión se define como el cambio de moles del reactivo de interés con respecto al reactivo alimentado, en este tipo de procesos de descomposición térmica de componentes complejos como el GCR, la conversión es equivalente a la siguiente expresión:

Ecuación 8. Definición de Conversión.

$$X = \frac{\text{moles reaccionan}}{\text{moles alimentadas}} = \frac{\text{pérdida de masa de GCR}}{\text{masa inicial de GCR}}$$

Esto se debe a que no se cuenta con una caracterización elemental tanto del GCR y de los productos generados como: Negro de Humo, Fuel Oil y Gases No Condensables para establecer los balances y ecuaciones de diseño en términos de moles. La conversión es equivalente a la suma de los rendimientos porcentuales de Fuel Oil y Gases No Condensables:

Ecuación 9. Definición de la Conversión como Pérdida de Peso.

$$X = \frac{m_0 - m_{\text{Negro de Humo}}}{m_0} = \frac{m_{\text{Fuel Oil}} + m_{\text{Gas no condensable}}}{m_0}$$

La ecuación de diseño del balance másico de un reactor *Batch* en términos de la conversión asumiendo un volumen de reacción constante se presenta en seguida¹²⁸:

Ecuación 10. Ecuación de Diseño para un reactor *Batch*.

$$\frac{\partial C_{GCR}}{\partial t} = r_{GCR}$$

Empleando la Ecuación 7 y 10, se puede obtener la conversión en función del tiempo, bajo la cinética propuesta de primer orden que cumple la Ley de Arrhenius:

Ecuación 11. Ecuación de Diseño en función de la conversión.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \left[K_0 * \exp\left(\frac{-Ea}{RT}\right) \right] * (1 - X)$$

¹²⁸ FOGLER, Scott. Balances Molares. En: Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas. 4 ed. Pearson Education. México, 2008. p. 1-10.

La Ecuación 11 permite obtener el tiempo total de reacción en minutos que se requiere para alcanzar determinada conversión, en este caso dado que el máximo rendimiento porcentual de producción se dio a 650°C con porcentajes para Negro de Humo, Fuel Oil y Gases No Condensables de 52,20%, 23,80% y 24% respectivamente, que equivale a una conversión del 47,80% o 0,4780.

La temperatura de reacción dentro del reactor es de 600°C debido a la naturaleza de la reacción, que es de carácter endotérmica, por lo tanto, toma energía de la pared externa del reactor que se encuentra a 650°C. Además, los valores de K_0 y E_a escogidos de estudios de termogravimetría y termogravimetría diferencial realizados sobre gránulo de caucho para diferentes valores de conversión¹²⁹ se incluyen en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Parámetros Cinéticos del Reactor.

X (conversión)	0,478
Ko (min^{-1})	1,08E+08
Ea (kJ/mol)	194,24
T (°C)	600
T (K)	873,15

Fuente: CHEROP, P.T. Kinetics of granulated scrap tyre pyrolysis via thermogravimetry. En: Proceedings of the Sustainable Research and Innovation Conference. 2017.

Al resolver la Ecuación 14 entre $X=0$ y $X=0.478$, el tiempo de reacción sin contar el tiempo de enfriamiento y puesta en marcha se muestra a continuación.

Cuadro 12. Tiempo de Operación del Reactor de Horno Rotatorio.

t (min)	2512.05
t (h)	41.87
t(día)	1.744

Dado que el tiempo de operación del reactor es de 41.87 horas o 1.74 días, el tiempo de operación por *batch* se modificó de 24 horas a 48 horas es decir que cada *batch* se procesa completo en dos días de operación, conllevando a que la operación se lleve a cabo 3 veces por semana o en seis días a la semana.

¹²⁹ CHEROP, P. T, *et al.* Kinetics of granulated scrap tyre pyrolysis via thermogravimetry. En: Proceedings of the Sustainable Research and Innovation Conference. Mayo, 2017. vol. 45, p. 1-6.

- **Dimensionamiento y especificaciones técnicas.** Con respecto al volumen del cuerpo del reactor, este se calculó con base a la capacidad de procesamiento de GCR establecida por *batch* que corresponde a 10 toneladas métrica de materia prima en forma granulada con una densidad aparente aireada de 360 kg/m^3 , lo anterior permite estimar el volumen neto que ocuparía el cargue de la materia prima en el reactor de una forma natural, es decir sin ningún tipo de compresión o compactación.

Por medio de la Ecuación 22 -Ver Anexo D- se calculó que el volumen del reactor o del espacio donde se va a llevar a cabo la reacción de pirólisis debe ser de 28m^3 . Adicionalmente, la geometría de este tipo de reactores de horno rotatorio es de carácter cilíndrica y comercialmente sus dimensiones son¹³⁰: 6,2m de largo con un diámetro de 2,8m, obviando el respectivo aislante o carcaza y demás componentes del equipo; lo cual se conoce como cuerpo del reactor.

Figura 26. Cuerpo del Reactor de Horno Rotatorio para Pirólisis.



Fuente: Beston Machinery Co, 2017.

Como parámetro de diseño se estableció que el largo (L) de la unidad de reacción es de 6m, con lo cual se calculó el diámetro (\emptyset) y radio (r) con base al volumen de un cilindro de 28m^3 . Asimismo, se calculó perímetro (P) de dicho radio, con el fin de estimar el área de contacto externo o de transferencia del sistema de reacción, esto se muestra en el Cuadro 13:

¹³⁰ BESTON. Tyre Recycling Pyrolysis Plant Project Report. [En Línea]. [Citado 3 noviembre, 2017] disponible en: (<http://bestonpyrolysisplant.com/tyre-recycling-pyrolysis-plant-project-report/>).

Cuadro 13. Dimensiones del cuerpo del Reactor.

Volumen (m³)	28
Largo (m)	6
Diámetro (m)	2,44
Radio (m)	1,22
Área de Transferencia (m²)	46

Dado que la temperatura de operación del reactor oscilara entre 650-500°C se da un perfil térmico inherente a la geometría junto a una presión de operación no superior a 76,4 kPa, se seleccionó un Acero Inoxidable Ferrítico de referencia 3CR12 con un espesor de 5/8" (15,87mm) debido a su resistencia a la corrosión y abrasión en ambientes de altas temperaturas (800°C)¹³¹.

Teniendo en cuenta el espacio para la chaqueta de calentamiento, el cuerpo del reactor debe ser aislado con concreto refractario y lana de roca más una carcasa o coraza fabricada en Acero al Carbono de referencia A516 de espesor de 3/8" (9,52mm). Por lo tanto, para poder estimar la distribución radial o espacial dada a cada capa o recubrimiento con respecto al cuerpo del reactor, se extrapolo los valores de diseño de un reactor de horno rotatorio de una planta piloto con capacidad de procesamiento de 350 kg/ *batch*¹³², diseñado en el marco del proyecto: Plasticocombustibles, realizado por la empresa Dr. Calderón Laboratorios Asistencia Técnica Agrícola, ubicada en la AK 20 N 87- 81 en Bogotá D. C.; cuya finalidad es obtener aceites combustibles a partir de pirólisis de plástico de desecho.

Con base, a dichas heurísticas -Ver Anexo D- se estimó dicha distribución radial y ancho de: espacio de calentamiento, aislantes y coraza, para un cuerpo de reactor de 6m de largo con un diámetro de 2,44m y radio de 1,22m:

Cuadro 14. Ancho de la chaqueta de calentamiento, aislantes y coraza.

Ancho Chaqueta Calentamiento (m)	0,32
Ancho Concreto Refractario (m)	0,18
Ancho Lana de Roca (m)	0,125

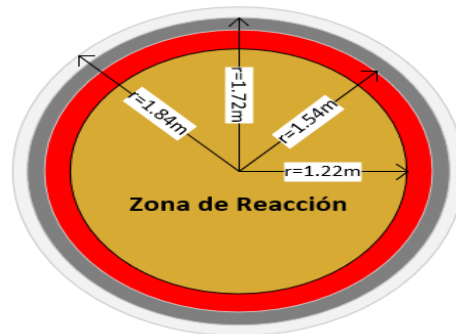
Las dimensiones y la distribución radial de las partes subsiguientes al cuerpo del reactor se presentan en un corte transversal del mismo en la Figura 27; en donde, se aprecian los radios netos desde el centro del reactor hasta cada

¹³¹ METAZA. Productos para la Industria. Acero Inoxidable [En Línea]. [Citado 3 noviembre, 2017] disponible en: (https://www.metaza.com.co/media/acero_inoxidable_0.pdf).

¹³² CALDERÓN. Op. Cit., p. 67-72.

componente del mismo en el siguiente orden: cuerpo del reactor, chaqueta de calentamiento, concreto refractario y lana de roca.

Figura 27. Corte transversal de la Zona de Reacción del Reactor.



La coraza externa del reactor, que cubre todo el conjunto presentado en la Figura 28, se muestra a continuación:

Figura 28. Coraza del Reactor de Horno Rotatorio.



Fuente: Beston Machinery Co, 2017.

- **Identificación y descripción de servicios auxiliares.** Dentro de los servicios auxiliares necesarios para el funcionamiento de la unidad de reacción se encuentran:

- Servicio de calentamiento. El servicio de calentamiento del reactor dura las 42 horas de operación que requiere la unidad de reacción para lograr la conversión deseada, donde las primeras 4 horas se calienta bien sea con carbón mineral o gas natural para lograr una temperatura uniforme de 650°C en la chaqueta de calentamiento, las 38 horas siguientes el proceso se mantiene con una fracción de la corriente Gas Reciclo que corresponde al 24% del total de los Gases No Condensables producidos por la planta.

El consumo de combustible del quemador, se calculó mediante balances de energía los cuales se presentan en la Sección 3.5.3.

Cuadro 15. Consumo de combustible en el quemador del reactor.

Tiempo Operación (horas)	Tipo Combustible Empleado	Cantidad Combustible
4	Carbón Mineral	333,77 kg
	Gas Natural	281,38 m ³
38	Gas Reciclo	481,75 m ³

- Velocidad de Giro – Motorreductor. El Rector de Horno Rotatorio se caracteriza por garantizar mayor área de contacto entre la materia prima y las zonas de calentamiento críticas lo cual mejora los coeficientes de transferencia y por ende los rendimientos de producción de cada producto. La rotación radial de 360° que tiene el sistema reactivo se da por medio de un motorreductor, sumado a un arreglo de piñones y cadena de dientes.

Puntualmente se determinó la velocidad de giro del sistema en revoluciones por minuto (RPM) junto a la potencia del motorreductor en caballos de fuerza (HP) - Ver Anexo D-, basándose en heurísticas del diseño de la planta piloto antes mencionada¹³³.

Cuadro 16. Especificaciones para la rotación del Reactor.

Velocidad de Giro (RPM)	0,4
Velocidad de Giro (m/s)	0,051
Potencia Motorreductor (HP)	4,54
Potencia Motorreductor (W)	3.387

3.4.2 Diseño unidad de intercambio de calor. Esta unidad consiste en un condensador de contacto seco que tiene como objetivo obtener la fracción condensable de gases de proceso que salen del reactor, es decir el Fuel Oil; dentro de la unidad existe cambio de fase en una fracción apreciable por parte del gas de proceso a la fracción condensable, por lo tanto, en el diseño del intercambiador se tendrán en cuenta cálculos de calor sensible y calor latente de vaporización.

¹³³ CALDERÓN. Ibid. p. 71.

Se diseñó un Intercambiador de Tubos y Coraza bajo el método de: diferencia media logarítmica de temperatura o LMTD “*logarithmic mean temperature difference*”, el cual relaciona el área de transferencia, la tasa de transferencia de calor y las temperaturas de entrada y salida basándose en los siguientes supuestos¹³⁴:

1. Operación en estado estacionario.
 2. Coeficiente Global de Transferencia de Calor U , constante en todo el equipo.
 3. Pérdidas de Calor hacia los alrededores son despreciables.
 4. Se conocen las condiciones de las corrientes de entrada y salida.
 5. Cambio de fase dentro de los tubos del condensador por parte del gas de proceso.
- **Dimensionamiento y especificaciones técnicas.** En el Anexo E se pueden observar los parámetros de diseño y cálculos correspondientes para el diseño del intercambiador de calor mediante la ecuación de diseño de intercambiadores- Ver Ecuación 12-, con los cuales se obtuvieron los siguientes resultados:

Ecuación 12. Ecuación de Diseño del intercambiador de calor.

$$Q = A * U * DMLT * F_T$$

Donde:

$$\begin{aligned}
 Q &= \text{Calor Transferido o Calor Necesario} \\
 A &= \text{Área Requerida de transferencia} \\
 U &= \text{Coeficiente global de transferencia de calor} \\
 LMTD &= \text{Diferencia media logarítmica de temperaturas} \\
 F_T &= \text{Factor de corrección de flujos}
 \end{aligned}$$

Cuadro 17. Especificaciones Técnicas necesarias para la construcción del Condensador.

Tipo de intercambiador	Intercambiador de tubos y coraza 2-4
Área requerida de transferencia (m ²)	6,57
Longitud (m)	2,72
Numero de Tubos Totales	120
Pasos por los tubos	4
Diámetro de la coraza (m)	0,254
Configuración del Arreglo de Tubos	Cuadrado
Tipo Arreglo	Contracorriente

El diseño consistió en calcular el área de transferencia requerida según las temperaturas de trabajo de los fluidos y parámetros de diseño establecidos.

¹³⁴ CARRERO, Javier Ignacio. Métodos Conceptuales de Diseño de Intercambiadores de Calor. En: Equipos de Transferencia de Calor- Una Guía de Estudio. 1 ed. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D. C., 2008. p. 1-21.

Acorde a las temperaturas manejadas dentro del intercambiador y por el costo, el material escogido para la construcción del intercambiador fue Acero Inoxidable Ferrítico de referencia 3CR12 y Acero al Carbono de referencia A-516 para los tubos y la coraza, respectivamente. El intercambiador diseñado tendrá un aspecto similar al observado en la Figura 29¹³⁵:

Figura 29. Intercambiador de tubos y coraza 2-4.



Fuente: Colon José. Laboratorio de Transferencia De Calor. Intercambiador de Coraza y Tubos. Universidad del Atlántico, Colombia 2016.

Los cabezales escogidos para el intercambiador de calor fueron tomados de las Normas TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association): se escogieron cabezales tipo A en el extremo de alimentación y U para el otro extremo los cuales son flotantes o removibles y son aptos para fluidos no sucios o con sólidos en suspensión.

- **Identificación y descripción de servicios auxiliares.**

- Servicios de enfriamiento. El uso de un fluido de enfriamiento es indispensable para condensación y la obtención de Fuel Oil, por factores técnicos y económicos se optó por escoger agua potable a 10°C, mediante los cálculos realizados en el Anexo E se obtuvo la cantidad de agua de enfriamiento necesaria para llevar el fluido caliente a la temperatura deseada.

Cuadro 18. Agua de enfriamiento requerida.

Flujo Másico Agua Necesario (kg/h)	561,860
Flujo Volumétrico Agua Necesario (m³/h)	0,56

¹³⁵COLON, José, *et al.* Laboratorio de Transferencia de Calor I, Intercambiador de Coraza y Tubos 1-2. Universidad del Atlántico, 2016. p. 18.

3.4.3 Diseño unidad de separación. La corriente de salida del condensador contiene una mezcla de gases que está conformada por gases condensables y gases no condensables producidos durante el proceso, esta mezcla va a ser separada en una unidad de separación gas-líquido que se denomina separador vertical bifásico.

Estas unidades son recipientes capaces de separar el gas y líquido inmiscible y se emplean para dejar lo más libre posible el gas de la fase líquida y viceversa a presiones y temperaturas definidas¹³⁶.

- **Dimensionamiento y Especificaciones Técnicas.** La Figura 30 es un esquema del separador vertical que se pretende usar, el flujo de alimento entra al equipo por un costado, en donde un desviador de ingreso (deflector) genera la caída de presión necesaria para hacer la condensación y separación inicial. El aceite que se condensa en esta etapa fluye hacia abajo a la sección de recolección de líquidos, mientras que la corriente de gas fluye en sentido opuesto sobre el desviador de ingreso y luego hacia la salida de gas.

Antes de salir del recipiente el gas pasa por una etapa de asentamiento de gravedad o extractor de neblina, esta sección hace las veces de un filtro por el cual pasa el gas pero no alcanza a pasar el líquido, aquí el gas va a encontrar una serie de obstáculos con los cuales choca y al hacerlo queda adherida parte del líquido en forma de pequeñas gotas las cuales se van uniendo y luego caen, las gotas se acumularan en un filtro elaborado de alambre enrollado, en la sección extractora de neblina el mecanismo de separación es una combinación de impacto, adsorción y gravedad.¹³⁷

En el Cuadro 19 se observan las dimensiones que tendrá el separador, estas se establecieron según el volumen que ocupa la Mezcla Gas y Aceite proveniente del Intercambiador 2-4 dentro del recipiente suponiendo que:

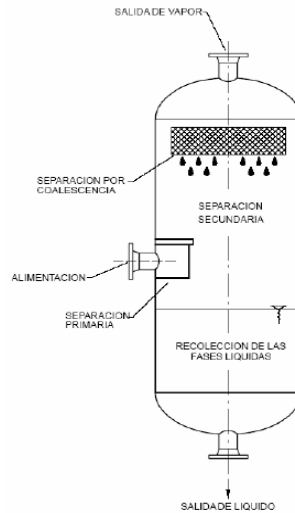
1. El Fuel Oil se produce de manera continua a una tasa de 125,26 kg/h (el doble de la producción esperada para evitar sobrepasar la capacidad límite).
2. El tiempo de retención dentro del separador será de una hora, en lapsos de tiempo de una hora se extraerá constantemente el contenido del recolector de líquidos y se dirigirá al tanque de almacenamiento.

¹³⁶ REQUENA, G, *et al.* Diseño y Evaluación de Separadores Bifásicos y Trifásicos. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero de Petróleo. Caracas: Universidad Central de Venezuela, 2006. p. 51-52.

¹³⁷ INSTRUCTIVO DE OPERACIÓN DE UN SEAPRADOR DE FLUIDO Y GAS. Separador Vertical Bifásico. [En Línea]. [Citado 9 noviembre, 2017]. Disponible en:(<http://instructivoseparador.blogspot.com.co/p/funcionamiento-de-un-separador.html>).

- La salida de gases no condensables será abierta y esta estará dividida en dos corrientes, una se aprovecha y usa como fuente de energía en el reactor y la otra será quemada en la tea.

Figura 30. Separador Vertical Bifásico.



Fuente: REQUENA, G. Diseño y Evaluación de Separadores Bifásicos y Trifásicos. Universidad Central de Venezuela. Departamento de Ingeniería de Petróleos. Caracas, Venezuela. 2006.

Acorde a las condiciones manejadas dentro del separador y por el costo del equipo, el material escogido para la construcción del equipo fue Acero Inoxidable Ferrítico de referencia 3CR12. Los cálculos Los relacionados con el dimensionamiento se pueden observar en el Anexo F.

Cuadro 19. Especificaciones – Separador Bifásico Vertical.

Parámetro	Valor
Diámetro (m)	1
Altura (m)	2
Filtro	Alambre Enrollado
Elemento Inductor	Placa Deflectora

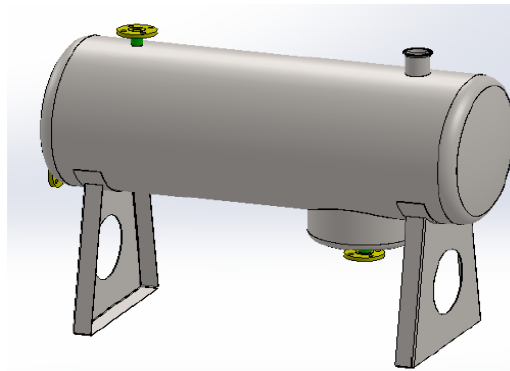
3.4.4 Diseño unidades de almacenamiento de productos. Una vez concluida la pirólisis será necesario tener unidades de almacenamiento adecuadas para la disposición de los productos finales: Fuel Oil y Negro de Humo; A partir de los resultados obtenidos en la experimentación se determinó la cantidad de producto que se va a obtener en cada corrida, permitiendo estimar el tamaño del tanque de almacenamiento para Fuel Oil, el almacenamiento para el negro de humo se describe en la narrativa operacional.

El tanque se diseñó con capacidad neta para almacenar la producción de la planta a lo largo de una semana, es decir 3 lotes de producción de Fuel Oil (7.200 kg), además, se realizó un sobredimensionamiento suponiendo un 25% de exceso de producción de condensados.

- **Dimensionamiento y especificaciones técnicas.** Las unidades de almacenamiento encierran únicamente un tanque de condensados para el almacenamiento del Fuel Oil.

El tanque para recibir los condensados de la fase gaseosa proveniente de la unidad de separación, será un tanque horizontal con una salida para el gas en la parte superior opuesta en la entrada y una salida horizontal lateral por el fondo de la parte cilíndrica para el aceite; En la Figura 31 se muestra el diseño antes descrito:

Figura 31. Tanque de condensados.



