

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR PILOTO DE PIRÓLISIS DE
NEUMÁTICOS USADOS**

**JAIRO ANDRÉS RODRÍGUEZ LÓPEZ
MANUEL MAURICIO TUNJACIPA MARTÍNEZ**

**Proyecto integral de grado para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO**

**Director:
Claudio Alberto Moreno
Ingeniero Mecánico**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ, D.C.**

2023

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma Docente Investigador

Firma Docente Jurado 1

Firma Docente Jurado 2

Bogotá, D.C., febrero 2023

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigación

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decana de la Facultad de Ingenierías

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Directora del Departamento de Ingeniería Mecánica

Ing. María Angelica Acosta Pérez

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y los docentes no son responsables por las ideas y conceptos emitidos en el presente documento. Estos corresponden únicamente al autor.

DEDICATORIA

A mi familia, por su constante apoyo y colaboración durante esta etapa de mi vida, quienes contribuyeron y fueron pilar, guía y ejemplo de dedicación y esfuerzo por cumplir las metas; a la Universidad por la formación que me brindó como profesional; a mis compañeros de quienes aprendí y compartí durante este periodo de vida; a mi compañero de tesis, con quien desarrollamos varias etapas de nuestra carrera y aprendimos que el trabajo en equipo siempre es posible y se logran grandes cosas. A todos mil gracias por su compañía.

Jairo Andrés Rodríguez López

A Dios, porque a lo largo de mi vida ha guiado cada uno de mis pasos, me colmó de bendiciones y una hermosa familia que siempre me ha apoyado en cada uno de los aspectos de mi vida, a mi tía Blanca Estela Martínez Herrera, quien ha sido un ejemplo de vida en cada uno de sus aspectos, me enseñó con su ejemplo el arte disciplina, y con paciencia y perseverancia ha estado para guiarme en cada una de las etapas de mi vida tanto personal como profesionalmente, a mi mamá Carolina Martínez y mi abuela Alcira Herrera, quienes me han hecho un hombre íntegro y me han acompañado y apoyado a lo largo de mi vida, a mi compañero de tesis con quien compartí varias etapas de mi carrera profesional y logramos construir y sacar adelante muchos proyectos; y, especialmente, la culminación de esta etapa y mi carrera profesional, se la dedico a Ana Inés Martínez.

Manuel Mauricio Tunjacipa Martínez

AGRADECIMIENTOS

A la Fundación Universidad de América, que nos permitió y apoyo en sus instalaciones, la fabricación y desarrollo de nuestro proyecto.

Al Ingeniera María Angelica Acosta, directora del departamento de Ingeniería Mecánica, quien nos facilitó el apoyo de la Universidad.

Al Ingeniero Claudio Alberto Moreno, director del proyecto, quien nos brindó su constante colaboración y apoyo para el desarrollo las actividades teóricas y construcción de este proyecto.

A todos, mil gracias.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	17
OBJETIVOS	18
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
1. MARCO TEÓRICO	25
1.1. Neumáticos	25
1.1.1. <i>Características físicas</i>	26
1.1.2. <i>Características químicas</i>	26
1.1.3. <i>Proceso de fabricación de neumáticos</i>	29
1.1.4. <i>Marco legal en la ciudad de Bogotá</i>	35
1.1.5. <i>Economía Circular aplicada a los neumáticos</i>	41
1.2. Pirólisis	43
1.2.1. <i>Fundamentos del proceso de pirólisis</i>	43
1.2.2. <i>Tipos de pirólisis</i>	46
1.2.3. <i>Tipos de reactores de pirólisis</i>	48
1.2.4. <i>Pirólisis de neumáticos fuera de uso</i>	54
1.2.5. <i>VARIABLES de proceso</i>	57
1.2.6. <i>Productos obtenidos a través del proceso de pirólisis</i>	60
1.2.7. <i>Aplicaciones de los productos de pirólisis</i>	63
2. PARAMETROS Y DISEÑO CONCEPTUAL DEL REACTOR PILOTO	65
2.1. Diagrama de flujo	65
2.2. Parámetros de proceso	66
2.2.1. <i>Atmósfera de funcionamiento</i>	67
2.2.2. <i>Muestras de neumáticos</i>	67
2.2.3. <i>Humedad del sistema</i>	67
2.2.4. <i>Temperatura de funcionamiento</i>	67
2.2.5. <i>Tiempo de residencia</i>	68
2.2.6. <i>Presión de funcionamiento</i>	68
2.3. Diseño Conceptual	68