Fuente: CALDERÓN, Felipe. La Producción de Combustibles Vehiculares a partir de Plástico de desecho. Bogotá D.C., Colombia. 2016.

Las especificaciones de este tanque son las siguientes: tanque cilíndrico de tapas planas de 1,8 m de diámetro interior en lámina de acero inoxidable SUS 304, de 2 mm de espesor, para este caso no se requiere un depósito de agua debido a que la condensación se realiza en contacto indirecto y se evita la mezcla entre agua y aceite, además por ser un diseño conceptual no se diseñaran las tuberías con las que se relaciona el equipo. En el Cuadro 20 se muestran los resultados obtenidos para el tanque de condensados.

Cuadro 20. Dimensiones Tanque De Condensados.

Parámetro	Valor
Geometría	Cilíndrica
Diámetro (m)	1,8
Ancho (m)	4,27
Capacidad (m ³)	10,854
Capacidad (gal)	2.867,64

Los cálculos relacionados con el diseño del tanque de condensados se pueden apreciar en el Anexo G.

3.5 BALANCE DE MASA Y ENERGÍA DE LA PROPUESTA DE DISEÑO

De acuerdo a la identificación de las corrientes del diagrama de flujo de proceso propuesto para la planta junto a los resultados experimentales de rendimiento de producción de Negro de Humo, Fuel Oil y Gases No condensables, se realizaron los balances de masa y energía de cada equipo por cada *batch* procesado, es decir en un intervalo de 48 horas de operación para el procesamiento de 10 toneladas de GCR.

3.5.1 Condiciones de operación en la planta. A continuación, se muestran las condiciones de operación reales para cada unidad de la planta:

- **Unidad de reacción – reactor de horno rotatorio.**

Cuadro 21. Condiciones de Operación – Reactor de Horno Rotatorio.

Temperatura de Operación			Capacidad por <i>Batch</i>	Presión Operación	Velocidad de Rotación	Tiempo Operación*
Chaqueta Calentamiento	Masa de Reacción	Fracción Volátil¹³⁸				
650 °C (923,15 K)	600 °C (873,15 K)	450 °C (723,15 K)	10 ton	76,4 kPa	0,4 RPM (0,051 m/s)	42 horas

*. *El tiempo se calculó con base a la cinética teórica empleada en el diseño del reactor para una conversión del 47.80%- Ver Sección 3.4.1-.*

¹³⁸ La temperatura se estableció con base a las condiciones de operación de un planta piloto tomada como referencia en el diseño del reactor de horno rotatorio, cuya capacidad de procesamiento es de 350 kg/ *batch*.

- **Operación de intercambio de calor- intercambiador de tubos y coraza.**

Cuadro 22. Condiciones de Operación – Intercambiador Tubos y Coraza

Presión Operación	76,4 kPa	
Temperatura de Operación	Fluido Caliente	Fluido Frío
Entrada	450 °C (723,15 K)	10 °C (283,15 K)
Salida	35 °C (308,15 K)	90 °C (363,15 K)
Fluido por los tubos	Gas de Proceso	
Fluido por la coraza	Agua Enfriamiento	
Tipo Arreglo	Contracorriente	

- **Operación de separación gas-líquido.**

Cuadro 23. Condiciones de Operación – Separador Gas-Líquido.

Unidad	Temperatura de operación	Presión
Separador Gas-Líquido Adiabático	24 - 35 °C (473,15 – 308,15K)	76,4 kPa

- **Operación de calentamiento- quemador con flautas de calentamiento.**

Cuadro 24. Condiciones de Operación – Quemador.

Unidad	Temperatura de operación	Presión
Quemador	15 - 650 °C (288,15 – 923,15 K)	76,4 kPa

Los tiempos de operación para el intercambiador de calor, el separador bifásico y el quemador son los mismos que en el reactor de horno rotatorio.

3.5.2 Balance de masa. La ecuación de balance general para cualquier fenómeno de transporte se muestra a continuación:

Ecuación 13. Ecuación General de Balance.

$$E - S + G = A$$

Donde, E representa lo que Entra, S lo que Sale, G la tasa de generación y A la tasa de acumulación; puesto que la operación es *batch*, los balances se expresan en cada equipo en términos de entradas y salidas, no se consideran tasas de generación y acumulación. Incluso en el Reactor no se consideran dichas tasas debido a que se conocen los rendimientos porcentuales de producción reales para cada producto y por ende la cantidad producida con base a la materia alimentada.

- **Tasa de procesamiento en cada subsistema.** En vista de que la operación de la planta inicia con el reactor y las demás operaciones se ven supeditadas a la generación de la fracción volátil o gases de proceso, se realizaron los balances de masa globales para cada *batch* procesado. En la Tabla 28 se presenta el balance de masa respectivo para cada corriente del diagrama de flujo de proceso de la planta:

Tabla 28. Balance Másico de las corrientes de la planta por *batch* procesado.

Corriente	Nombre	Flujo Másico (kg/<i>batch</i>)	
1	GCR	10.000	
2	Negro de Humo	5.220	
3	Gases Proceso	4.780	
4	Mezcla Aceite-Gas	4.780	
5	Fuel Oil	2.380	
6	Gas Reciclo	2.400	
7	Combustible*	Carbón Mineral	333,77 kg
		Gas Natural	281,38 m ³
8	Gases Combustión	Carbón Mineral	2.074,45
		Gas Natural	1.672,02
9	Gases Efluentes	Carbón Mineral	2.074,45
		Gas Natural	1.672,02
10	Gas de Tea	3.610,32	

*. *La corriente combustible se calculó con base a dos tipos de combustibles.*

Particularmente, las Corrientes 8 y 9 son gases de combustión generados por la quema de carbón mineral o gas natural y cierta fracción aprovechada de Gases No Condensables que es tomada de la corriente Gas Reciclo (23%), los gases de combustión se estimaron con base a factores de emisión de CO₂ para carbón mineral y gas natural-Ver Anexo H-. La Corriente 10 la constituyen los gases de combustión generados por la quema del excedente de la Corriente 3 de Gas de Reciclo.

El cálculo de esta fracción se basó en el tiempo de operación estimado por *batch* de 48 horas, en donde 42 horas corresponden al proceso de reacción y 6 horas al proceso de enfriamiento, descargue y cargue del reactor. Dentro de las 42 horas de operación del reactor, 4 horas son destinadas al arranque y estabilización de la temperatura en la chaqueta de calentamiento en las cuales se usa carbón mineral o gas natural para calentar, y en las 38 horas restantes se da la generación de los Gases de Proceso y por ende la Corriente de Reciclo es capaz de mantener la demanda energética en la operación del reactor.

Tabla 29. Gas de Reciclo quemado en el proceso y en la Tea.

Corriente	Nombre	Gas Reciclo Quemado (kg/batch)	Gas Reciclo Quemado (m ³ /batch)
8	Gases Combustión		
9	Gases Efluentes	543,02	481,75
10	Gas de Tea	1.856,98	1.647,80
	Fracción Aprovechada Gas Reciclo para calentar el Reactor	0,23	

Dentro de las 38 horas, se produce 4.780 kg de Gases de Proceso de los cuales 2.380 kg pertenecen a Fuel Oil y 2.400 kg a Gas Reciclo, la presión del sistema permanece constante permitiendo así un flujo constante de ambas corrientes en los equipos de Intercambio de Calor y de Separación.

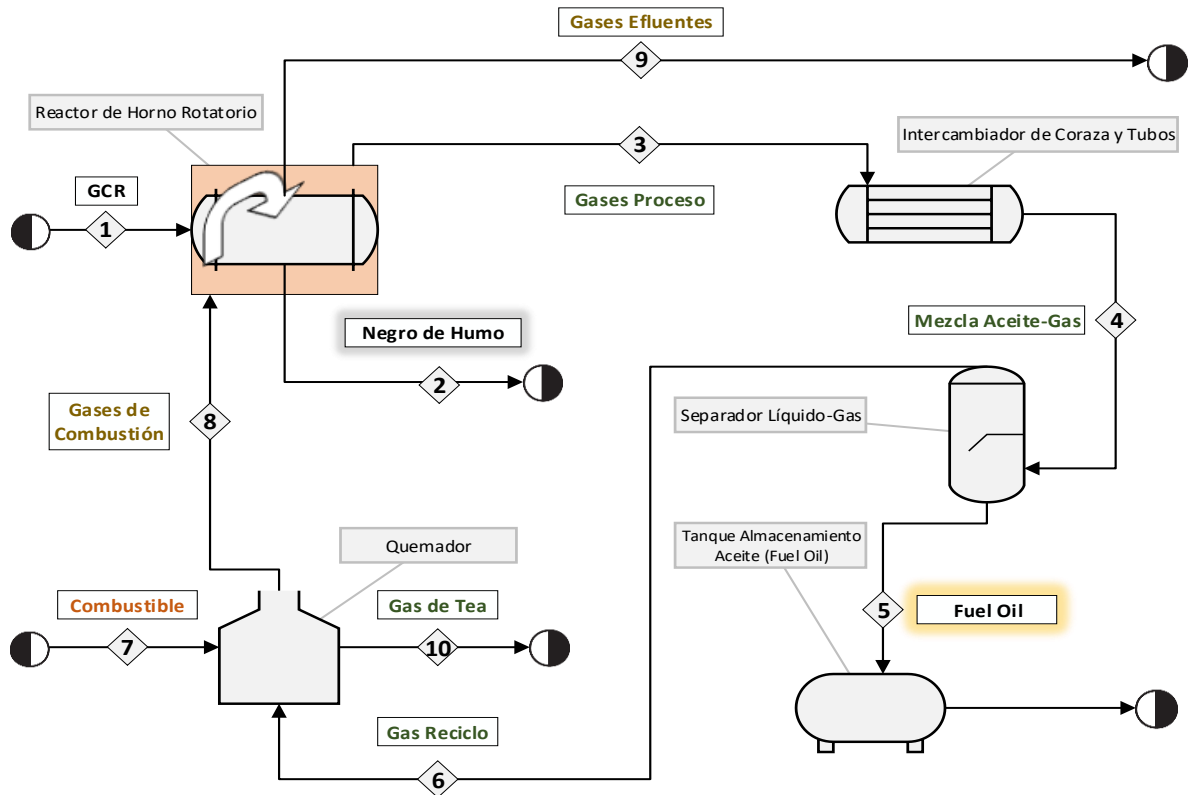
Tabla 30. Flujo Másico de las corrientes producidas en el reactor.

Corriente	Nombre	Total Producido (kg/batch)	Flujo Másico (kg/h)
3	Gases Proceso	4.780	125,79
4	Mezcla Gas-Aceite	4.780	125,79
5	Fuel Oil	2.380	62,63
6	Gas Reciclo	2.400	63,16

Por medio de la Tabla 29 se calculó que la fracción de vapor o calidad de la Corriente 4 que ingresa al separador debe ser de 0,5021 o 50,21%, este parámetro obtenido del rendimiento experimental permite establecer la temperatura de operación de las Corrientes 4,5 y 6.

- **Tabla de resumen de flujo de corrientes.** En seguida se presentan las condiciones de operación de temperatura y presión, junto a los respectivos balances de masa global y ciertas propiedades físicas como la densidad y la capacidad calorífica de las corrientes del diagrama PFD de la planta – Ver Figura 32-:

Figura 32. PFD de la planta con la tabla resumen de corrientes de proceso.



La composición de las corrientes del PFD corresponde a: la materia prima procesada (GCR), los productos de interés obtenidos (Negro de Humo y Fuel Oil), el subproducto obtenido en fase gaseosa (Gases No Condensables) y las emisiones inherentes al proceso de combustión llevado en el quemador. Por lo tanto, los balances no se expresan en términos de masa o moles de algún compuesto en específico.

Tabla 31. Tabla de resumen de flujo de corrientes del diagrama PFD.

Corriente	1	2	3	4	5
Temperatura (°C)	15	15	450	35	24
Presión (kPa)	76,4	76,4	76,4	76,4	76,4
Estado Físico	Sólido	Sólido	Gas	Mezcla Líquido-Gas	Líquido
Fracción Vapor	0	0	1	0,5021	0
Densidad (kg/m ³)	360	360	1,427	6,409	822,3
Cp (kJ/kg°C)	1,86	1,86	3,006	1,886	1,895
Flujo Másico (kg/batch)	10.000	5.220	4.780	4.780	2.380
Composición Fracción Másica (%p)					
GCR	100	0	0	0	0
Negro de Humo	0	100	0	0	0
Fuel Oil	0	0	49,8	49,8	100
Gases No Condensables	0	0	50,2	50,2	0

Corriente	6	7	7'	8	8'	9	9'	10
Temperatura (°C)	24	15	15	650	650	400	400	800
Presión (kPa)	76,4	76,4	76,4	76,4	76,4	76,4	76,4	76,4
Estado Físico	Gas	Sólido	Gas	Gas	Gas	Gas	Gas	Gas
Fracción Vapor	1	0	1	1	1	1	1	1
Densidad (kg/m ³)	1,127	1400	0,61	-	-	-	-	-
Cp (kJ/kg°C)	1,554	-	-	-	-	-	-	-
Flujo Másico (kg/batch)	2.400	333,77	171,64	2.074,4 5	1.672,02	2.074,4 5	1.672,02	3.610,32
Composición Fracción Másica (%p)								
GCR	0	0	0	0	0	0	0	0
Negro de Humo	0	0	0	0	0	0	0	0
Fuel Oil	0	0	0	0	0	0	0	0
Gases No Condensables	100	0	0	0	0	0	0	0
Gases Combustión	0	0	0	100	100	100	100	100
Carbón Mineral	0	100	0	0	0	0	0	0
Gas Natural	0	0	100	0	0	0	0	0

Las Corrientes 8,9 y 10 corresponden a gases de combustión que son considerados CO₂ debido al proceso de combustión completa llevado a cabo en el quemador. Además, las Corrientes 7', 8' y 9' hacen referencia al proceso si fuera operado con Gas Natural para el calentamiento del reactor y sus respectivas emisiones o Gases Efluentes.

3.5.3 Balance de energía. Se enfoca en la energía en forma de calor que requiere el reactor de horno rotatorio para llevar a cabo la reacción de pirólisis o descomposición térmica durante el tiempo establecido de operación, para ello se considera el cambio entálpico que sufre el GCR desde la temperatura ambiente de 15°C cuando es cargado al reactor, hasta cuando alcanza los 600°C en el interior del reactor y su posterior entalpía de reacción y vaporización para generar la fase volátil. Dicho cambio entálpico ΔH (kJ/kg GCR) consta de las siguientes tres etapas:

1. Calor Sensible: Se refiere a la energía en forma de calor necesaria para llevar el GCR en estado sólido a temperatura ambiente de 15°C (288,15 K) hasta la temperatura de reacción establecida de 600°C (873,15 K), sin cambio de fase.
2. Entalpía de Reacción: Corresponde a la energía necesaria para llevar a cabo la reacción de descomposición térmica o pirólisis a la temperatura de reacción.
3. Entalpía de Vaporización de Reacción: Consiste en el calor latente para cambiar del GCR desde su fase sólida a fase de vapor; esto debido a que el caucho vulcanizado es un polímero termoestable que no tiene punto de ebullición, es decir que no pasa al estado líquido.

El cambio entálpico se expresa de la siguiente manera:

Ecuación 14. Cambio Entálpico para la Reacción de Pirolisis de GCR.

$$\Delta H = Q_{sensible} + \overline{\Delta H}_{rxn} + \overline{\Delta H}_{vap}$$

Fuente: YANG, J. A new method for DTA measurement of enthalpy change during the pyrolysis of rubbers. En: Thermochemica Acta. 1996.

Para calcular el calor sensible se requiere la capacidad calorífica C_p (kJ/kg °C) del GCR, que se asumió como la del caucho NR, SBR y BR como un valor promedio dentro del rango de temperatura trabajado, 15°C-600°C.

Además, los valores de la entalpía de reacción (kJ/kg GCR) junto a la entalpía de vaporización de reacción (kJ/kg GCR) para la temperatura de reacción de 600°C, se tomaron de un análisis térmico diferencial realizado a caucho de llantas molido, suponiendo una composición uniforme de los tres tipos de caucho en el GCR. Estas propiedades térmicas y de la reacción se presenta en la siguiente tabla¹³⁹:

¹³⁹ YANG, J; ROY, C. A new method for DTA measurement of enthalpy change during the pyrolysis of rubbers. En: Thermochemica Acta. septiembre, 1995. vol. 288, p. 155-168.

Tabla 32. Capacidad Calorífica, Entalpía de Reacción y Vaporización para pirólisis de GCR.

Tipo de Caucho	ΔH_{rxn} (kJ/kg)	ΔH_{vap} (kJ/kg)	Fracción Másica
NR	164	170	1/3
SBR	560	180	1/3
BR	906	200	1/3
$\overline{\Delta H}_{rxn}$ (kJ/kg)		543,33	
$\overline{\Delta H}_{vap}$ (kJ/kg)		183,33	
C_p (kJ/kg*°C)		1.86	

Fuente: YANG, J. A new method for DTA measurement of enthalpy change during the pyrolysis of rubbers. En: Thermochemica Acta. 1996.

Con base a la Tabla 32 se calculó que el cambio entálpico de la reacción corresponde a 1.814,76 kJ/kg GCR, de modo que con una alimentación de 10 toneladas ó 10.000 kg de GCR por *batch* se requieren 18.147.600 kJ de energía equivalentes a 18.147,6 MJ de energía.

Dicho monto de energía debe ser suministrado por el quemador del proceso durante las 42 horas de operación del reactor, este equipo consiste en una cámara de combustión en donde se disponible el combustible sólido, líquido o gas para su combustión completa con oxígeno; se analizó dos tipos de combustibles: Carbón Mineral y Gas Natural. Para estimar la cantidad de cada combustible que consume el proceso, se debe conocer el poder calorífico promedio PC (MJ/kg) y la energía que demanda el proceso:

Ecuación 15. Cantidad de Combustible requerida en el proceso.

$$m_{combustible} = \frac{Q_{requerido}}{PC_{combustible}}$$

En el siguiente cuadro se presenta el PC de los dos tipos de combustible elegidos junto a las cantidades requeridas que permitan suplir en un 100% la demanda energética del proceso^{140,141}, es decir sin aprovechar la fracción del Gas Reciclo:

Cuadro 25. Cantidades de combustible necesario para suplir el 100% de la energía del reactor.

Combustible	Poder Calorífico	Cantidad Requerida por <i>Batch</i>
Carbón Mineral	32,6 MJ/kg	557 kg / <i>batch</i>
Gas Natural	38,67 MJ/m ³	470 m ³ / <i>batch</i>

¹⁴⁰ MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, Colombia. Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). Cadena del Carbón. [En Línea]. [Citado 8 noviembre, 2017]. Disponible en: (http://www.upme.gov.co/Docs/Cadena_Carbon_2012.pdf)

¹⁴¹ INCOMBUSTIÓN, Colombia. Investigación e innovación en combustión avanzada de uso industrial. [En Línea]. [Citado 8 noviembre, 2017]. Disponible en: (http://www.upme.gov.co/calculadora_emisiones/aplicacion/Informe_Final_FECOC_Correcciones_UPME_FunNatura.pdf).

La elección del tipo de combustible se fundamenta en el precio del mismo, como se expone en el Capítulo 4 de Evaluación Financiera.

Como se mencionó anteriormente se pretende aprovechar el 24% de la Corriente 6 de Gas Reciclo con el fin de disminuir la cantidad de combustible utilizado en el quemador; no obstante, dentro de las 4 primeras horas de operación del reactor conocido como etapa de arranque, es obligatorio el uso de combustibles con el fin de que el sistema de reacción alcance la temperatura de 600°C e inicie la formación de la fase volátil (Corriente 3). En este intervalo de tiempo, la energía en forma de calor suministrada es la etapa de calor sensible que corresponde a: 1.088,1 kJ/kg GCR, que con 10.000 kg de materia prima equivalentes a 10.881.000 kJ ó 10.881 MJ, que representan el 60% del total de energía demandada en el reactor. En seguida se muestra el monto de energía para la etapa de arranque del proceso y las cantidades de combustible requeridas en esta etapa:

Cuadro 26. Cantidades de combustible requeridos en la etapa de arranque del reactor.

Cantidad Energía	(kJ/kg GCR)	(kJ)	(MJ)
Etapa de Arranque	1.088,1	10.881.000	10.881
Combustible		Cantidad Requerida por <i>Batch</i>	
Carbón Mineral		333,77 kg / <i>batch</i>	
Gas Natural		281,38 m ³ / <i>batch</i>	

En las 38 horas siguientes de operación del reactor se debe mantener la temperatura isotérmica junto a la adición de calor para las demás etapas de la reacción, este monto de energía se suministra por medio de la combustión de la fracción antes mencionada de Gas de Reciclo y conforma el 100% de la energía del proceso antes mencionada.

3.6 DESCRIPCIÓN OPERACIONAL

Una vez establecido el diseño del reactor de horno rotatorio, el intercambiador de calor de tubos y coraza, el separador gas-líquido, la unidad de calentamiento y almacenamiento Fuel Oil junto con el cálculo de los respectivos balances de masa y energía del proceso, es fundamental conocer cualitativamente como se va a operar la planta de producción en cada *batch* para el procesamiento de 10 toneladas de GCR, teniendo en cuenta que el factor de servicio o tiempo de operación corresponde a 48 horas por lote procesado. Por ende, se debe conocer la filosofía operacional requerida para operar el proceso de una manera estable y segura de acuerdo a la topología y naturaleza de las operaciones realizadas en la planta.

3.6.1 Narrativa operacional. La materia prima a procesar corresponde a GCR obtenido de NFUs, que es adquirido directamente del proveedor y transportado o puesto en planta para iniciar su procesamiento por medio de pirólisis; lo cual corresponde a la Corriente 1 del PFD de la planta. Dicho procesamiento se da en el reactor de horno rotatorio, cuya naturaleza de operación es: *batch* o discontinua, temperatura de operación de 600-650°C proporcionada por una chaqueta de calentamiento, atmósfera de reacción libre de oxígeno, presión de operación de 76,4kPa y totalmente hermético. Por lo tanto, el material de la Corriente 1 (10 ton GCR) debe ser cargado en forma manual antes de iniciar el calentamiento del mismo, debido a la hermeticidad que debe tener la zona de reacción o pirólisis para evitar el ingreso de aire del entorno que genere procesos de combustión u otros procesos de oxidación de los productos obtenidos.

Una vez cargado el material, se inicia la rotación por medio del motorreductor y el calentamiento indirecto del horno por medio de los gases de combustión (Corriente 8) generados en la quema de carbón mineral (333.77 kg) hasta la temperatura escogida de 650°C en la chaqueta de calentamiento, que se supone igual a la superficie externa del cuerpo del reactor; lo anterior transcurre en las primeras 4 horas de operación del *batch*. Cuando la temperatura interna promedio del GCR alcance los 600°C se inicia la producción de la fracción volátil o gases de proceso representados por la Corriente 3, cuya temperatura efluente del reactor es de 450°C. En las 38 horas posteriores la Corriente 3 se produce a una tasa constante promedio (125,79 kg/h) debido al comportamiento experimental analizado de la presión de operación del sistema; la cual no es superior a 76,4 kPa y es de carácter constante. Además, en dicha corriente está presente la fracción condensable o Fuel Oil y la fracción no Condensable o Gas de Reciclo; las cuales también se producen a tasas constantes de 62.63 kg/h y 63,16 kg/h respectivamente.

La Corriente 3 pasa a al intercambiador de tubos y coraza 2-4, en donde es enfriada a 35°C (Corriente 4) con agua de proceso tomada del sistema de acueducto (24m³/*batch* o 288m³/mes) y que es nuevamente enfriada por su almacenamiento en una piscina y posterior recirculación al intercambiador; permitiendo así reutilizar este caudal de agua para el siguiente mes de operación. Las condiciones de operación de la Corriente 4 (35°C y 76,4 kPa) permiten que se forme una mezcla gas-líquido con una fracción de vapor del 50.21%, la cual es alimentada al separador gas-líquido adiabático que permite la separación de las dos fases debido a leve cambio de presión y una caída de temperatura de 10°C aproximadamente.

En este punto del proceso es posible separar la fracción condensable o Fuel Oil (Corriente 5) de los Gases No Condensables o Gas Reciclo (Corriente 6), manteniendo la presión de operación de 76,4 kPa y a una temperatura de 24°C. La Corriente 5 (2380 kg/*batch*) es almacenada en el tanque de condensados que tiene una capacidad neta de 11m³ o 2870 gal, el cual soporta el almacenamiento de una producción semanal de 7.140 kg de Fuel Oil provenientes del procesamiento de 30 ton de GCR realizado en 3 *batch*.

Por su parte, la Corriente 6 es de vital importancia debido a su uso como gas combustible en el calentamiento del reactor garantizando así el cese en el uso de carbón mineral y la autosostenibilidad del proceso desde el punto de vista energético, integrando 543,02 kg/ *batch* de Gases No Condensables equivalentes al aprovechamiento del 23% del total generado en la Corriente 6 (2400 kg/*batch*). Sin embargo, no todos los Gases No Condensables se pueden quemar en su totalidad debido a que generarían un incremento indeseado en la temperatura promedio de la chaqueta de calentamiento de 650°C, estos excesos de gas (1856,98 kg/*batch*) deben ser quemados hacia la atmósfera por medio de una Tea ó flauta, nunca deben ser descargados a la atmósfera debido a su elevado poder calorífico (33,42 MJ/kg) y por su composición que contiene CO, CO₂, H₂S entre otros compuestos contaminantes de la capa de ozono.

En el transcurso de las 42 horas de procesamiento se da la formación de los productos deseados de acuerdo a los rendimientos porcentuales de producción; obteniéndose 2380kg/*batch* de Fuel Oil (Corriente 5) y 5220 kg/*batch* de Negro de Humo (Corriente 5). Cumplidas las 42 horas se suspende el calentamiento y las 6 horas subsiguientes comprenden el enfriamiento natural del reactor y arranque del nuevo *batch*. En las 6 horas finales de procesamiento por *batch*, se destinan 4 horas al enfriamiento del reactor de horno rotatorio para poder descargar y empacar el Negro de Humo y 2 horas para cargar de nuevo el sistema con 10 ton de GCR.

El tiempo de enfriamiento es fundamental en la seguridad del proceso, debido a que el residuo sólido remanente constituye el Negro de Humo o Carbonilla el cual se encuentra a altas temperaturas mayores de 500°C en un ambiente inerte libre de oxígeno, en consecuencia, se debe dejar enfriar el sistema de reacción a una temperatura inferior de 100°C antes de abrir el sistema para poder descargar el producto de manera manual previniendo riesgos de incendio y de seguridad para los operarios de la planta (9 operarios/*batch*). En planta, el Negro de Humo se empaca en BigBags con dimensiones de 0.94x0.94x1.6 con una capacidad de 500 kg, estos son manipulados empleando un montacargas a la zona de carga y transporte, que se estimó debe tener un área total de 100 m², sumados a los 400 m² que se requieren para montar los equipos, resultando en un lote con área de 500m² con una altura promedio de 7m para realizar el montaje y operación de la planta.

Finalmente, una vez se remueve el producto en fase sólida se procede cargar el reactor nuevamente para iniciar otro *batch* de procesamiento, los cuales se realizarán de manera consecutiva tres veces por semana o en 6 días de operación.

3.6.2 Diagrama de Gantt de la operación. El diagrama de Gantt es una herramienta gráfica que representa las operaciones de un proceso en relación a su tiempo de ocurrencia en secuencias de tiempo concretas dentro de un tiempo total

establecido para el proceso¹⁴². En la Tabla 33 se puede observar la descripción del diagrama de Gantt que resume la filosofía operacional de la planta; se observa que la planta toma en total 48 horas para procesar un batch de GCR y obtener la cantidad de Fuel Oil y Negro de Humo mencionadas anteriormente.

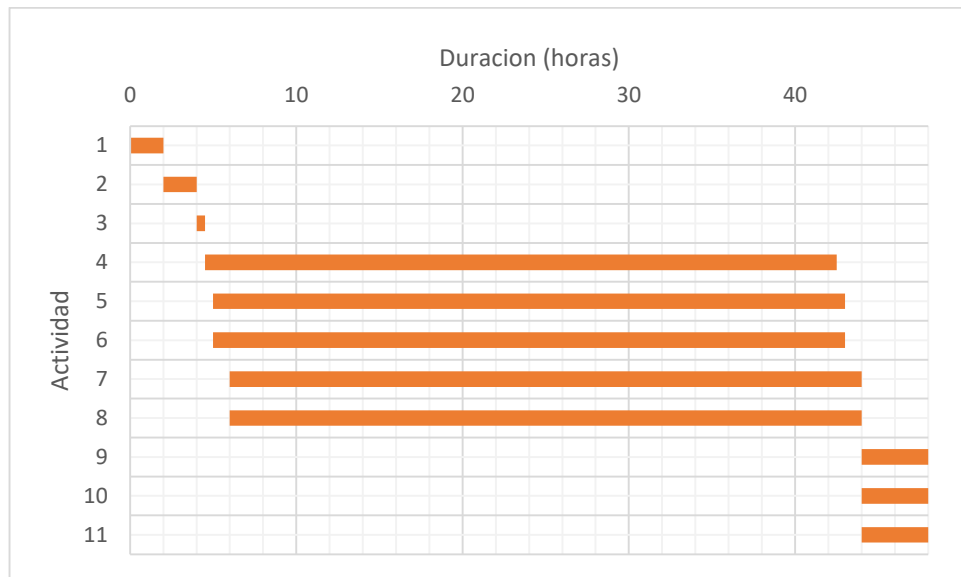
Tabla 33. Descripción del Diagrama de Gantt para la Operación de la Planta.

Actividad	Descripción	Inicio (horas)	Duración (horas)	Final (horas)
1	Alimentar la materia prima al reactor manualmente antes de iniciar el calentamiento y cerrar el reactor herméticamente.	0	2	2
2	Iniciar la rotación del reactor configurando el motorreductor a la velocidad deseada e Iniciar el calentamiento indirecto de horno por medio de los gases de combustión generados por la quema de carbón mineral (Corriente 8).	2	2	4
3	Verificar la generación de gases de proceso (Corriente 3).	4	0.5	4.5
4	Los componentes condensables de la corriente de gases de proceso inician a condensarse.	4.5	38	42.5
5	La mezcla Aceite - Gas (Corriente 4) es dirigida al separador bifásico adiabático para separar las fases presentes.	5	38	43
6	El Fuel Oil obtenido del separador bifásico se almacena en el tanque cilíndrico (Corriente 5).	5	38	43
7	Del flujo másico de la corriente gaseosa que sale del separador (gas de reciclo, Corriente 6), el 23% es aprovechada como combustible para la autosostenibilidad energética del reactor y la fracción restantes es quemada en una TEA (Corriente 10).	6	38	44
8	Suspender el calentamiento por medio de carbón mineral y alimentar el reactor con los gases de combustión generados por el gas de reciclo.	6	38	44
9	Suspender el calentamiento por medio de los gases de combustión generados por el gas de reciclo (Corriente 8).	44	4	48
10	Dejar enfriar naturalmente el sistema.	44	4	48
11	Extraer el negro de humo del reactor (Corriente 2) y realizar limpieza para la alimentación del siguientes batch de GCR	44	4	48

El diagrama de Gantt se presenta en la Gráfica 23.

¹⁴² UGALDE, Jesús. Instrumentos: Diagrama de Gantt y Sismogramas. En: Programación de Operaciones. 1 ed. Editorial Universidad Estatal a Distancia. Costa Rica, 1979. p. 105-108.

Gráfica 23. Diagrama de Gantt, Que muestra el tiempo total de operación por *Batch* de la planta.



4. EVALUACIÓN FINANCIERA

El presente capítulo tiene como objeto hacer una presentación amplia de cada uno de los elementos que participan en la estructuración financiera del proyecto: las inversiones necesarias para ponerlo en funcionamiento, los costos que concurren en la elaboración, administración, venta de cada uno de los productos y el ingreso derivado de las ventas de los mismos; toda esta información proyectada al periodo que compromete el horizonte del proyecto (5 años).

A través de estos elementos, se busca determinar qué tan viable desde el punto de vista financiero es llevar a cabo la implementación de este proyecto mediante la medición de la rentabilidad económica del mismo. Esta medición se realizó por medio del cálculo de indicadores financieros dentro de los cuales se encuentran: la Tasa interna de oportunidad (TIO), el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Verdadera de Rentabilidad (TVR), la Relación Beneficio - Costo y el Índice de Rentabilidad (IR). Estos indicadores se calcularon una vez establecidos el estado de resultados y el flujo de caja para el proyecto.

4.1 CRITERIOS DE OPERACIÓN Y ECONÓMICOS

Son factores o variables independientes adscritos a la naturaleza de operación de la planta, junto a variables macroeconómicas de la economía colombiana que tienen la mayor injerencia en la estructura de ingresos y costos del proyecto, y por ende en los indicadores financieros calculados. Estos factores se describen y establecen en la Tabla 34:

Tabla 34. Criterios de Operación y Económicos.

Factores de Operación			
Factor de Servicio Total de la Planta			
horas/ <i>batch</i>	48	días/semana	6
días/ <i>batch</i>	2	turnos/semana	18
<i>batch</i> /semana	3	horas/semana	144
<i>batch</i> /mes	12	horas/mes	576
Factor Servicio - Uso Servicios Públicos			
horas/ <i>batch</i>	42	horas/semana	126
días/ <i>batch</i>	2	horas/mes	504
Factores Económicos			
Aumento Anual Precios	5%	Aumento Anual Salario Mínimo Legal Vigente *	5,49%
Materias Primas e Insumos			
Tasa Representativa del Mercado ¹⁴³	3.004,88	Meses Operación al Año	12

*. *Corresponde al promedio anual de las variaciones porcentuales de los últimos 5 años.*

¹⁴³ BANCO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA (BRC). Tasa de Cambio del peso colombiano-TRM. [En línea]. [Citado 11 noviembre,2017] disponible en: (<http://www.banrep.gov.co/trm>).

4.2 ESTRUCTURA DE COSTOS E INVERSIONES

Las inversiones asociadas al periodo de instalación del proyecto se desglosaron en tres grupos principalmente¹⁴⁴: inversiones fijas, inversiones diferidas y capital de trabajo.

4.2.1 Inversiones fijas. Se consideran inversiones fijas las que están destinadas a la adquisición de activos fijos, los cuales abarcan: inmuebles, maquinaria y equipos, vehículos etc. Dichos activos, garantizan la operación del proyecto y no son objeto de comercialización.

En este caso, se debe adquirir un lote o inmueble propio con un área de 500m² que permita el montaje de los equipos, zonas de tránsito y almacenaje de materia prima y productos terminados; este deber estar ubicado en Madrid, Cundinamarca de acuerdo al estudio de microlocalización realizado –Ver Sección 2.7-. La maquinaria comprende los equipos de la planta antes diseñados, tales como: reactor de horno rotatorio, quemador, intercambiador de calor, separador bifásico y tanques de almacenamiento. Este conjunto de equipos comercialmente se conoce como plantas de pirólisis y sus precios se obtuvieron de proveedores de maquinaria de origen chino¹⁴⁵. Además, se requiere la compra de un montacargas para el manejo del Negro de Humo empacado en BigBags.

Tabla 35. Costos Asociados a Inversiones Fijas.

Descripción	Unidades	Precio Unitario (\$ COP)	Total (\$ COP)
Planta Pirólisis	1	600.000.000	600.976.000
Inmueble	1	1000.000.000	1000.000.000
Montacargas	1	60.000.000	60.000.000
TOTAL INVERSIONES FIJAS (\$ COP)			1660.976.000

4.2.2 Inversiones diferidas. Constituyen costos asociados a la puesta en marcha del proyecto, los cuales abarcan: estudios técnicos, gastos de organización, gastos de montaje, ensayos y puesta en marcha y gastos de capacitación y entrenamiento de personal. Este costo se realizará en los 3 primeros meses del proyecto y su monto se extrapolará del montaje de la planta piloto empleada como referente en el diseño¹⁴⁶, el cual emplea un porcentaje del 35% con respecto al precio de la maquinaria y equipos.

¹⁴⁴ MIRANDA. Op. Cit., p. 185-201.

¹⁴⁵ BESTON. Waste Pyrolysis System, Waste Tyre Pyrolysis Plant. [En Línea]. [Citado 11 noviembre, 2017] disponible en: (<http://bestonpyrolysisplant.com/pyrolysis-system-waste/>).

¹⁴⁶ Dr. CALDERÓN LABS. Programa de Investigación en combustibles alternativos, Plasticcombustibles Ventures 3. [En línea]. [Citado 11 noviembre, 2017] disponible en: (<http://www.drcalederonlabs.com/Plasticcombustibles/Index%20Plasticcombustibles.htm>).

Tabla 36. Costos Asociados a Inversiones Diferidas.

Descripción	TOTAL (\$ COP)
Diferidos	210.341.600

Fuente: Laboratorios Dr. Calderón, Proyecto Plasticcombustibles.

4.2.3 Costos de operación. Abarca los recursos necesarios o activos corrientes necesarios para que el proyecto pueda operar, los cuales cubren necesidades de: materia prima, insumos y mano de obra principalmente¹⁴⁷.

- **Materia Prima e Insumos.** La materia prima a procesar en la planta corresponde a GCR de acuerdo a las características antes mencionadas –Ver Sección 3.2.2-, cuyo precio cotizado ya incluye transporte y puesta en planta. La planta requiere de dos insumos como lo son: combustible para el quemador y las bolsas BigBags para el embalaje del Negro de Humo. Se determinó que el Gas Natural como alternativa planteada de combustible es inviable económicamente debido a su alto costo de 2.995 \$COP/ kg en comparación al carbón mineral cuyo costo es de 175 \$ COP/kg (precios del 2017); por lo cual, el combustible a emplear en el quemador es carbón mineral del tipo antracita. Inicialmente se muestra los precios estimados para las materias primas e insumos identificados en el proceso para cada año del proyecto teniendo en cuenta un incremento del 5% anual en los precios, con respecto al precio base del año 2017:

Tabla 37. Precios de Materias e Insumos durante el proyecto.

Año	GCR (\$ COP/kg)	Carbón (\$ COP/ton)	BigBags (\$ COP/unidad)
2017	700	175.000	23.700
2018	735	183.750	24.885
2019	771,75	192.938	26.129
2020	810,34	202.584	27.436
2021	850,85	212.714	28.807
2022	893,40	223.349	30.248

Asimismo, se estableció la tasa de consumo por cada *batch* de operación de materias primas e insumos.

¹⁴⁷ GERENCIE, Capital de Trabajo. [En línea]. [Citado 11 noviembre,2017] disponible en: (<https://www.gerencie.com/capital-de-trabajo.html>)

Tabla 38. Tasas de Consumo de Materias Primas e Insumos por *batch*.

TASAS DE CONSUMO / <i>batch</i>	
GCR (ton)	10
CARBÓN (ton)	0,334
BigBags (unidades)	126

Partiendo de las Tablas 37 y 38 se calculó los costos totales por efecto de la materia prima e insumos adquiridos en cada año, conociendo que la planta procesa 12 *batch* al mes de manera constante durante los 5 años.

Tabla 39. Costos Anuales Totales de Materia Prima e Insumos.

Año	GCR (\$ COP)	Carbón (\$ COP)	BigBags (\$ COP)
2018	793.800.000	6.628.230	28.058.335
2019	1.111.320.000	9.279.522	39.281.669
2020	1.166.886.000	9.743.498	41.245.753
2021	1.225.230.300	10.230.673	43.308.040
2022	1.286.491.815	10.742.207	45.473.442

- **Mano de Obra Directa.** La planta operara 48horas/*batch* con 3 turnos diarios, su operación requiere de tres operarios por turno es decir nueve operarios al mes, junto a un turno diario de un Jefe de Producción al mes.
- **Nomina administrativa.** Comprende la mano de obra del sector administrativo del proyecto, que comprende un Gerente General y un Gerente Comercial.

El salario o nómina de estos trabajadores, se calculó con base al salario mínimo legal vigente mensual (S.M.L.V) en Colombia para el año 2017 junto al componente prestacional de aportes de salud, pensión etc., que en este caso se estimó como el 51% del salario mensual. Además, se realizó la proyección del S.M.L.V durante los 5 años del proyecto¹⁴⁸:

¹⁴⁸ BANCO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA (BRC). Índice de Salarios, Salario Mínimo Legal en Colombia. [En línea]. [Citado 11 noviembre,2017] disponible en: (<http://www.banrep.gov.co/es/indice-salarios>).

Tabla 40. Proyección del S.M.L.V para el año 2022.

% Incremento S.M.L.V	
	5,49%
Año	S.M.L.V (\$ COP/MES)
2017	737.717
Año	S.M.L.V (\$ COP/MES)
2018	778.218
2019	820.942
2020	866.012
2021	913.556
2022	963.710

Teniendo en cuenta que los montos de los salarios para cada trabajador corresponden a 6 veces el S.M.L.V para el caso del Gerente General, 4 veces para el Gerente Comercial y Jefe de Producción y 1.2 veces para el caso de los operarios, la Tabla 36 muestra los costos totales de la nómina que requiere el proyecto o la planta para operar:

Tabla 41. Costos Totales Nómina.

Año	Nómina (\$ COP) *
2018	272.453.109
2019	382.470.019
2020	402.723.263
2021	424.088.410
2022	446.626.504

**En el salario están incluidas las prestaciones, las cuales corresponden al 51% del salario base del trabajador, estas prestaciones incluyen; salud y pensión, riesgos laborales (ARL) y seguridad social.*

- **Servicios Públicos.** La planta requiere del servicio de electricidad, agua y alcantarillado, telefonía y comunicaciones. En seguida, se presenta los precios base para el año 2017 junto a su proyección para el año 2022 teniendo en cuenta un incremento del 5% anual:

Cuadro 27. Tarifas Servicios Públicos e Insumos para el año 2017.

Tarifas Servicios Públicos Bogotá Uso Industrial para el año 2017	
Electricidad (\$ COP/kwh)	529
Acueducto (\$ COP/m ³)	3.169
Cargo Fijo Acueducto (\$ COP/2 meses)	16.437
Alcantarillado (\$ COP/m ³)	3.625
Cargo Fijo Alcantarillado (\$ COP/2 meses)	7.745
Telefonía y Comunicaciones (\$ COP/mes)	200.000

Fuente: Agua y Alcantarillado de Bogotá- Codensa.

Tabla 42. Proyección Precios de Tarifas de Servicios Públicos al año 2022.

Año	Electricidad (\$ COP/kwh)	Acueducto (\$ COP/m³)	Cargo Fijo Acueducto (\$ COP/2 meses)	Alcantarillado (\$ COP/m³)	Cargo Fijo Alcantarillado (\$ COP/2 meses)	Telefonía (\$COP/mes)
2018	556	3.327	17.259	3.806	8.132	210.000
2019	584	3.494	18.122	3.996	8.538	220.500
2020	613	3.668	19.028	4.196	8.965	231.525
2021	643	3.852	19.980	4.406	9.414	243.101
2022	676	4.044	20.979	4.626	9.884	255.256

Se estableció la tasa de consumo por cada *batch* de operación para los servicios requeridos en la operación durante un mes, que para el agua y alcantarillado son 24m³, teniendo en cuenta que el consumo de un mes es aprovechado en el segundo mes debido al reciclo o aprovechamiento que se le puede dar al agua empleada en los intercambiadores. Por su parte el consumo de electricidad es en promedio de 30kwh/ batch acorde a los proveedores de maquinaria, la tarifa del servicio de telefonía es un valor promedio cotizado. En seguida se presentan los costos totales anualizados para los servicios públicos que requiere la planta:

Tabla 43. Costos Totales de Servicios.

Año Servicios Públicos (\$ COP)

2018	85.704.107
2019	119.269.885
2020	126.928.759
2021	133.275.197
2022	139.938.957

- **Depreciaciones de Equipos.** Se usó un modelo de depreciación lineal donde el tiempo de depreciación para maquinaria y equipos corresponde a 10 años.

Tabla 44. Depreciación de Equipos.

Descripción Maquinaria y Equipo	Depreciación Anual (\$COP)
Planta Pirólisis	60.097.600
Montacargas	6.000.000
TOTAL ANUAL (\$ COP)	66.097.600

- **Impuestos Directos.** Son impuestos adscritos al patrimonio (bienes inmuebles) o a utilidades obtenidos de renta u otra actividad económica¹⁴⁹; en el caso del patrimonio se consideró el Impuesto Predial, para las utilidades netas de cada periodo se grava el Impuesto a la Renta y por concepto de las ventas netas realizadas para cada periodo está el Impuesto de Industria y Comercio (ICA). Las tasas y tarifas de estos impuestos se presentan en seguida:

Cuadro 28. Tarifas Impuestos Directos.

Impuesto	Base Gravable	Tarifa
Predial ¹⁵⁰	Patrimonio de bienes inmuebles, sobre el valor del avalúo catastral	0,01 \$COP/ \$COP avalúo
Renta ¹⁵¹	Renta obtenida de Utilidades Netas	33%
Industria y Comercio (ICA) ¹⁵²	Ventas por Productos o Servicios Ofrecidos	0,0114 \$COP/ \$COP ingresos

Fuente: Nueva Reforma Tributaria, Ley 1819 de 2016.

El Impuesto Predial se paga anualmente el mes de abril y se cobra sobre el avalúo catastral del inmueble, que en este caso es de 700.000.000 \$COP. Por su parte, el Impuesto a la Renta se paga en dos cuotas en el mes de abril y junio del año siguiente al tomado como base, asimismo el ICA durante el primer año de operación no se paga hasta el primer mes del año 2019, después se cancela de manera bimestral. El valor total anualizado de cada impuesto se presenta en la Tabla 45:

¹⁴⁹ GERENCIE, Impuestos Directos. [En línea]. [Citado 11 noviembre,2017] disponible en: (<https://www.gerencie.com/impuestos-directos.html>).

¹⁵⁰ CONSEJO DE BOGOTÁ D. C., Colombia. Acuerdo 648. (16, septiembre, 2016). Por la cual se simplifica el sistema tributario distrital y se dictan otras disposiciones. Bogotá D. C., 2016. p. 1-9.

¹⁵¹ CONGRESO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA. Ley 1819. (29, diciembre, 2016). Por la cual se adopta una reforma tributaria estructural, se fortalecen los mecanismos para la lucha contra la evasión y la elusión fiscal, y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial. Bogotá D. C., 2016. Art. 100.

¹⁵² Secretaría Distrital de Hacienda de Bogotá D.C. Sistema de Retenciones. [En Línea]. [Citado 11 noviembre, 2017] Disponible en: (<http://www.shd.gov.co/shd/sistema-de-retenciones>).

Tabla 45. Costos Totales de Impuestos.

Año	Impuesto Predial (\$ COP)	Impuesto a la Renta (\$ COP)	Impuesto Industria y Comercio (\$COP)	TOTAL (\$COP)
2018	-	-	-	-
2019	7.000.000	440.090.948	65.006.323	512.097.272
2020	7.000.000	672.846.942	45.407.725	725.254.667
2021	7.000.000	732.142.905	50.081.438	789.224.342
2022	7.000.000	847.872.901	56.237.123	911.110.024

4.3 FLUJO DE CAJA DEL PROYECTO

4.3.1 Horizonte de planeación. Constituye el período de tiempo que va desde que se decide realizar la inversión inicial en activos fijos hasta que el proyecto termina su operación y se liquida debido a que sus propietarios ya no tienen interés o porque los objetivos financieros, económicos o sociales no se alcanzaron¹⁵³; no obstante, el final de dicho periodo puede ser cualquier intervalo de tiempo fijado con el fin de conocer los indicadores de viabilidad financiera del proyecto hasta ese corte. En este caso, el horizonte de planeación del proyecto será de 5 años en donde no se liquidará el proyecto en el último año.

4.3.2 Estructura de ingresos. En un proyecto los ingresos están representados por el dinero recibido por concepto de las ventas de un producto o la prestación de un servicio o por la liquidación de los activos que han superado su vida útil dentro de la empresa, o también por los rendimientos financieros producidos por la reinversión de excesos de liquidez. El flujo de ingresos puede presentar una estructura muy variada dependiendo de la naturaleza del proyecto de que se trate y de los mecanismos de venta y comercialización adoptados¹⁵⁴. Para este proyecto los ingresos están representados únicamente por el dinero recibido por concepto de las ventas de Negro de Humo y Fuel Oil según el pronóstico de mercado realizado para los años 2018-2022, en donde el precio de venta unitario se obtuvo del pronóstico del precio demandado por el mercado para cada año.

¹⁵³ MIRANDA. Op. Cit., p. 10-11.

¹⁵⁴ MIRANDA. Ibid. p. 221-223.

Tabla 46. Precios Unitarios de venta para Negro de Humo y Fuel Oil.

Año	Negro Humo (\$COP/kg)	Fuel Oil (\$COP/gal)
2018	3.900,36	4.454,84
2019	4.357,68	4.423,21
2020	4.713,88	4.394,57
2021	5.285,39	4.480,44
2022	6.018,27	4.564,62

Fuente: EAM, DANE. Modificado por autores.

4.3.3 Estado de resultados del proyecto. Es un estado financiero que registra los ingresos y egresos causados por la operación del proyecto dentro de los 5 años de horizonte de planeación establecido, en este se incluyen la carga impositiva o impuestos directos que deben ser pagados en Colombia sobre la base de utilidad o ganancias gravables.

Figura 33. Estado de Resultados del Proyecto.

Descripción Rubro	Año				
	2018	2019	2020	2021	2022
	INGRESOS DE OPERACIÓN				
Ventas Negro de Humo (\$ COP)	\$ 2.198.867.495	\$ 3.275.583.917	\$ 3.543.327.425	\$ 3.972.924.038	\$ 4.523.810.706
Ventas Fuel Oil (\$ COP)	\$ 367.906.068	\$ 487.058.694	\$ 483.904.546	\$ 493.359.849	\$ 502.629.672
TOTAL INGRESOS (\$ COP)	\$ 2.566.773.563	\$ 3.762.642.611	\$ 4.027.231.971	\$ 4.466.283.887	\$ 5.026.440.378
	COSTOS OPERACIÓN				
	OPEX				
Materia Prima (\$ COP)	\$ 793.800.000	\$ 1.111.320.000	\$ 1.166.886.000	\$ 1.225.230.300	\$ 1.286.491.815
Servicios Públicos (\$ COP)	\$ 85.704.107	\$ 119.269.885	\$ 126.928.759	\$ 133.275.197	\$ 139.938.957
Insumos Carbón (\$ COP)	\$ 6.628.230	\$ 9.279.522	\$ 9.743.498	\$ 10.230.673	\$ 10.742.207
Insumos Bigbgas (\$ COP)	\$ 28.058.335	\$ 39.281.669	\$ 41.245.753	\$ 43.308.040	\$ 45.473.442
Nómina (\$ COP)	\$ 272.453.109	\$ 382.470.019	\$ 402.723.263	\$ 424.088.410	\$ 446.626.504
Depreciación (\$ COP)	\$ 49.573.200	\$ 66.097.600	\$ 66.097.600	\$ 66.097.600	\$ 66.097.600
TOTAL OPEX (\$ COP)	\$ 1.236.216.981	\$ 1.727.718.695	\$ 1.813.624.873	\$ 1.902.230.221	\$ 1.995.370.525
	IMPUESTOS DIRECTOS				
Impuesto de Renta (\$COP)	\$ -	\$ 439.083.672	\$ 671.524.892	\$ 730.490.342	\$ 846.137.710
ICA (\$COP)	\$ -	\$ 65.006.323	\$ 45.407.725	\$ 50.081.438	\$ 56.237.123
PREDIAL (\$COP)	\$ -	\$ 7.000.000	\$ 7.000.000	\$ 7.000.000	\$ 7.000.000
TOTAL IMPUESTOS (\$COP)	\$ -	\$ 511.089.995	\$ 723.932.617	\$ 787.571.780	\$ 909.374.833
TOTAL COSTOS (\$COP)	\$ 1.236.216.981	\$ 2.238.808.691	\$ 2.537.557.490	\$ 2.689.802.001	\$ 2.904.745.358
FLUJO DE FONDOS NETO	\$ 1.330.556.582	\$ 1.523.833.920	\$ 1.489.674.480	\$ 1.776.481.887	\$ 2.121.695.020

La Figura 33 muestra que en el primer año de operación es decir el 2018, se obtiene una utilidad neta de 1.330.556.582 \$COP, la cual se incrementa a 2.121.695.020 \$COP para el año 2022, lo cual implica que la operación de la planta es viable desde el punto de vista operacional debido a que no genera pérdidas.

4.3.4 Flujo de caja neto. Se estructuró a partir del Estado de Resultados del proyecto, en donde se tiene en cuenta la inversión en activos fijos o capital de trabajo que se realiza en el periodo 0 o al inicio del proyecto, en donde se llevan a cabo las operaciones de adecuación y montajes de los equipos de la planta, que en este caso constituye los 3 primeros meses del año 2018.

Figura 34. Flujo de Caja Neto del Proyecto.

Descripción Rubro	AÑO					
	Inicio del Proyecto	2018	2019	2020	2021	2022
INGRESOS DE OPERACIÓN						
Ventas Negro de Humo (\$ COP)	\$ -	\$ 2.198.867.495,12	\$ 3.275.583.917,36	\$ 3.543.327.424,58	\$ 3.972.924.038,42	\$ 4.523.810.705,73
Ventas Fuel Oil (\$ COP)	\$ -	\$ 367.906.068,11	\$ 487.058.693,64	\$ 483.904.545,97	\$ 493.359.849,00	\$ 502.629.671,84
TOTAL INGRESOS (\$ COP)	\$ -	\$ 2.566.773.563,22	\$ 3.762.642.611,00	\$ 4.027.231.970,55	\$ 4.466.283.887,42	\$ 5.026.440.377,57
COSTOS OPERACIÓN						
CAPEX						
Activos Fijos (Depreciables)						
Maquinaria y Equipos	\$ 600.976.000,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Montacargas	\$ 60.000.000,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Activos Fijos (No Depreciables)						
Adecuaciones Físicas	\$ 210.341.600,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Compra Inmueble	\$ 1.000.000.000,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
TOTAL CAPEX(\$COP)	\$ 1.871.317.600,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
OPEX						
Materia Prima (\$ COP)	\$ -	\$ 793.800.000	\$ 1.111.320.000	\$ 1.166.886.000	\$ 1.225.230.300	\$ 1.286.491.815
Servicios Públicos(\$COP)	\$ -	\$ 85.704.107	\$ 119.269.885	\$ 126.928.759	\$ 133.275.197	\$ 139.938.957
Insumos Carbón (\$ COP)	\$ -	\$ 6.628.230	\$ 9.279.522	\$ 9.743.498	\$ 10.230.673	\$ 10.742.207
Insumos Bigbgas (\$ COP)	\$ -	\$ 28.058.335	\$ 39.281.669	\$ 41.245.753	\$ 43.308.040	\$ 45.473.442
Nómina (\$ COP)	\$ -	\$ 272.453.109	\$ 382.470.019	\$ 402.723.263	\$ 424.088.410	\$ 446.626.504
Depreciación (\$ COP)	\$ -	\$ 49.573.200	\$ 66.097.600	\$ 66.097.600	\$ 66.097.600	\$ 66.097.600
TOTAL OPEX (\$ COP)	\$ -	\$ 1.236.216.981	\$ 1.727.718.695	\$ 1.813.624.873	\$ 1.902.230.221	\$ 1.995.370.525
IMPUESTOS DIRECTOS						
Impuesto de Renta (\$COP)	\$ -	\$ -	\$ 439.083.672,01	\$ 671.524.892,16	\$ 730.490.342,10	\$ 846.137.709,96
ICA (\$COP)	\$ -	\$ -	\$ 65.006.323,43	\$ 45.407.724,68	\$ 50.081.437,67	\$ 56.237.122,97
PREDIAL (\$COP)	\$ -	\$ -	\$ 7.000.000,00	\$ 7.000.000,00	\$ 7.000.000,00	\$ 7.000.000,00
TOTAL IMPUESTOS (\$COP)	\$ -	\$ -	\$ 511.089.995,44	\$ 723.932.616,84	\$ 787.571.779,77	\$ 909.374.832,93
TOTAL COSTOS (\$COP)	\$ 1.871.317.600,00	\$ 1.236.216.981,37	\$ 2.238.808.690,81	\$ 2.537.557.490,12	\$ 2.689.802.000,64	\$ 2.904.745.357,99
FLUJO DE FONDOS NETO	-1.871.317.600,00	1.330.556.581,85	1.523.833.920,20	1.489.674.480,42	1.776.481.886,78	2.121.695.019,58

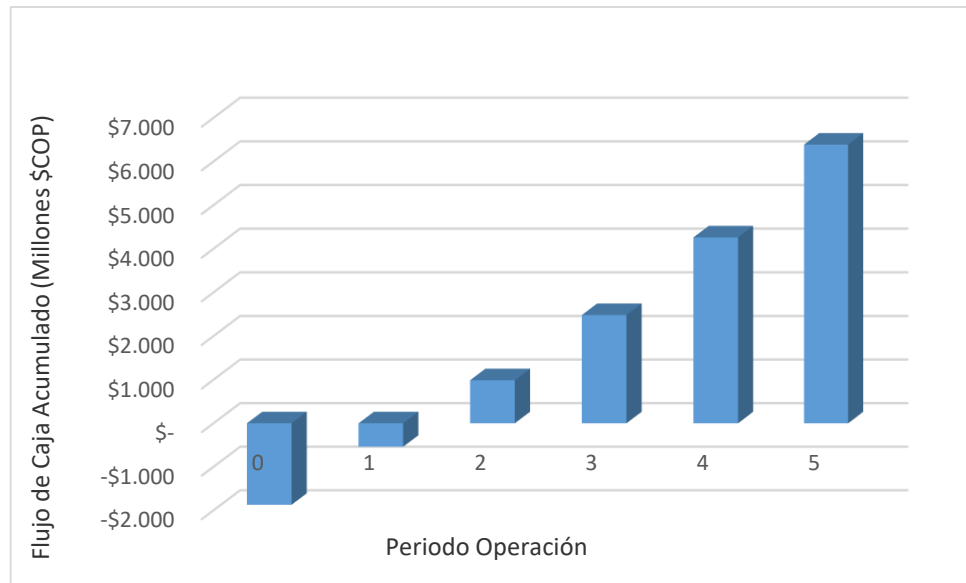
A continuación, se resume la Figura 34 con su respectivo valor acumulado para cada periodo del proyecto:

Tabla 47. Resumen Flujo de Caja Acumulado.

Año	Ingresos (\$ COP)	Egresos (\$COP)	Flujo Caja (\$COP)	Acumulado (\$COP)	Acumulado (Millones \$COP)
Inicio	0	1.871.317.600	-	-	-1.871
2018	2.566.773.563	1.236.216.981	1.330.556.582	-540.761.018	-541
2019	3.762.642.611	2.238.808.691	1.523.833.920	983.072.902	983
2020	4.027.231.971	2.537.557.490	1.489.674.480	2.472.747.382	2.473
2021	4.466.283.887	2.689.802.001	1.776.481.887	4.249.229.269	4.249
2022	5.026.440.378	2.904.745.358	2.121.695.020	6.370.924.289	6.371

En la Gráfica 24 se observa el comportamiento acumulado del flujo de caja del proyecto a lo largo de su horizonte de planeación.

Gráfica 24. Flujo de Caja Neto Acumulado del Proyecto.



Según la Gráfica 24, el proyecto tendrá flujos de caja positivos a partir del segundo año y seguirá aumentando sus ganancias hasta el quinto periodo de operación (año 2022).

4.4 INDICADORES FINANCIEROS

Los indicadores financieros son herramientas que se diseñan utilizando la información financiera de la empresa, y son útiles para medir la estabilidad, la capacidad de endeudamiento, la capacidad de generar liquidez, los rendimientos y las utilidades de la entidad, a través de la interpretación de las cifras, de los resultados y de la información en general. Los indicadores financieros permiten el análisis de la realidad financiera, de manera individual, y facilitan la comparación de la misma con la competencia y con entidades u organizaciones que hacen parte del mercado¹⁵⁵.

La evaluación financiera del proyecto compara mediante distintos parámetros, si el flujo de caja proyectado permite al inversionista obtener la rentabilidad deseada, además de recuperar el valor de la inversión¹⁵⁶, para este proyecto, los parámetros a estimar en el proyecto serán la Tasa interna de oportunidad (TIO), el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Verdadera de Rentabilidad (TVR), la Relación Beneficio - Costo y el Índice de Rentabilidad (IR).

¹⁵⁵ ACTUALÍCESE, Investigación Contable y Tributaria en Profundidad. Indicadores Financieros. [En línea]. [Citado 11 noviembre,2017] disponible en: (<https://actualicese.com/2015/02/26/definicion-de-indicadores-financieros/>)

¹⁵⁶ DEL RIO. Op. Cit.,p. 132-139.

En el Anexo I Se pueden observar los parámetros establecidos y cálculos correspondientes para obtener la TIO y demás indicadores mencionados.

4.4.1 Tasa interna de oportunidad (TIO). La tasa interna de oportunidad ó tasa mínima de descuento, es la tasa de interés mínima a la que el dueño o el inversor del proyecto, está dispuesto a ganar al invertir en un proyecto. Para su estimación se realizará un promedio simple entre dos indicadores macroeconómicos como lo son: Depósito a Término Fijo (CDT a 360 días) y su tasa promedio de captación conocida como DTF, junto a una tasa subjetiva del inversor acorde al mercado; estos indicadores presentan un incremento porcentual con base a la tasa de inflación reportada por el Banco de la República de Colombia (BRC). Lo anterior, se resume en la siguiente expresión¹⁵⁷:

Ecuación 16. Expresión para el cálculo de la TIO.

$$T.I.O = \frac{[CDT] + [DTF] + [Tasa Inversor]}{3}$$

El valor calculado para la TIO corresponde al 16,17% Efectivo Anual (EA) equivalente al 1,26% Efectivo Mensual (EM).

4.4.2 Valor presente neto (VPN). Mide la rentabilidad deseada después de recuperar toda la inversión. Para esto, calcula el valor actual de todos los flujos futuros de caja, proyectados a partir del primer período de operación, y le resta la inversión total expresada en el momento cero. Si el resultado es mayor que cero, mostrará cuánto se gana con el proyecto, después de recuperar la inversión, por sobre la tasa exigida de retorno, si el resultado es igual a cero, indica que el proyecto reporta exactamente la misma tasa que se quería obtener después de recuperar el capital invertido, si el resultado es negativo, muestra el monto que falta para ganar la tasa que se deseaba obtener después de recuperada la inversión.¹⁵⁸

Ecuación 17. Expresión para el cálculo del VPN.

$$VPN = \frac{VP_0}{(1 + TIO)^0} + \dots + \dots \frac{VP_n}{(1 + TIO)^n}$$

El VPN obtenido durante los 5 años del proyecto equivale a 3.331.646.411 \$COP, lo cual demuestra la viabilidad financiera y generación de valor del proyecto por la venta de Fuel Oil y Negro De Humo; a su vez, el valor calculado manifiesta que el proyecto es capaz de maximizar la inversión realizada en el periodo inicial.

¹⁵⁸ SAPAG CHAIN, Nassir. Proyectos de inversión, Formulación y Evaluación, Naucalpán de Juárez, Ed. Prentice Hall, 2007, p. 253.

4.4.3 Tasa verdadera de rentabilidad (TVR). La tasa verdadera de rentabilidad corresponde a los rendimientos que arrojan los dineros liberados por un proyecto y colocados a la tasa de oportunidad correspondiente (TIO), La TVR se calculó mediante la siguiente expresión:

Ecuación 18. Expresión para el cálculo de la TVR.

$$F = P(1 + TVR)^n$$

P = Valor presente de perdidas.
F = Valor futuro de utilidades.
n = Periodo.

El valor hallado para la TVR corresponde al 23,68% Efectivo Anual (EA) equivalente al 1,78% Efectivo Mensual (EM); esto indica que el proyecto es capaz de soportar una asignación marginal de inversión más alta que la TIO sin generar disminución en los rendimientos calculados.

4.4.4 Relación beneficio costo (R B/C). Compara de forma directa los costos del proyecto, es decir los recursos utilizados en la producción de los bienes de la planta con los beneficios generados por el proyecto.

La relación beneficio/costo se calculó mediante la siguiente expresión:

Ecuación 19. Expresión para el cálculo de la Relación Beneficio Costo.

$$R B/C = \frac{\sum VP_{ingresos}}{\sum VP_{egresos}}$$

Para una conclusión acerca de la viabilidad de un proyecto, bajo este enfoque, se debe tener en cuenta la comparación de la relación B/C hallada en comparación con 1, así¹⁵⁹:

1. B/C > 1 indica que los beneficios superan los costes, por consiguiente, el proyecto debe ser considerado.
2. B/C=1 Aquí no hay ganancias, pues los beneficios son iguales a los costes.
3. B/C < 1, muestra que los costes son mayores que los beneficios, no se debe considerar.

¹⁵⁹ INSTITUTO NACIONAL DE CONTADORES PÚBLICOS (INCP), Colombia. Relación Beneficio Costo. [En línea]. [Citado 12 noviembre,2017] disponible en: (<https://www.incp.org.co/relacion-beneficiocosto-por-que-es-importante-tenerla-en-cuenta-para-la-planeacion-de-un-proyecto/>).

La relación beneficio costo obtenida es de 1,37, lo que indica que los beneficios generados por la planta superan sus costos de operación, además, demuestra que los recursos disponibles de la planta serán eficientemente convertidos en bienes.

4.4.5 Índice de rentabilidad (IR). El índice de rentabilidad mide la cantidad en que aumenta la inversión en relación con cada unidad monetaria invertida. Este índice se obtiene del cociente de la suma del valor presente de los flujos de caja, que es equivalente al VPN del proyecto, con respecto al valor de la inversión inicial en el periodo cero, cuyo monto abarca el capital de trabajo del proyecto¹⁶⁰. Se calcula mediante la expresión:

Ecuación 20. Expresión para el cálculo del Índice de Rentabilidad.

$$IR = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{FNC_n}{(1 + TIO)^n}}{|I_0|}$$

$|I_0| = \text{Valor Absoluto de la inversión inicial en el tiempo 0.}$

Su análisis es análogo a la relación beneficio costo en cuanto a la viabilidad financiera del proyecto, el IR del proyecto es de 1,78 es decir que por cada peso colombiano invertido se genera un valor de 1,78 \$COP. La Tabla 48 resume los indicadores de viabilidad financiera calculados:

Tabla 48. Resumen Indicadores de Viabilidad Financiera del Proyecto.

Indicador	Valor
Tasa Interna Oportunidad (TIO)	16,17 % EA 1,26 % EM
Valor Presente Neto (VPN)	3.331.646.411 \$COP 1.108.745 USD
Tasa Verdadera Rentabilidad (TVR)	23,68 % EA 1,78 % EM
Relación Beneficio Costo	1,37
Índice de Rentabilidad (IR)	1,78

¹⁶⁰ MONDINO, Diana; PENDÁS, Eugenio. Los Métodos de Evaluación de Proyectos. En: Finanzas para Empresas Competitivas. 3 ed. Ediciones Granica S.A. México, 2005. p. 217-224.

5. CONCLUSIONES

- De acuerdo al estudio de mercado realizado para Negro de Humo y Fuel Oil en Colombia durante el periodo 2018-2022, se encuentra una demanda insatisfecha de 1.339 toneladas de Negro de Humo junto a 97.619.484 galones de Fuel Oil para el año 2022; el porcentaje de participación establecido por el proyecto acorde a la oferta de materia prima es de 56,15% para Negro de Humo y 0,10% para el Fuel Oil de la demanda total.
- Para la oferta existente de GCR a nivel nacional (15.688,36 toneladas) al año 2022, Bogotá D. C. abarca el 40% aproximadamente de la oferta de la materia prima, esto ratifica la microlocalización elegida para el proyecto (Madrid-Cundinamarca); puntualmente el proyecto aprovecha el 20-25% de dicha oferta local, equivalente a una capacidad de procesamiento de 120 toneladas de GCR al mes ó 30 toneladas semanales.
- Por medio del procedimiento experimental realizado en banco de laboratorio, se concluye que las mejores condiciones de temperatura y presión operar la unidad de reacción corresponden a 600-650°C y 76,4 kPa respectivamente, además se observa que la presión del sistema es constante lo cual garantiza una estabilidad en la operación y generación de la fracción volátil.
- El dimensionamiento y el material de construcción propuesto para el diseño de los equipos de la planta, se basó en la capacidad de procesamiento establecida de 10 ton GCR junto a exigencias de temperatura y presión en cada etapa de procesamiento.
- La tasa verdadera de rendimiento (TVR) calculada es de 23,68% EA y la tasa interna de oportunidad (TIO) establecida es de 16,17% EA, por lo tanto, el proyecto es atractivo desde el punto de vista de inversión debido a que la TVR es mayor a la TIO en 7,51 puntos porcentuales.
- El monto de inversión inicial en capital de trabajo es de 1.871.317.600 \$COP, por su parte el Valor Presente Neto (VPN) es de 3.331.646.411 \$COP bajo el horizonte de planeación establecido de 5 años, lo cual ratifica la viabilidad financiera del proyecto.

6. RECOMENDACIONES

- Caracterizar los Gases No Condensables obtenidos del proceso, con el fin de evaluar sus posibles usos alternos como combustible en procesos de generación de energía eléctrica.
- Caracterizar la fracción condensable obtenida, para establecer su viabilidad técnica y comercial como Fuel Oil o combustóleo.
- Caracterizar la carbonilla o Negro de Humo obtenido con el objetivo de determinar su uso potencial como materia prima en la elaboración de carbón activado u otras aplicaciones.
- Evaluar el efecto de la temperatura en las propiedades físicas y químicas del Fuel Oil.
- Realizar los estudios de ingeniería básica e ingeniería de detalle tomando como base el diseño conceptual realizado, con el fin de realizar una evaluación financiera más detallada.
- Evaluar la variación de la temperatura de la unidad de reacción o en las condiciones de operación de los equipos a lo largo del proceso con el fin de obtener e identificar los mejores rendimientos de Fuel Oil y Negro de Humo según el estado del mercado nacional.
- Realizar integración térmica entre corrientes dentro del proceso.
- Valorar un proceso de destilación aplicable al procesamiento del aceite pirolítico obtenido, con el fin de obtener productos de mayor valor agregado.
- Realizar la evaluación financiera del proyecto empleando apalancamiento financiero para financiar el monto de inversión inicial en capital de trabajo.
- Establecer posibles escenarios (favorable, desfavorable y real) al realizar los pronósticos de mercado, con el fin de que el proceso sea flexible al momento de producir ya sea Negro de Humo o Fuel Oil.
- Realizar el diseño mecánico detallado de los equipos de la planta con base al dimensionamiento y materiales seleccionados, para evaluar la viabilidad de construirlos en Colombia.

BIBLIOGRAFÍA

- ACOSTA, R., *et al.* Estudio preliminar de la producción de aceite y carbón mediante pirólisis intermedia de caucho de llantas usadas. *En:* Revista de Investigación Universidad del Quindío. agosto, 2013. vol. 24, p. 139-141.
- ACTUALÍCESE, Investigación Contable y Tributaria en Profundidad. Indicadores Financieros. [En línea]. [Citado 11 noviembre,2017] disponible en: (<https://actualicese.com/2015/02/26/definicion-de-indicadores-financieros/>)
- Acueducto de Bogotá D.C. Servicios. Tarifas Cargo Fijo y Consumo año 2017. [En Línea]. [Citado 22 junio, 2017] Disponible en: (<http://www.acueducto.com.co/wpsv61/wps/portal>).
- ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C., Colombia. Proyecto de Acuerdo N°. 135 de 2015. Por medio del cual se promueve la formulación del Plan estratégico para el manejo, reutilización y aprovechamiento de llantas usadas en el Distrito Capital y se adoptan otras disposiciones.
- ANDI. Rueda Verde. [En Línea]. [Citado 9 marzo, 2017] disponible en: (<http://www.ruedaverde.com.co/>).
- Apuntes de preparación y evaluación de proyectos, El análisis dimensional. [En Línea]. [Citado 21 junio, 2017] Disponible en: (<http://proyectos.ingenotas.com/2012/09/>).
- BANCO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA (BRC). Índice de Salarios, Salario Mínimo Legal en Colombia. [En línea]. [Citado 11 noviembre,2017] disponible en: (<http://www.banrep.gov.co/es/indice-salarios>).
- BANCO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA (BRC). Meta de Inflación. [En línea]. [Citado 12 noviembre,2017] disponible en: (<http://www.banrep.gov.co/es/meta-inflacion>).
- BANCO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA (BRC). Tasa de Cambio del peso colombiano-TRM. [En línea]. [Citado 11 noviembre,2017] disponible en: (<http://www.banrep.gov.co/trm>).
- BANCO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA (BRC). Tasas de Captación Mensuales y Semanales. [En línea]. [Citado 12 noviembre,2017] disponible en: (http://www.banrep.gov.co/series-estadisticas/see_tas_inter_capt_sem_men.htm).
- BASU, Prabir. Biomass Gasification and Pyrolysis. Practical Design and Theory. Burlington, USA: The Boulevard, 2010. p. 65.
- BEECHAM, M. Global market review of automotive tyres—forecasts to 2014, Aroq Limited UK, 31 July 2008, Pub ID: JA1867566.
- BERRUJECO, C, *et al.* Pyrolysis of waste tyres in an atmospheric static-bed *batch* reactor: Analysis of the gases obtained. *En:* Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. Agosto, 2005. vol. 74, p. 245–253.
- BESTON. Tyre Recycling Pyrolysis Plant Project Report. [En Línea]. [Citado 3 noviembre, 2017] disponible en: (<http://bestonpyrolysisplant.com/tyre-recycling-pyrolysis-plant-project-report/>).
- BESTON. Waste Pyrolysis System, Waste Tyre Pyrolysis Plant. [En Línea]. [Citado 11 noviembre, 2017] disponible en: (<http://bestonpyrolysisplant.com/pyrolysis-system-waste/>).

- BETANCUR, M., *et al.* Production of activated carbon by waste tyre thermochemical degradation with CO₂. En: Journal of Hazardous Materials. septiembre, 2009. vol. 168, p. 882-887.
- BRANAN, Carl. Heat Exchangers. En: Rules of Thumb for Chemical Engineers. 3 ed. Gulf Professional Printing. Elsevier. Houston, 2002. p. 30-32.
- CALDERÓN, Felipe S. Resultados Experimentales a Nivel de Planta Piloto. En: La Producción de Combustibles Vehiculares a partir de Plástico de desecho. 1 ed. Dr Calderón Laboratorios. Colombia, 2016. p. 163-165.
- CÁMARA DE COMERCIO DE BOGOTÁ D.C., Colombia. Guía para el manejo de llantas usadas en Bogotá D. C.
- CÁMARA DE COMERCIO DE BOGOTÁ D.C., Colombia. Registro Mercantil. Cómo clasificar correctamente su negocio y no fracasar en el intento. Revisión 3.1. Bogotá D. C. Uniempresarial: 2007.
- CARRERO, Javier Ignacio. Métodos Conceptuales de Diseño de Intercambiadores de Calor. En: Equipos de Transferencia de Calor- Una Guía de Estudio. 1 ed. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D. C., 2008. p. 1-21.
- CASTRO, Guillermo. Materiales y compuestos para la industria del neumático. Departamento de Ingeniería mecánica F.I.U.B.A. Buenos Aires, Argentina. Universidad de Buenos Aires, 2008. p. 2-4.
- CENGEL, Yunes A; BOLES, Michaels. Apéndice 1-Tablas de Propiedades, Figuras y Diagramas. En: Termodinámica. 7 ed. McGraw Hill. México, 2011. p. 907-914.
- CHANG, YU-MIN. On pyrolysis of waste tyre: Degradation rate and product yields. En: Resources, Conservation and Recycling. agosto, 1996. vol. 17, p. 125-139.
- CHEN, F. Studies on the thermal degradation of cis-1,4-polyisoprene. En: Fuel. noviembre, 2002. vol. 81, p. 2071-2077.
- CHEROP, P. T, *et al.* Kinetics of granulated scrap tyre pyrolysis via thermogravimetry. En: Proceedings of the Sustainable Research and Innovation Conference. Mayo, 2017. vol. 45, p. 1-6.
- CODENSA, Bogotá D.C. Tarifas de Energía. [En Línea]. [Citado 22 junio, 2017] Disponible en: (<https://www.codensa.com.co/hogar/tarifas>).
- COLON, José, *et al.* Laboratorio de Transferencia de Calor I, Intercambiador de Coraza y Tubos 1-2. Universidad del Atlántico, 2016. p. 18.
- CONGRESO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA. Ley 1819. (29, diciembre, 2016). Por la cual se adopta una reforma tributaria estructural, se fortalecen los mecanismos para la lucha contra la evasión y la elusión fiscal, y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial. Bogotá D. C., 2016. Art. 100.
- CONSEJO DE BOGOTÁ D. C., Colombia. Acuerdo 648. (16, septiembre, 2016). Por la cual se simplifica el sistema tributario distrital y se dictan otras disposiciones. Bogotá D. C., 2016. p. 1-9.
- COYUNTURA ECONÓMICA. Las Cinco Fuerzas Competitivas de Michael Porter. [En Línea]. [Citado 14 agosto, 2017]. Disponible en: (<http://coyunturaeconomica.com/marketing/cinco-fuerzas-competitivas-de-michael-porter>).

DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (DANE), Colombia. Encuesta Anual Manufacturera. [En Línea]. [Citado 5 junio, 2017]. Disponible en: (<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/industria/encuesta-anual-manufacturera-enam/eam-historicos>)

DIRECCIÓN DE IMPUESTOS Y ADUANAS NACIONALES (DIAN), Colombia. Índice Alfabético Arancelario. [En Línea]. [Citado 5 junio, 2017]. Disponible en: (<https://muisca.dian.gov.co/WebArancel/DefConsultaIndiceAlfabetico.faces>)

DISEÑO E INGENIERÍA DE VENTILACIÓN Y CLIMATIZACIÓN. Presión Atmosférica. [En Línea]. [Citado 17 enero, 2018] disponible en: (<https://efrainpuerto.wordpress.com/2011/02/26/f1-2/>).

DOING. Pyrolysis Machine Products. Pyrolysis Plant. [En Línea]. [Citado 9 abril, 2017] disponible en: (<http://www.china-doing.com>)

Dr. CALDERÓN LABS. Programa de Investigación en combustibles alternativos, Plasticcombustibles Ventures 3. [En línea]. [Citado 11 noviembre, 2017] disponible en: (<http://www.drcalderonlabs.com/Plasticcombustibles/Index%20Plasticcombustibles.htm>).

ECOPETROL, Colombia. Catálogo de Productos, Combustóleo (Fuel Oil No 6), Especificaciones Técnicas. [En Línea]. [Citado 21 junio, 2017]. Disponible en: (http://www.ecopetrol.com.co/especiales/Catalogo_de_Productos/Combustibles6.html)

ECOPETROL, Colombia. Catálogo de productos. [En Línea]. [Citado 8 abril, 2017] disponible en: (http://www.ecopetrol.com.co/especiales/Catalogo_de_Productos/pdf/Ecopetrol%20Combustoleo%20VSM-01.pdf.)

ECOPETROL, Colombia. Glosario, Barril Petróleo. [En Línea]. [Citado 20 junio, 2017]. Disponible en: (<http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/servicios-de-informacion-al-ciudadano/glosario/a-b>).

EDUARD, L., *et al.* Tyre char preparation from waste tyre rubber for dye removal from effluents. *En: Journal of Hazardous Materials.* marzo, 2010. vol. 175, p. 151-158.

EDUARD, L.K., *et al.* Production of active carbons from waste tyres- A review. *En: Carbon.* agosto, 2004. Vol. 42, p. 2789-2805.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA), Estados Unidos. Scrap Tyres, Basic Information. [En Línea]. [Citado 7 abril, 2017] disponible en: (<https://www3.epa.gov/epawaste/conserva/materials/tyres/basic.htm>).

FOGLER, Scott. Balances Molares. *En: Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas.* 4 ed. Pearson Education. México, 2008. p. 1-10.

FONSECA, William. Evaluación de un reactor de Lecho Fluidizado en el proceso de pirólisis catalítica usando desecho de caucho de llanta. Trabajo de grado para optar al título de Master en Ingeniería Química. Bogotá D. C.: Universidad de los Andes, 2016. p. 15-17.

GAS NATURAL FENOSA. Historia del Gas Natural, Características del Gas Natural. [En Línea]. [Citado 8 noviembre, 2017]. Disponible en: (<http://www.gasnaturaldistribucion.com/es/conocenos/quienes+somos/historia+del+gas/1297104955871/caracteristicas+del+gas+natural.html>)

GERENCIE, Capital de Trabajo. [En línea]. [Citado 11 noviembre,2017] disponible en: (<https://www.gerencie.com/capital-de-trabajo.html>)

GERENCIE, Impuestos Directos. [En línea]. [Citado 11 noviembre,2017] disponible en: (<https://www.gerencie.com/impuestos-directos.html>).

GONZÁLEZ, J.F, *et al.* Pyrolysis of automobile tyre waste. Influence of operating variables and kinetics study. En: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. octubre, 2001. vol. 58-59, p. 667-683.

HORNGREN, Charles, *et al.* La contabilidad Administrativa y la Organización en los Negocios. En: Contabilidad Administrativa. 13 ed. Pearson Educación. México, 2006. p. 13-17.

INCOMBUSTIÓN, Colombia. Investigación e innovación en combustión avanzada de uso industrial. [En Línea]. [Citado 8 noviembre, 2017]. Disponible en: (http://www.upme.gov.co/calculadora_emisiones/aplicacion/Informe_Final_FECOC_Correcciones_UPME_FunNatura.pdf).

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Referencias Bibliográficas, Contenido, forma y estructura NTC 5613. Bogotá D.C. El Instituto, 2008. 33p. c.

_____. Referencias documentales para fuentes de información electrónicas. NTC 4490. Bogotá D.C. El Instituto, 2008. 23p. c.

_____. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Bogotá D.C. El Instituto, 2008. 36p. c.

INSTITUTO NACIONAL DE CONTADORES PÚBLICOS (INCP), Colombia. Relación Beneficio Costo. [En línea]. [Citado 12 noviembre,2017] disponible en: (<https://www.incp.org.co/relacion-beneficiocosto-por-que-es-importante-tenerla-en-cuenta-para-la-planeacion-de-un-proyecto/>).

INSTRUCTIVO DE OPERACIÓN DE UN SEAPRADOR DE FLUIDO Y GAS. Separador Vertical Bifásico. [En Línea]. [Citado 9 noviembre, 2017]. Disponible en:(<http://instructivoseparador.blogspot.com.co/p/funcionamiento-de-un-separador.html>).

JUMA, M, *et al.* Pyrolysis and Combustion of scrap Tyre. En: Petroleum & Coal. febrero, 2006. vol. 48, no. 1, p. 15-16.

KAR, Y. Catalytic pyrolysis of car tyre waste using expanded perlite. En: Waste Management. agosto, 2011. vol. 31, p. 1772-1782.

LARESGOITI, M.F, *et al.* Characterization of the liquid products obtained in tyre pyrolysis. En: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. Junio, 2004. vol. 71, p. 917-934.

LARESGOITI, M.F, *et al.* Chromatographic analysis of the gases obtained in tyre pyrolysis. En: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. mayo, 2000. vol. 55, p. 43-54.

LEUNG, D.Y; WANG, C.L. Kinetic study of scrap tyre pyrolysis and combustion. En: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. febrero, 1998. vol. 45, p. 153-169.

LI, S.Q. *et al.* Pilot-Scale pyrolysis of scrap tyres in a continuous rotatory kiln reactor. En: Industrial & Engineering Chemistry Research. Junio, 2004. vol 43, p. 5133-5145.

LI, S.Q. *et al.* Pyrolysis process for the treatment of scrap tyres: preliminary experimental results. En: Waste Management. Junio, 2002. vol 22, p. 917-923.

MARTÍNEZ, J., *et al.* Waste tyre pyrolysis-A review. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. Marzo, 2013. vol. 23, p. 198-199.

MÉNDEZ, Christian Víctor y SOLANO, Franklin Vinicio. Diseño de triturador de neumáticos usados; capacidad de 1 ton/h, para la empresa municipal de aseo en cuenca (EMAC). Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Mecánico. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana, Facultad de ingenierías. 2010. p. 55-62.

MESA, María Paula; ORTÍZ, Carol Ivonne. Evaluación del proceso de pirólisis para la producción de diesel a nivel de laboratorio a partir de residuos plásticos de industrias de alimentos. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Bogotá D. C.: Fundación Universidad de América, 2016. p. 33.

METAZA. Productos para la Industria. Acero Inoxidable [En Línea]. [Citado 3 noviembre, 2017] disponible en: (https://www.metaza.com.co/media/acero_inoxidable_0.pdf).

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, Colombia. Resolución 898 de 1995. Por el cual se regulan los criterios ambientales de la calidad de los combustibles líquidos y sólidos utilizados en hornos, calderas de uso comercial e industrial y en motores de combustión interna de vehículos automotores. [En Línea]. [Citado 8 abril, 2017]. Disponible en: (http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Normativa/Resoluciones/res_0898_230895.pdf).

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, Colombia. Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). Cadena del Carbón. [En Línea]. [Citado 8 noviembre, 2017]. Disponible en: (http://www.upme.gov.co/Docs/Cadena_Carbon_2012.pdf)

MIRANDA, Juan José. Estructura Financiera del Proyecto. En: Gestión de Proyectos: Identificación-Formulación- Evaluación Financiera, Económica, Social, Ambiental. 4 ed. MM Editores. Bogotá D. C., 2003. p. 89-92.

MONDINO, Diana; PENDÁS, Eugenio. Los Métodos de Evaluación de Proyectos. En: Finanzas para Empresas Competitivas. 3 ed. Ediciones Granica S.A. México, 2005. p. 217-224.

MURCIA, Juan Camilo; ROMERO, Andrés Ricardo. Diseño de un sistema primario en el proceso de trituración de llantas usadas desalambreadas. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico. Bogotá D. C.: Fundación Universidad de América, 2016. p. 25-32.

MURILLO, R. *et al.* Process for the Separation of Gas Products from Waste Tyre Pyrolysis. En: Industrial & Engineering Chemistry Research. Abril, 2006. vol 45, p. 1734-1738.

OCADE LTDA; SANIPLAN y AMBIENTAL S.A. Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de Llantas y neumáticos usados generados por el parque automotor de Bogotá. Resumen Ejecutivo.

OIL PRODUCTION. Sistema Producción Separadores. Diseñando sistemas de producción de petróleo y gas. [En Línea]. [Citado 5 noviembre, 2017]. Disponible en: (http://www.Oilproduction.net/files/Sistema_produccion_separadores.pdf).

PROEXPORT. Citado por: DEL RIO, Félix Gustavo; RODRÍGUEZ, Diego Nicolás y VARGAS, Nelson Leonardo. Elaboración de los estudios de pre factibilidad para la reutilización de desechos sólidos de llantas como agregado en mezclas asfálticas para capas de rodadura dentro del marco investigativo de la empresa Renovoy S.A. Trabajo de grado Especialista en Desarrollo y Gerencia

Integral de Proyectos. Bogotá D. C.: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2012. p. 62-64.

QUEK, Augustine, *et al.* Liquefaction of waste tyres by pyrolysis for Oil and chemicals- A review. En: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. mayo, 2013. vol. 101, p. 1-16.

REQUENA, G, *et al.* Diseño y Evaluación de Separadores Bifásicos y Trifásicos. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero de Petróleo. Caracas: Universidad Central de Venezuela, 2006. p. 51-52.

RESCHENER, Kurt. Scrap Tyre and Rubber Recycling. A Summary of Prevalent Disposal and Recycling Methods. [En Línea]. [Citado 7 abril, 2017] disponible en: ([http://www.entyre-engineering.de/Scrap Tyre Recycling.pdf](http://www.entyre-engineering.de/Scrap_Tyre_Recycling.pdf)).

ROY, C *et al.* Recycling of scrap tyres to Oil and carbon black by vacuum pyrolysis. En: Resources, Conservation and Recycling. septiembre, 1990. vol. 4, p. 203-213.

ROY, C. *et al.* Conversion of used tyres to Carbon Black an Oil by pyrolysis. En: Rubber Recycling. Taylor & Francis Group, 2005. p. 437-460.

ROY, C. *et al.* Pilot-Scale plant demonstration of used tyres vacumm pyrolysis. En: Pyrolysis and Gasification. 1989.

SÁNCHEZ, Daniel Jose. Synthetic diesel production through catalytic pyrolysis of biomass-waste tyre mixtures. Trabajo de grado Maestría en Ciencias en Ingeniería Química. Bogotá D. C.: Universidad de los Andes, 2015. p. 18-21.

SAPAG CHAIN, Nassir. Proyectos de inversión, Formulación y Evaluación, Naucalpán de Juárez, Ed. Prentice Hall, 2007, p. 253.

SECRETARÍA DISTRITAL DE HACIENDA DE BOGOTÁ D.C. Sistema de Retenciones. [En Línea]. [Citado 11 noviembre, 2017] Disponible en: (<http://www.shd.gov.co/shd/sistema-de-retenciones>).

SUHANYA, M. *et al.* Recovery of Oil from Waste Tyres using Pyrolysis Method: A Review. En: International Journal of Research in Engineering & Technology. Julio, 2013. vol. 1, no. 2, p. 81-85.

T.A.Geissman. Principios de química orgánica. Barcelona: Editorial Reverté, s.a, 1974. p. 895.

TAVERA, C., *et al.* Production of Oil and Char by Intermediate Pyrolysis of Scrap Tyres: Influence on Yield and Product Characteristics. En: Chemical Engineering Journal. 2015. vol. 13, p. 189-200.

TURTON, Richard, *et al.* Diagrams for understanding chemical processes. En: Analysis, Synthesis, and design of Chemical Processes. 4 ed. USA: Pearson Education, 2012. p. 11-19.

UNIVERSIDAD DE GRANADA. Aula Virtual, Diseño del Sistema de Tuberías y Cálculo de las Bombas. [En Línea]. [Citado 5 noviembre, 2017]. Disponible en:(<http://www.ugr.es/~aulavirtualpfc/q/descargas/documentos/BOMBAS%20Y%20TUBERIAS.pdf>).

WALAS, Stanley M. Heat Transfer and Heat Exchangers. En: Chemical Process Equipment. 1 ed. Butterworth-Heinemann.1988. p. 184-186.

WILLIAMS, P.T *et al.* Combustion of tyre pyrolysis Oil. En: Process Safety Environmental Protection. 1998. vol 76, p. 291-301.

YANG, J; ROY, C. A new method for DTA measurement of enthalpy change during the pyrolysis of rubbers. En: Thermochimica Acta. septiembre, 1995. vol. 288, p. 155-168.

ZABANIOTOU, A, *et al.* Active carbon production from used tyre in two-stage procedure: Industrial pyrolysis and bench scale activation with H₂O-CO₂ mixture. En: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. noviembre, 2004. vol. 72, p. 289-297.

ANEXOS

ANEXO A.

DESARROLLO DEL MÉTODO DE WINTERS

Teóricamente el método permite estimar o suavizar valores pasados y futuros de una serie de tiempo de manera exponencialmente decreciente, cuantitativamente se usan las siguientes expresiones en la estimación del nivel, tendencia, estacionalidad y pronóstico¹⁶¹:

Ecuación 21. Términos del Método de Winters.

$$\begin{aligned}L_t &= \left(a * \frac{Y_t}{S_{t-s}} \right) + (1 - \alpha) * (L_{t-1} + T_{t-1}) \\T_t &= \beta * (L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta) * T_{t-1} \\S_t &= \left(\gamma * \frac{Y_t}{L_t} \right) + (1 - \gamma) * (S_{t-s}) \\\hat{Y}_{t+p} &= (L_t + p * T_t) * (S_{t-s+p})\end{aligned}$$

Donde:

$$\begin{aligned}L_t &= \text{nuevo valor suavizado, estimado de nivel actual} \\ \alpha &= \text{constante de suavización lineal } 0 < \alpha < 1 \\ Y_t &= \text{nueva observación o valor real en el periodo } t \\ \beta &= \text{constante de suavización de tendencia } 0 < \beta < 1 \\ T_t &= \text{estimado de tendencia} \\ \gamma &= \text{constante de suavización de estacionalidad } 0 < \gamma < 1 \\ S_t &= \text{estimado de estacionalidad} \\ p &= \text{periodos futuros a pronosticar} \\ s &= \text{longitud de estacionalidad} \\ \hat{Y}_{t+p} &= \text{valor pronosticado para el periodo } p \text{ en el futuro}\end{aligned}$$

En seguida se muestra el procedimiento para pronosticar las cantidades de Oferta de Negro de Humo dentro de los datos históricos recopilados del año 2006 al 2014; en donde se inicia calculando L_t , T_t , S_t y finalmente el valor del pronóstico:

¹⁶¹ HANKE. Op. Cit., p. 130-135.

Tabla 49. Muestra de cálculo del método de Winter en la serie histórica para las cantidades de Oferta de Negro de Humo.

Año	Periodo	Producción Oferta (Ton)	Lt	Tt	St	Pronóstico (Ton)
2006	1	60.645	60.645,00	0,00	1,00	
2007	2	55.192	59.881,58	-763,42	0,97	60.645,00
2008	3	41.015	56.755,07	-3.126,51	0,88	57.405,14
2009	4	47.316	53.655,55	-3.099,52	0,88	47.146,56
2010	5	50.687	50.574,37	-3.081,18	1,00	50.556,04
2011	6	50.171	48.077,69	-2.496,69	1,00	46.117,02
2012	7	39.340	45.464,50	-2.613,18	0,87	40.071,70
2013	8	41.113	43.391,77	-2.072,74	0,91	37.715,03
2014	9	35.567	40.509,66	-2.882,10	0,96	41.353,08

Para el primer periodo se suponen $L_t = \text{valor histórico}$, $T_t = 0$, $S_t = 1$ y el pronóstico no se calcula, Debido a que los datos presentan un periodo de estacionalidad de 4 años, $s = 4$, en los primeros cuatro periodos los términos S_{t-s} y S_{t-s+p} se suponen como S_{t-1} , es decir el estimado de estacionalidad del periodo anterior, Una vez estimados los primeros periodos de estacionalidad se aplican las ecuaciones del método hasta el último periodo de la serie histórica.

Tabla 50. Muestra de cálculo del método de Winter para las cantidades de Oferta de Negro de Humo.

Año	Periodo	Pronóstico (Ton)
2015	10	37.546,84
2016	11	30.367,94
2017	12	28.838,01
2018	13	27.687,98
2019	14	24.934,49
2020	15	22.181,00
2021	16	19.427,51
2022	17	16.674,02

Las ecuaciones del método permiten pronosticar los mismos periodos que la longitud de la estacionalidad, es decir desde el periodo 9 (año 2014) hasta el periodo 13 (año 2014); a partir del periodo 14 (año 2015), la ecuación del pronóstico \hat{Y}_{t+p} se basa únicamente en el último periodo histórico es decir el 9, en donde lo único que cambia es la cantidad de periodos a pronosticar, es decir la variable 9, Los valores de las constantes α , β , γ para esta serie corresponden a:

Cuadro 29. Constantes de suavización del método de Winter, para la serie de Oferta de Cantidades de Negro de Humo.

α	β	γ
0,14	1	0,37

La determinación de las constantes α, β, γ parte de un análisis de medición de error del método de pronóstico, mediante los siguientes parámetros:

Cuadro 30. Parámetros utilizados en la medición de error del método Winter.

Parámetro	Ecuación
Desviación Media Absoluta (MAD)	$\frac{1}{n} * \left(\sum_{t=1}^n Y_t - \hat{Y}_t \right)$
Error Cuadrático Medio (MSE)	$\frac{1}{n} * \left(\sum_{t=1}^n (Y_t - \hat{Y}_t)^2 \right)$
Raíz Cuadrada del Error Cuadrático Medio (RMSE)	$\sqrt{\frac{1}{n} * \left(\sum_{t=1}^n (Y_t - \hat{Y}_t)^2 \right)}$
Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE)	$\frac{1}{n} * \left(\sum_{t=1}^n \frac{ Y_t - \hat{Y}_t }{ Y_t } \right)$
Error Porcentual Medio (MPE)	$\frac{1}{n} * \left(\sum_{t=1}^n \frac{Y_t - \hat{Y}_t}{Y_t} \right)$

Fuente: HANKE, John. Pronósticos en los Negocios. Ciudad de México. 2010.

En donde se busca la combinación de las constantes α, β, γ que minimice en este caso el parámetro MAPE; esto se realizó con un software de optimización, usando la herramienta Solver de Microsoft Excel®, El MAPE es un porcentaje que indica que tan acertado está el método de pronóstico; para que un método de pronóstico sea confiable el MAPE deber ser inferior al 15%, Lo anterior indica que cada serie de pronóstico tanto de Oferta y Demanda de las cantidades y ventas de Negro de Humo y Fuel tendrán valores distintos, Además, el parámetro MPE debe ser aproximadamente igual a cero, para indicar que el método no está sesgado, es decir que esté sobreestimando (MPE<0) o subestimando (MPE>0) el pronóstico, Para efectos prácticos, se define el error o residuo de un valor para determinado periodo de la serie pronosticada, como:

$$e_t = Y_t - \hat{Y}_t$$

Los resultados de los parámetros de error para la serie de cantidades de Oferta para Negro de Humo se muestran a continuación:

Tabla 51. Muestra de cálculo parámetros de error para la serie de Oferta de Negro de Humo.

Año	Producción (Ton)	Pronóstico (Ton)	Error et (Ton)	 et (Ton)	et² (Ton)	 et /Yt	et /Yt
2006	60.645						-
2007	55.192	60.645	-5.453	5.453	29.735.209	0,099	0.099
2008	41.015	57.405	-16.390	16.390	268.636.573	0,400	0.400
2009	47.316	47.147	170	170	28.741	0,004	0.004
2010	50.687	50.556	131	131	17.151	0,003	0.003
2011	50.171	46.117	4.054	4.054	16.434.789	0,081	0.081
2012	39.340	40.072	-732	732	535.148	0,019	0.019
2013	41.113	37.715	3.398	3.398	11.543.858	0,083	0.083
2014	35.567	41.353	-5.786	5.786	33.477.406	0,163	0.163
SUMATORIA			-20.608,54	36.112,74	360.408.875,55	0.85	-0.51
MAD (Ton)	5.159		MAPE (%)	12%			
MSE (Ton)	51.486.982,2		MPE (%)	-7%			
RMSE (Ton)	7.175,4						

Finalmente, se presentan combinación de las constantes α, β, γ para las demás series de Oferta y Demanda para Negro de Humo y Fuel Oil analizadas en el proyecto.

Cuadro 31. Constantes de suavización del método de Winter usadas en las series pronosticadas.

Serie Pronosticada	Constantes		
	α	β	γ
Ventas-Oferta Negro de Humo	0,06	0,11	0,27
Cantidades- Oferta Fuel Oil	0,4	0,1	0,3
Ventas-Oferta Fuel Oil	0,4	0,1	0,3
Cantidades- Demanda Negro de Humo	0,14	1	0,67
Ventas-Demanda Negro de Humo	0,06	0,11	0,27
Cantidades- Demanda Fuel Oil	0,4	0,1	0,3
Ventas-Demanda Fuel Oil	0,4	0,1	0,3

ANEXO B.

MÉTODO DE ANÁLISIS DIMENSIONAL PARA MICROLOCALIZACIÓN DE LA PLANTA

La estimación de los índices de comparación entre las posibles opciones de locación escogidas se fundamentó en la siguiente tabla:

Tabla 52. Muestra de Cálculo Índices Locacionales de la Microlocalización.

Descripción del Factor	Unidad de Medida	A	B	C	Prioridad del Factor	A VS B	A VS C	B VS C
Infraestructura necesaria	Puntos	1	7	4	3	0,00	0,02	5,36
Disposición de materia prima	Puntos	2	9	1	5	0,00	32,00	59.049,00
Transporte	Puntos	1	8	1	4	0,00	1,00	4.096,00
Tarifa - Acueducto	Unidades (\$/m3)	19,61	19,61	19,61	3	1,00	1,00	1,00
Tarifa - Alcantarillado	Unidades (\$/m3)	11,37	11,37	11,37	3	1,00	1,00	1,00
Tarifa - Comunicaciones	Unidades (\$/mes)	200,00	200,00	200,00	3	1,00	1,00	1,00
Tarifa - Energía eléctrica	Unidades (\$/kWh)	0,53	0,53	0,53	3	1,00	1,00	1,00
Tarifa - Arriendo	Unidades (\$/m2)	20,00	11,00	9,50	4	10,93	19,64	1,80

ANEXO C.

TABLAS DE RESULTADOS EXPERIMENTACIÓN

En seguida se muestran los datos obtenidos de temperatura superior e inferior del reactor junto a su presión de operación en función del tiempo de reacción establecido de 4 horas o 240 minutos, para los diferentes niveles de temperatura seleccionados -Ver Cuadro 10-:

Tabla 53. Resultados experimentales para T=450°C.

T operación (°C) = 450°C				
t (mín)	T superior (°C)	T inferior (°C)	P operación (cm agua)	P operación (Pa)
0	19	15	0	74.660,5
10	21	103	10	75.640,5
20	24	273	10	75.640,5
30	25	405	10	75.640,5
40	34	493	10	75.640,5
50	43	458	10	75.640,5
60	51	443	10	75.640,5
70	57	453	10	75.640,5
80	62	451	10	75.640,5
90	67	450	10	75.640,5
100	71	451	10	75.640,5
110	75	451	10,5	75.689,5
120	78	450	10,5	75.689,5
130	79	450	10,5	75.689,5
140	81	450	10,5	75.689,5
150	83	450	10,5	75.689,5
160	86	450	10,5	75.689,5
170	86	450	10,5	75.689,5
180	86	450	10,5	75.689,5
190	87	450	10,5	75.689,5
200	90	450	10,5	75.689,5
210	93	450	10,5	75.689,5
220	100	450	10,5	75.689,5
230	104	450	10,5	75.689,5
240	109	450	10,5	75.689,5

Tabla 54. Resultados experimentales para T=500°C.

T operación (°C) = 500°C

t (mín)	T superior (°C)	T inferior (°C)	P operación (cm agua)	P operación (Pa)
0	27	14	0	74.660,5
10	29	131	10	75.640,5
20	36	298	10	75.640,5
30	48	427	10	75.640,5
40	68	510	10	75.640,5
50	82	506	10	75.640,5
60	83	499	10	75.640,5
70	93	501	10	75.640,5
80	112	502	10	75.640,5
90	130	499	10	75.640,5
100	144	500	10	75.640,5
110	163	500	10	75.640,5
120	171	500	10	75.640,5
130	180	500	10	75.640,5
140	185	500	10	75.640,5
150	189	500	10	75.640,5
160	193	500	10	75.640,5
170	197	501	10	75.640,5
180	199	500	10	75.640,5
190	204	501	10	75.640,5
200	208	499	10	75.640,5
210	212	500	10	75.640,5
220	216	500	10	75.640,5
230	220	500	10	75.640,5
240	222	501	10	75.640,5

Tabla 55. Resultados experimentales para T=550°C.

T operación (°C) = 550°C				
t (mín)	T superior (°C)	T inferior (°C)	P operación (cm agua)	P operación (Pa)
0	26	16	0	74.660,5
10	27	131	10	75.640,5
20	33	282	10	75.640,5
30	42	387	10	75.640,5
40	59	470	10	75.640,5
50	77	545	10	75.640,5
60	90	561	10	75.640,5
70	109	549	10	75.640,5
80	129	551	10,5	75.689,5
90	149	551	10,5	75.689,5
100	177	550	10,5	75.689,5
110	185	550	10,5	75.689,5
120	204	550	10,5	75.689,5
130	220	551	10,5	75.689,5
140	231	550	10,5	75.689,5
150	240	550	10,5	75.689,5
160	247	550	11	75.738,5
170	253	550	11	75.738,5
180	258	550	11	75.738,5
190	263	550	11	75.738,5
200	267	550	11	75.738,5
210	270	550	11	75.738,5
220	273	550	10	75.640,5
230	275	550	10	75.640,5
240	276	551	10	75.640,5

Tabla 56. Resultados experimentales para T=600°C.

T operación (°C) = 600°C

t (mín)	T superior (°C)	T inferior (°C)	P operación (cm agua)	P operación (Pa)
0	27	19	0	74.660,5
10	29	135	10	75.640,5
20	36	298	10	75.640,5
30	49	416	10	75.640,5
40	68	507	10	75.640,5
50	81	563	10	75.640,5
60	104	603	10	75.640,5
70	134	610	10	75.640,5
80	152	599	10	75.640,5
90	165	599	10	75.640,5
100	177	600	10	75.640,5
110	188	600	10	75.640,5
120	198	601	10	75.640,5
130	205	601	10	75.640,5
140	209	600	10	75.640,5
150	215	600	10	75.640,5
160	211	599	10	75.640,5
170	218	599	10	75.640,5
180	220	600	10	75.640,5
190	221	600	10	75.640,5
200	224	599	10	75.640,5
210	227	600	10	75.640,5
220	227	601	10	75.640,5
230	230	602	10	75.640,5
240	232	598	10	75.640,5

Tabla 57. Resultados experimentales para T=650°C.

T operación (°C) = 650°C				
t (mín)	T superior (°C)	T inferior (°C)	P operación (cm agua)	P operación (Pa)
0	31	22	0	74660,5
10	34	156	10	75.640,5
20	40	314	10	75.640,5
30	51	411	10	75.640,5
40	69	482	10	75.640,5
50	83	546	10	75.640,5
60	98	593	15,5	76.179,5
70	142	632	15,5	76.179,5
80	172	658	16	76.228,5
90	196	652	17	76.326,5
100	223	649	17	76.326,5
110	243	650	17	76.326,5
120	260	652	16	76.228,5
130	266	651	16	76.228,5
140	281	651	13	75.934,5
150	291	650	14	76.032,5
160	293	650	14	76.032,5
170	293	649	14	76.032,5
180	296	650	14	76.032,5
190	299	651	14	76.032,5
200	300	650	13	75.934,5
210	302	650	13	75.934,5
220	304	651	12	75.836,5
230	306	650	12	75.836,5
240	303	650	12	75.836,5

La Tabla 58 presenta la cuantificación de los productos obtenidos para cada ensayo a diferente temperatura, los gases no condensables se obtienen de la resta de la masa de la muestra y de la masa de Negro de Humo y Fuel Oil, asumiendo que no hay pérdidas:

Tabla 58. Resultados de Gravimetría de los productos obtenidos.

T (°C)	Masa Muestra (g)	Masa Fuel Oil (g)	Masa Negro de Humo (g)	Masa Gases No condensables (g)*
450	500	21	418	62
500	500	58	366	76
550	500	78	312	110
600	500	79	310	111
650	500	119	261	120

**. La masa de gases no condensables se estimó con base a la diferencia de la materia primas y los demás productos obtenidos.*

Empleando la Tabla 58 se calculó la pérdida de masa que tuvo la muestra en cada ensayo bajo las condiciones de temperatura empleadas y la conversión alcanzada:

Tabla 59. Resultados de la Conversión para cada ensayo.

T (°C)	Masa Muestra (g)	Pérdida de masa (g)	X (conversión)
450	500	83	0,165
500	500	134	0,268
550	500	188	0,376
600	500	190	0,38
650	500	239	0,478

ANEXO D.

DISEÑO UNIDAD DE REACCIÓN

El análisis dimensional de las variables implicadas en la Ecuación 6 de la constante de velocidad de reacción, se presenta a continuación:

$$K_1 = \text{Rapidez de reacción (min}^{-1}\text{)}$$

$$K_0 = \text{Factor Preexponencial (min}^{-1}\text{)}$$

$$Ea = \text{Energía de activación de la reacción } \left(\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}\right)$$

$$R = \text{Constante universal de los gases } \left(\frac{\text{J}}{\text{mol} * \text{K}}\right) = 8.314$$

$$T = \text{Temperatura de reacción (K)}$$

- Cinética de Reacción y tiempo de residencia: Para hallar el tiempo de reacción o residencia (min) entre una conversión de 0 a 0.478 se solucionó la Ecuación 11 de manera integral:

$$\begin{aligned} \frac{\partial X}{\partial t} &= \left[K_0 * \exp\left(\frac{-Ea}{RT}\right) \right] * (1 - X) \\ \int_0^{0.478} \frac{\partial X}{(1 - X)} &= \left[K_0 * \exp\left(\frac{-Ea}{RT}\right) \right] * \int_0^{t_{rxn}} \partial t \\ [-\ln(1 - X)]_0^{0.478} &= \left[K_0 * \exp\left(\frac{-Ea}{RT}\right) \right] * t_{rxn} \\ t_{rxn} &= \frac{[-\ln(1 - X)]_0^{0.478}}{\left[K_0 * \exp\left(\frac{-Ea}{RT}\right) \right]} \end{aligned}$$

Lo cual arrojó un valor de 41,87 horas para el tiempo de retención dentro del reactor.

- Volumen y Dimensionamiento del Cuerpo del Reactor: Los cálculos realizados para el dimensionamiento del cuerpo del reactor se presentan a continuación:

Ecuación 22. Volumen del Reactor.

$$V = \frac{m}{\tilde{n}} = \frac{10.000 \text{ kg}}{360 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 27,78\text{m}^3 \approx 28\text{m}^3$$

Ecuación 23. Diámetro del Reactor.

$$V_{cilindro} = \frac{\delta}{4} * \phi^2 * L$$
$$\phi = \sqrt{\frac{4 * V_{cilindro}}{\delta * L}} = \sqrt{\frac{4 * 28m^3}{\delta * 6m}} = 2,44 m$$

Ecuación 24. Radio y Perímetro del Reactor.

$$r = \frac{\phi}{2} = 1,22 m \quad P = \delta * \phi = 7,67m$$

- Área de transferencia y distribución radial de chaqueta de calentamiento y aislantes:

Ecuación 25. Área de Transferencia en el Reactor.

$$A_{transferencia} = P * L = 7,67m * 6m = 45,99m^2 \approx 46m^2$$

Con respecto a la distribución radial o espacial de la chaqueta de calentamiento, aislantes y coraza del reactor, se emplearon los siguientes coeficientes de diseño heurísticos:

Ecuación 26. Heurística para la distribución radial del concreto refractario.

$$r_{int-concreto} = 1,2625 * r_{reactor} = 1,54m$$
$$r_{ext-concreto} = 1,4125 * r_{reactor} = 1,72m$$
$$\Delta X_{concreto} = r_{ext-concreto} - r_{int-concreto} = 1,72 - 1,54 = 0,18m$$

El radio de la lana de roca consecutiva al concreto refractario se estimó de la misma manera, junto al espesor o luz entre la pared exterior del reactor y el radio interno del concreto refractario:

Ecuación 27. Heurística para la distribución radial de la Lana de Roca.

$$r_{ext-lana de roca} = 1,5125 * r_{reactor} = 1,84m$$
$$\Delta X_{lana de roca} = r_{ext-lana de roca} - r_{ext-concreto} = 1,84 - 1,72 = 0,125m$$
$$\Delta X_{chaqueta de calentamiento} = r_{int-concreto} - r_{reactor} = 1,54 - 1,22 = 0,32m$$

- Velocidad de Rotación del Reactor: La velocidad de giro en RPM se parametrizo en 0,4 RPM debido a que es valor usual empleado en la operación de este tipo de maquinaria, para estimar la velocidad de giro en sistema internacional (m/s), se usa la siguiente expresión:

Ecuación 28. Velocidad de Rotación del Horno.

$$V_{rotación} = RPM * \left(\frac{\check{\delta} * \emptyset}{60} \right) = 0,4 * \left(\frac{2,44\check{\delta}}{60} \right) = 0,0511 \frac{m}{s}$$

Dentro de los servicios auxiliares identificados se calculó la potencia requerida por el motorreductor en caballos de fuerza (HP) y vatios (W), para garantizar una rotación de 0,4 RPM en el horno con una masa de alimentación de 10.000 kg, mediante la siguiente expresión:

Ecuación 29. Potencia del Motorreductor del Horno Rotatorio.

$$Potencia Motorreductor (HP) = \frac{Torque en el Horno * RPM}{716,2}$$

$$Torque en el Horno = \frac{2}{3} * r * 10.000 = 8.133,33 \text{ kg.m}$$

$$Potencia Motorreductor = \frac{8.133,33 * 0,4}{716,2} = 4,542 \text{ HP}$$

$$Potencia Motorreductor = 4,542 \text{ HP} = 3.386,97 \text{ W} \approx 3.387 \text{ W}$$

ANEXO E.

DISEÑO UNIDAD DE INTERCAMBIO DE CALOR

Por medio del balance de masa y energía del proceso, se establecieron las condiciones de temperatura y flujo másico de las corrientes de entrada y salida del intercambiador, junto a las propiedades térmicas de Capacidad Calorífica y Densidad a temperatura media entre temperaturas de entrada y salida (242,5°C):

Cuadro 32. Parámetros de las Corrientes del Intercambiador de Calor.

Fluido Caliente (Gas Efluente del Reactor)		Fluido Frío (Agua) ¹⁶²	
Temperatura de Entrada (T1)	450 °C (723,15 K)	Temperatura de Entrada (t1)	10 °C (283,15 K)
Temperatura de Salida (T2)	35 °C (308,15 K)	Temperatura de Salida (t2)	90 °C (363,15 K)
Flujo Másico (M)	114,163 kg/h	Flujo Másico (m)	-
Capacidad Calorífica* (C)	2,477 kJ/kg K	Capacidad Calorífica (C)	4,196 kJ/kg K
Fracción de Vapor a la Salida (X)	0.50	Ubicación	Coraza
Energía de Vaporización (ΔHvap)	1253,50 kJ/kg	Densidad	1.000 kg/m ³
Ubicación	Tubos		
Densidad*	2,247 kg/m ³		

*. Las propiedades fueron estimadas a la temperatura promedio entre la entrada y salida para cada corriente.

Posteriormente, se calculó la tasa de transferencia de calor total necesaria para llevar a cabo la condensación del gas de proceso (calor latente) y la tasa de calor necesaria para llevar la mezcla que fluye por la tubería desde la temperatura de entrada hasta la temperatura final escogida (calor sensible), tomando como volumen de control cada fluido con su respectivo balance de energía:

Ecuación 30. Calor Sensible Requerido.

$$Q_S = MC(T1 - T2)$$

Ecuación 31. Calor Latente Requerido.

$$Q_L = XM\Delta H_{Vap}$$

Ecuación 32. Balance de Energía Para el Fluido Caliente.

$$\text{Fluido Caliente: } Q = Q_T = Q_L + Q_S$$

Ecuación 33. Balance De Energía para el Fluido Frío.

$$\text{Fluido Frío: } Q = mc(t2 - t1)$$

¹⁶² CENGEL, Yunes A; BOLES, Michaels. Apéndice 1-Tablas de Propiedades, Figuras y Diagramas. En: Termodinámica. 7 ed. McGraw Hill. México, 2011. p. 907-914.

El calor se calculó con base al balance establecido para el fluido caliente, y con este se determinó el flujo másico de agua requerido en el proceso, ya que el calor que es necesario retirarle al fluido caliente para llevar a cabo su condensación y posteriormente enfriarlo hasta su temperatura de salida lo tiene que retirar el fluido de servicio (fluido frío), por lo tanto, el calor es el mismo para ambos fluidos, los cálculos realizados se muestran a continuación:

$$Q_T = MC(T1 - T2) + XM\Delta H_{vap}$$

$$Q_T = 114,163 \frac{kg}{h} * 2,477 \frac{kJ}{kg K} * (723,15 - 308,15) K + 0,50 * 114,163 \frac{kg}{h} * 1253,50 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_T = 117.354,31 \frac{kJ}{h}$$

Ecuación 34. Flujo Requerido del Fluido de Enfriamiento.

$$m = \frac{Q}{c(t2 - t1)} = \frac{188.605,13 \frac{kJ}{h}}{4,196 \frac{kJ}{kg K} * (363,15 - 283,15) K}$$

$$m = 561,680 \frac{kg}{h}$$

- Velocidad Axial y Coeficiente Global de Transferencia. Una vez calculados los parámetros de las corrientes del intercambiador, se parametrizó la velocidad axial¹⁶³ del vapor en la tubería que conecta el reactor con el intercambiador a partir de heurísticas de diseño para gases en tubería, con el fin de calcular el área de flujo requerida y el número de tubos que es factible acomodar dentro de la coraza (la referencia de tubos escogidos se puede observar en el Cuadro 35).
- El coeficiente global de transferencia¹⁶⁴ de diseño. Se estableció según rangos de valores de U para distintos tipos de intercambiadores de calor dados en referencias bibliográficas, esto con el objetivo de estimar el área de transferencia necesaria.

Cuadro 33. Velocidad del Gas y Coeficiente Global de Transferencia del Intercambiador.

Velocidad Axial del Gas (m/s)	25
Velocidad Axial del Gas (m/h)	90.000
Coeficiente global de Transferencia de Calor	143 kJ/h m ² K

¹⁶³ UNIVERSIDAD DE GRANADA. Aula Virtual, Diseño del Sistema de Tuberías y Cálculo de las Bombas. [En Línea]. [Citado 5 noviembre, 2017]. Disponible en: (<http://www.ugr.es/~aulavirtualpfcig/descargas/documentos/BOMBAS%20Y%20TUBERIAS.pdf>).

¹⁶⁴ WALAS, Stanley M. Heat Transfer and Heat Exchangers. En: Chemical Process Equipment. 1 ed. Butterworth-Heinemann.1988. p. 184-186.

- Especificaciones Tubería: A continuación, se muestra las especificaciones de los tubos seleccionados para el banco de tubos del intercambiador 1-2:

Cuadro 34. Especificaciones de los tubos del intercambiador.

TUBERIA DE ¼"		
Especificación	Símbolo	Valor
BWG	BWG	22
Diámetro interno de la tubería (m)	di	0,0049
Diámetro externo de la tubería (m)	Do	0,0064
Área de 1 tubo (m²/tubo)	at	$1,89 \cdot 10^{-5}$
Arreglo	Arreglo	Cuadrado
Paso entre tubos (m)	B	$1,5D_o = 9,6 \cdot 10^{-3}$

Figura 35. Dimensiones de tubos según BWG.

Características de tuberías

Do, in	BWG	Do, m	Di, in	Di, m	Do, in	BWG	Do, m	Di, in	Di, m
1/4	22	0.0064	0.194	0.0049	7/8	10	0.0222	0.607	0.0154
1/4	24	0.0064	0.206	0.0052	7/8	12	0.0222	0.657	0.0167
1/4	26	0.0064	0.214	0.0054	7/8	13	0.0222	0.685	0.0174
1/4	27	0.0064	0.218	0.0055	7/8	14	0.0222	0.709	0.0180
3/8	18	0.0095	0.277	0.0070	7/8	16	0.0222	0.745	0.0189
3/8	20	0.0095	0.305	0.0077	7/8	18	0.0222	0.777	0.0197
3/8	22	0.0095	0.319	0.0081	7/8	20	0.0222	0.805	0.0204
3/8	24	0.0095	0.331	0.0084	1	8	0.0254	0.670	0.0170
1/2	16	0.0127	0.370	0.0094	1	10	0.0254	0.732	0.0186
1/2	18	0.0127	0.402	0.0102	1	11	0.0254	0.760	0.0193
1/2	20	0.0127	0.430	0.0109	1	12	0.0254	0.782	0.0199
1/2	22	0.0127	0.444	0.0113	1	13	0.0254	0.810	0.0206
5/8	12	0.0159	0.407	0.0103	1	14	0.0254	0.834	0.0212
5/8	13	0.0159	0.435	0.0110	1	15	0.0254	0.856	0.0217
5/8	14	0.0159	0.459	0.0117	1	16	0.0254	0.870	0.0221
5/8	15	0.0159	0.481	0.0122	1	18	0.0254	0.902	0.0229
5/8	16	0.0159	0.495	0.0126	1	20	0.0254	0.930	0.0236
5/8	17	0.0159	0.509	0.0129	1 1/4	7	0.0318	0.890	0.0226
5/8	18	0.0159	0.527	0.0134	1 1/4	8	0.0318	0.920	0.0234
5/8	19	0.0159	0.541	0.0137	1 1/4	10	0.0318	0.982	0.0249
5/8	20	0.0159	0.555	0.0141	1 1/4	11	0.0318	1.010	0.0257
3/4	10	0.0191	0.482	0.0122	1 1/4	12	0.0318	1.032	0.0262
3/4	11	0.0191	0.510	0.0130	1 1/4	13	0.0318	1.060	0.0269
3/4	12	0.0191	0.532	0.0135	1 1/4	14	0.0318	1.084	0.0275
3/4	13	0.0191	0.560	0.0142	1 1/4	16	0.0318	1.120	0.0284
3/4	14	0.0191	0.584	0.0148	1 1/4	18	0.0318	1.152	0.0293
3/4	15	0.0191	0.606	0.0154	1 1/4	20	0.0318	1.180	0.0300
3/4	16	0.0191	0.620	0.0157	1 1/2	10	0.0381	1.232	0.0313
3/4	17	0.0191	0.634	0.0161	1 1/2	12	0.0381	1.282	0.0326
3/4	18	0.0191	0.652	0.0166	1 1/2	14	0.0381	1.334	0.0339
3/4	20	0.0191	0.680	0.0173	1 1/2	16	0.0381	1.370	0.0348

Fuente: Process Heat Transfer Principles and Applications. Modificado por autores.

- Área Transversal de Flujo (a): Con la velocidad establecida, el flujo másico y la densidad del fluido caliente se calculó el área de flujo necesaria mediante la ecuación de continuidad.

Ecuación 35: Ecuación de continuidad.

$$M = \rho av$$

$$a = \frac{M}{\rho v} = \frac{114,163 \frac{kg}{h}}{2,247 \frac{kg}{m^3} * 90.000 \frac{m}{h}} = 5,64 * 10^{-4} m^2$$

- Numero de Tubos por Paso (n): El número de tubos por paso que es posible acomodar dentro de la coraza del intercambiador se calculó mediante la siguiente expresión:

Ecuación 36: Área Transversal de Flujo.

$$a = a_t * n$$

$$n = \frac{a}{a_t} = \frac{5,64 * 10^{-4} m^2}{1,89 * 10^{-5} \frac{m^2}{tubo}} = 29,84 \approx 30 \text{ tubos/paso}$$

- Área de Transferencia de Calor. Según las temperaturas establecidas de los fluidos, se calcularon los factores R y P con el fin de encontrar que intercambiador de calor era apto para llevar a cabo la operación, esto basado en que el intercambiador tiene que tener un $F_T \geq 0,8$. Según las gráficas de diagramas del factor de corrección para intercambiadores de tubos y coraza, un intercambiador de calor de tubos y coraza con 2 pasos por la coraza y 4 pasos por los tubos (2-4), es apto para llevar a cabo la operación requerida ya que se tiene un $F_T = 0.95$.

$$A = \frac{Q}{U * DMLT F_T}$$

$$A = \frac{188.605,13 \frac{kJ}{h}}{143 \frac{kJ}{h m^2 K} * \frac{(T1 - t2) - (T2 - t1)}{\ln \frac{(T1 - t2)}{(T2 - t1)}} * 0,995} = 6,57 m^2$$

- Longitud Intercambiador (l). Se calculó la longitud (l) que tendrá el intercambiador a partir del área del mismo, y las dimensiones escogidas para el banco de tubos junto al número de pasos por los tubos (z):

Ecuación 37. Área del intercambiador de Calor.

$$A = \pi * do * n * z * l$$

$$l = \frac{A}{\pi * do * n * z}$$

$$l = \frac{6,57m^2}{\delta * 0,0064 m * 30 tubos * 4} = 2,72 m$$

- Diámetro de la coraza (Ds). Para la tubería seleccionada de ¼" BWG 22 para el banco de tubos, no se cuenta con una tabla de conteo de tubos para especificar el diámetro adecuado para la coraza del intercambiador (Ds); por lo tanto, se estimó Ds con base a la siguiente expresión¹⁶⁵:

Ecuación 38. Diámetro de la coraza del Intercambiador de Calor.

$$D_s = \sqrt{\frac{4 * A_T}{\delta}} \quad A_T = n * a_{tubo}$$

$$a_{tubo} = 2 * P^2$$

La cual depende del número de tubos total (n), el área de un tubo y el tamaño de paso (P) entre tubos:

$$n = 120 \text{ tubos} \quad a_{tubo} = 1,89 * 10^{-5} \frac{m^2}{tubo} \quad P = 1,5Do = 9,6 * 10^{-3}$$

$$A_T = n * a_{tubo} = 0,02212 m^2 \quad D_s = \sqrt{\frac{4 * A_T}{\pi}} = 0,17m$$

Al valor de Ds obtenido se le suman 3"(0,0508m) para obtener finalmente el diámetro de la coraza y a su vez del intercambiador, es decir 0,2592m o aproximadamente 10".

¹⁶⁵ BRANAN, Carl. Heat Exchangers. En: Rules of Thumb for Chemical Engineers. 3 ed. Gulf Professional Printing. Elsevier. Houston, 2002. p. 30-32.

ANEXO F.

DISEÑO UNIDAD DE SEPARACIÓN

Para comenzar con el diseño del separador se estableció según los porcentajes de rendimiento, la cantidad de Fuel Oil y de Gases No condensables efluentes del reactor y por lo tanto afluentes a la unidad de separación (Cuadro 35).

Cuadro 35. Producción del Separador.

Producto	Rendimiento Experimental (%)	Densidad (kg/m ³)	Producción por <i>batch</i> (kg)	Tasa de producción (kg/h) *
Gas No Condensable	24	1,127	2.400	63,16
Fuel Oil	23,80	822,3	2.380	62,63

**Se calculó dividiendo la producción por batch entre el tiempo que toma el procesamiento de un lote de producción, 38 horas.*

El diseño se llevó a cabo con respecto al volumen ocupado por el aceite durante una hora, con un sobredimensionamiento del volumen y parametrizando el diámetro de la torre de separación vertical con un valor de 1m.

- Volumen ocupado por el Aceite (Fuel Oil) en 1 hora. Con base a la densidad del Fuel Oil y el flujo másico establecido durante el proceso de reacción, se calculó que el volumen que ocupa esta corriente con un tiempo de retención de 1 horas corresponde a 0,0762m³.

Con un sobredimensionamiento del doble del volumen ocupado por el Fuel Oil se calculó el volumen final para la zona de recolección de líquidos:

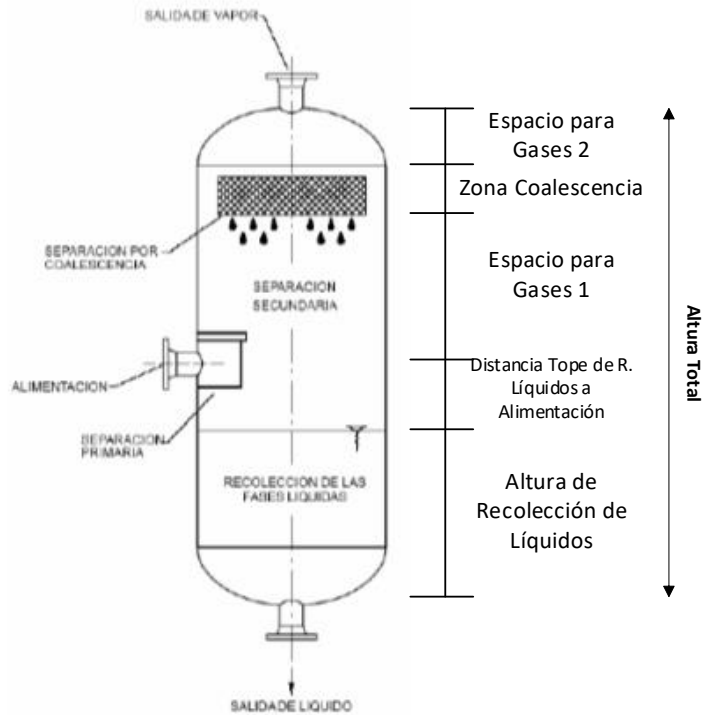
Ecuación 39. Volumen - Zona de recolección de Líquidos.

$$\begin{aligned}V_{Final} &= V_{Fuel\ Oil} * 2 \\V_{Final} &= 0,0762\ m^3 * 2 \\V_{Final} &= 0,152\ m^3\end{aligned}$$

Con el volumen final de 0,152m³ y el diámetro establecido de 1m se calculó la altura requerida en la zona de recolección de líquidos, asumiendo una geometría cilíndrica con tapas planas, la altura de la zona es de 0,194m.

- Cálculo de la Altura del Separador Vertical. Según heurísticas de diseño¹⁶⁶ se establecieron las alturas restantes y consecuentemente la altura de la torre de separación bifásica:

Figura 36. Distribución de Zonas en el Separador.



Fuente: Diseño y Evaluación de Separadores Bifásicos y Trifásicos. Modificado por autores.

Cuadro 36. Alturas Según Zonas Del Separador.

Zona	Altura (m)	Altura Acumulada (m)
Fondo al tope de recolección de líquidos.	0,194	0,194
Distancia de tope de recolección de líquidos a alimentación.	0,610	0,804
Espacio para gases 1	0,914	1,718
Zona de Coalescencia	0,152	1,87
Espacio para gases 2	0,152	2,023
Altura Total del Separador		2

¹⁶⁶OIL PRODUCTION. Sistema Producción Separadores. Diseñando sistemas de producción de petróleo y gas. [En Línea]. [Citado 5 noviembre, 2017]. Disponible en: (http://www.Oilproduction.net/files/Sistema_produccion_separadores.pdf).

ANEXO G.

DISEÑO TANQUE DE CONDENSADOS

Según el diseño del reactor la planta tendrá la capacidad de producir 2.380 kg de Fuel Oil por cada *batch*; por el tiempo que conlleva la pirólisis, la planta podrá procesar 3 *batch* de GCR a la semana, por lo tanto el diseño se realizó para una capacidad de 7.200 kg por semana, para obtener el volumen necesario se tomó un valor de densidad de 822,3 kg/m³ que corresponde a la densidad del Fuel Oil.

Ecuación 40. Densidad y volumen del aceite almacenado.

$$\rho = \frac{m}{V}$$
$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{7.140 \text{ kg}}{822,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 8,683 \text{ m}^3$$

Como se mencionó en la sección de diseño, el tanque de condensados se diseñó con un exceso de volumen del 25%, por lo tanto el volumen total del tanque estará dado por:

$$V_{Total} = 1,25 * V = 1,25 * 8,683 \text{ m}^3$$
$$V_{Total} = 10,854 \text{ m}^3$$

Se optó por un tanque en forma cilíndrica en el cual se parametrizó el diámetro interno con un valor de 1,8 m para obtener la altura que permitiera alcanzar el volumen deseado.

$$V_{Total} = \frac{\pi}{4} * h * di^2$$
$$h = \frac{4 * V_{Total}}{\pi * di^2} = \frac{4 * 10,854 \text{ m}^3}{\pi * (1,8 \text{ m})^2} = 4,27 \text{ m}$$

ANEXO H.

BALANCE DE MASA Y ENERGÍA

- Propiedades de los combustibles analizados: En el siguiente cuadro se presenta la densidad, poder calorífico y factores de emisión para los combustibles analizados en el quemador^{167,168,169}:

Cuadro 37. Propiedades de los combustibles empleados en el quemador.

Combustible	Densidad (kg/m ³)	Poder Calorífico	Factor Emisión (kg CO ₂ / kg combustible)
Carbón Mineral	1.400	32,6 MJ/kg	3,0528
Gas Natural	0,61	38,67 MJ/m ³	3,60
		64 MJ/kg	
Gas Reciclo	1,127	37,67 MJ/m ³	1,94*
		33,42 MJ/kg	

*. Se asumió el mismo factor de emisión del Gas Natural por m³, debido a falta de información para la composición del Gas de Reciclo.

A continuación, se muestra el cálculo de los gases de combustión generados por la Corrientes 8 y 9 teniendo en cuenta que en la etapa de arranque del reactor no se usa Gas de Reciclo:

Cuadro 38. Gases de Combustión de la corriente 8.

Corriente	Etapa Arranque			Etapa Reacción		
	Combustible	Cantidad (kg /batch)	Emisiones (kg CO ₂)	Combustible	Cantidad (kg /batch)	Emisiones (kg CO ₂)
8	Carbón	333,77	1.018,93	Carbón	0	0
	Gas Natural	171,64	616,50	Gas Natural	0	0
	Gas Reciclo	0	0	Gas Reciclo	542,93	1.055,51
	TOTAL EMISIONES (kg CO ₂)			Carbón	2.074,44	
			Gas Natural	1.672,01		

La cantidad o fracción (24%) de Gas de Reciclo empleada en el calentamiento, se obtiene de dividir la demanda energética total del reactor entre el poder calorífico del Gas de Reciclo.

¹⁶⁷ MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, Colombia. Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). Cadena del Carbón. [En Línea]. [Citado 8 noviembre, 2017]. Disponible en: (http://www.upme.gov.co/Docs/Cadena_Carbon_2012.pdf)

¹⁶⁸ GAS NATURAL FENOSA. Historia del Gas Natural, Características del Gas Natural. [En Línea]. [Citado 8 noviembre, 2017]. Disponible en: (<http://www.gasnaturaldistribucion.com/es/conocenos/quienes+somos/historia+del+gas/1297104955871/caracteristicas+del+gas+natural.html>)

¹⁶⁹ SÁNCHEZ. Op. Cit., p. 48-49.

ANEXO I.

INDICADORES DE VIABILIDAD FINANCIERA

- Tasa Interna de Oportunidad (TIO): Su determinación se hizo con base a un promedio simple entre los siguientes indicadores ajustados: CDT, DTF y una tasa del inversor, adicionando cierto porcentaje debido a la tasa de inflación. Para el caso del CDT se realizó un promedio semanal y para el DTF un promedio mensual, al cual se le aumento el promedio mensual de la tasa de inflación reportada por el BRC más 3 puntos porcentuales^{170,171}; cabe aclarar, que los ponderados semanales y mensuales se realizaron de octubre del 2016 a noviembre del 2016.

Cuadro 39. Indicadores Ajustados para el Cálculo de la TIO.

Indicador	Promedio	Indicador Ajustado
CDT (360 días)	6,45 % EA	14,21 % EA
DTF	6,33 % EA	14,09 % EA
Inflación	4,76 % EA	7,76 % EA

Con respecto a la tasa del inversor, esta se estimó con base a la suma de la tasa promedio de CDT más 6 puntos porcentuales, más la tasa de inflación ajustada. Por lo tanto, la tasa del inversor corresponde a 20,21 % EA. El valor calculado para la TIO corresponde al 16,17% Efectivo Anual (EA) equivalente al 1,26% Efectivo Mensual (EM).

- Valor Presente Neto (VPN). En seguida se muestra el Flujo Neto de Caja para el proyecto, junto a al valor presente de cada flujo, el VPN consiste en la sumatoria de dichos valores presente:

¹⁷⁰ BANCO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA (BRC). Tasas de Captación Mensuales y Semanales. [En línea]. [Citado 12 noviembre,2017] disponible en: (http://www.banrep.gov.co/series-estadisticas/see_tas_inter_capt_sem_men.htm).

¹⁷¹ BANCO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA (BRC). Meta de Inflación. [En línea]. [Citado 12 noviembre,2017] disponible en: (<http://www.banrep.gov.co/es/meta-inflacion>).

Tabla 60. Valores presentes del flujo neto de caja.

Periodo	Año	Flujo Neto Caja (\$ COP)	Valor Presente (\$ COP)
0		-1.871.317.600	-1.871.317.600
1	2018	1.330.556.582	1.145.358.802
2	2019	1.523.833.920	1.129.156.286
3	2020	1.489.674.480	950.202.148
4	2021	1.776.481.887	975.424.419
5	2022	2.121.695.020	1.002.822.355
Valor Presente Neto (\$ COP)			3.331.646.411
Valor Presente Neto (USD)			1.108.745

- Tasa Verdadera de Rentabilidad (TVR): En primer lugar, se llevan los egresos de cada periodo a valor presente empleando la TIO y se suman, además se llevan los ingresos de cada periodo a valor futuro y se suman, finalmente se halla la TVR acorde a la ecuación del valor del dinero en el tiempo.

Tabla 61. Datos empleados en el cálculo de la TVR.

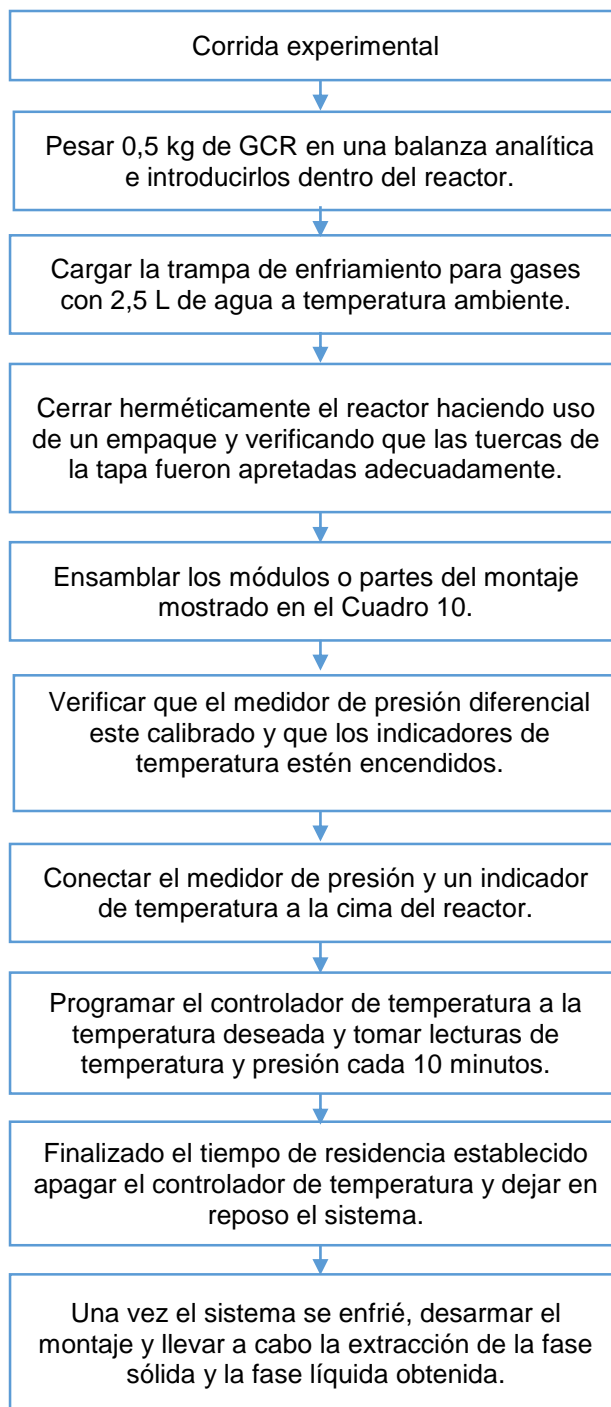
Año	Egresos (\$COP)	Ingresos (\$ COP)	Valor Presente Egresos (\$COP)	Valor Futuro Ingresos (\$COP)
Inicio	1.871.317.600	0	1.871.317.600	0
2018	1.236.216.981	2.566.773.563	1.064.150.161	4.674.710.467
2019	2.238.808.691	3.762.642.611	1.658.950.410	5.898.863.402
2020	2.537.557.490	4.027.231.971	1.618.603.668	5.434.883.334
2021	2.689.802.001	4.466.283.887	1.476.907.011	5.188.455.717
2022	2.904.745.358	5.026.440.378	1.372.932.281	5.026.440.378
		TOTAL	9.062.861.131	26.223.353.298
		TVR (Efectivo Anual)		23,68%
		TVR (Nominal Mensual)		1,79%
		Relación Beneficio Costo		1,368
		Índice Rentabilidad		1,780


- Relación Beneficio Costo (R B/C): Es el cociente entre el valor presente total de los ingresos y el valor presente total de los egresos, con base a la Tabla 60 la relación beneficio costo del proyecto es de 1,37.
- Índice de Rentabilidad (IR): Es el cociente entre el VPN y el valor neto de la inversión en el periodo cero o al inicio del proyecto, su valor fue de 1,78.

ANEXO J.

PROTOCOLO CORRIDAS EXPERIMENTALES

Figura 37. Protocolo Seguido en las Corridas Experimentales.




 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016

**AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL
LUMIERES**


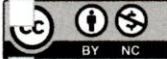

Nosotros **Daniel Chivatá Trompetero y Cristian Camilo Duarte Fuentes** en calidad de titulares de la obra **Diseño conceptual de una planta para el aprovechamiento de caucho molido de neumáticos usados a partir de pirólisis**, elaborada en el año **2017**, autorizamos al **Sistema de Bibliotecas de la Fundación Universidad América** para que incluya una copia, indexe y divulgue en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres, la obra mencionada con el fin de facilitar los procesos de visibilidad e impacto de la misma, conforme a los derechos patrimoniales que nos corresponden y que incluyen: la reproducción, comunicación pública, distribución al público, transformación, en conformidad con la normatividad vigente sobre derechos de autor y derechos conexos (Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, entre otras).

Al respecto como Autores manifestamos conocer que:

- La autorización es de carácter no exclusiva y limitada, esto implica que la licencia tiene una vigencia, que no es perpetua y que el autor puede publicar o difundir su obra en cualquier otro medio, así como llevar a cabo cualquier tipo de acción sobre el documento.
- La autorización tendrá una vigencia de cinco años a partir del momento de la inclusión de la obra en el repositorio, prorrogable indefinidamente por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales del autor y podrá darse por terminada una vez el autor lo manifieste por escrito a la institución, con la salvedad de que la obra es difundida globalmente y cosechada por diferentes buscadores y/o repositorios en Internet, lo que no garantiza que la obra pueda ser retirada de manera inmediata de otros sistemas de información en los que se haya indexado, diferentes al Repositorio Digital Institucional – Lumieres de la Fundación Universidad América.
- La autorización de publicación comprende el formato original de la obra y todos los demás que se requiera, para su publicación en el repositorio. Igualmente, la autorización permite a la institución el cambio de soporte de la obra con fines de preservación (impreso, electrónico, digital, Internet, intranet, o cualquier otro formato conocido o por conocer).
- La autorización es gratuita y se renuncia a recibir cualquier remuneración por los usos de la obra, de acuerdo con la licencia establecida en esta autorización.
- Al firmar esta autorización, se manifiesta que la obra es original y no existe en ella ninguna violación a los derechos de autor de terceros. En caso de que el trabajo haya sido financiado por terceros, el o los autores asumen la responsabilidad del cumplimiento de los acuerdos establecidos sobre los derechos patrimoniales de la obra.
- Frente a cualquier reclamación por terceros, el o los autores serán los responsables. En ningún caso la responsabilidad será asumida por la Fundación Universidad de América.
- Con la autorización, la Universidad puede difundir la obra en índices, buscadores y otros sistemas de información que favorezcan su visibilidad.

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016

Conforme a las condiciones anteriormente expuestas, como autores establecemos las siguientes condiciones de uso de nuestra obra de acuerdo con la *licencia Creative Commons* que se señala a continuación:

	Atribución- no comercial- sin derivar: permite distribuir, sin fines comerciales, sin obras derivadas, con reconocimiento del autor.	<input type="checkbox"/>
	Atribución – no comercial: permite distribuir, crear obras derivadas, sin fines comerciales con reconocimiento del autor.	<input checked="" type="checkbox"/>
	Atribución – no comercial – compartir igual: permite distribuir, modificar, crear obras derivadas, sin fines económicos, siempre y cuando las obras derivadas estén licenciadas de la misma forma.	<input type="checkbox"/>

Licencias completas: http://co.creativecommons.org/?page_id=13

Siempre y cuando se haga alusión de alguna parte o nota del trabajo, se debe tener en cuenta la correspondiente citación bibliográfica para darle crédito al trabajo y a sus autores.

De igual forma como autores autorizamos la consulta de los medios físicos del presente trabajo de grado así:

AUTORIZAMOS	SI	NO
La consulta física (sólo en las instalaciones de la Biblioteca) del CD-ROM y/o Impreso	X	
La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer para efectos de preservación	X	
Información Confidencial: este Trabajo de Grado contiene información privilegiada, estratégica o secreta o se ha pedido su confidencialidad por parte del tercero, sobre quien se desarrolló la investigación. En caso afirmativo expresamente indicaremos, en carta adjunta, tal situación con el fin de que se respete la restricción de acceso.	SI	NO X

Para constancia se firma el presente documento en Bogotá D.C, a los 12 días del mes de febrero del año 2018.

LOS AUTORES:

Autor 1	
Nombres	Apellidos
Daniel	Chivatá Trompetero
Documento de identificación No	Firma
1016081341	
Autor 2	
Nombres	Apellidos
Cristian Camilo	Duarte Fuentes
Documento de identificación No	Firma
1057602249	