2.3.1.	<i>Sistema Reactor Pirolítico</i>	69
2.3.2.	<i>Sistema de Transferencia de Calor</i>	76
2.3.3.	<i>Sistema de Conservación de Calor – Hogar</i>	78
2.3.4.	<i>Sistema de Estructura – Bastidor</i>	80
2.3.5.	<i>Ensamble</i>	83
2.3.6.	<i>Espacio disponible</i>	84
3.	DISEÑO DETALLADO	85
3.1.	Análisis de diseño Sistema Estructura – Bastidor	85
3.1.1.	<i>Análisis de viga</i>	85
3.1.2.	<i>Simulación análisis de la estructura</i>	97
3.2.	Análisis de soldadura	100
3.2.1.	<i>Análisis de soldadura Reactor</i>	101
3.2.2.	<i>Análisis de soldadura Estructura-Bastidor</i>	105
4.	CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE PIRÓLISIS	107
4.1.	Construcción del Sistema Reactor Pirolítico	107
4.1.1.	<i>Compuerta de alimentación</i>	107
4.1.2.	<i>Sistema de escape de gases pirolíticos</i>	109
4.1.3.	<i>Instalación de sensores</i>	111
4.2.	Construcción del Sistema de Conservación de Calor – Hogar	114
4.3.	Construcción del Sistema Estructura - Bastidor	115
4.3.1.	<i>Estiba de madera</i>	116
4.3.2.	<i>Marco Estructura – Soporte</i>	117
4.3.3.	<i>Ruedas de soporte</i>	118
4.4.	Ensamble del Equipo de Pirólisis	119
5.	FUNCIONAMIENTO Y RESULTADOS EXPERIMENTALES	121
5.1.	Diagrama de Procesos	121
5.2.	Pruebas piloto y resultados	121
5.2.1.	<i>Prueba Piloto No. 1</i>	122
5.2.2.	<i>Prueba Piloto No. 2</i>	124
5.3.	Análisis de resultados	126
6.	ANALISIS FINANCIERO	130

6.1.	Costos de fabricación	130
6.1.1.	<i>Costo de materiales</i>	131
6.1.2.	<i>Costo de mano de obra</i>	132
6.1.3.	<i>Costos de funcionamiento</i>	133
7.	CONCLUSIONES	134
	BIBLIOGRAFÍA	135
	ANEXOS	145

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Composición del parque automotor de Bogotá año 2015	21
Figura 2. Toneladas de residuos posconsumo gestionadas entre el año 2018-2019	23
Figura 3. Estructura de un neumático	26
Figura 4. Formación de red tridimensional en el proceso de vulcanización	28
Figura 5. Etapas del proceso de fabricación de neumáticos	30
Figura 6. Mezcladoras de caucho	31
Figura 7. Proceso de calandrado del caucho	32
Figura 8. Tambor de construcción de neumáticos	33
Figura 9. Prensa de vulcanizado	33
Figura 10. Aprovechamiento de neumáticos usados en Bogotá para el año 2006	37
Figura 11. Modelo general de Economía lineal	41
Figura 12. Modelo general de Economía circular	42
Figura 13. Modelo básico de un reactor de pirólisis	44
Figura 14. Diagrama de procesos de pirólisis	45
Figura 15. Esquema de un reactor tipo Batch	49
Figura 16. Esquema de un reactor de lecho fijo	50
Figura 17. Esquema de proceso reactor de lecho burbujeante	51
Figura 18. Esquema de proceso de cono rotatorio	52
Figura 19. Esquema de procesos de pirólisis con reactor de tornillo sin fin	53
Figura 20. Esquema de un reactor de caída libre	54
Figura 21. Balance másico del proceso de pirólisis de neumáticos usados	55
Figura 22. Termogravimetrías de neumáticos fuera de uso a diferentes tasas de calentamiento	59
Figura 23. Subproductos generados de pirólisis de NFU y sus potenciales usos industriales	61
Figura 24. Diagrama de flujo de equipo piloto propuesto para pirólisis de NFU	66
Figura 25. Cilindro seleccionado para fabricación de reactor pirolítico	70
Figura 26. Compuerta de alimentación roscada propuesta	71
Figura 27. Zona de escape de gases pirolíticos propuesto	73
Figura 28. Adaptación del sistema de escape de gases pirolíticos propuesto	74

Figura 29. Adaptación sensor de temperatura propuesto	75
Figura 30. Adaptación manómetro de presión propuesto	75
Figura 31. Sistema reactor pirolítico propuesto	76
Figura 32. Dimensiones y disposición de bomba de combustible referencia A2VA-7116	78
Figura 33. Construcción del sistema de conservación de calor propuesto	80
Figura 34. Denominación de medidas de perfil en L	81
Figura 35. Construcción marco de estructura propuesto	83
Figura 36. Ensamble del conjunto de sistemas del equipo propuesto	84
Figura 37. Diagrama de cuerpo libre	88
Figura 38. Diagrama de Esfuerzo Cortante (V) y Momento Flector (Mf) vs. Distancia (x)	90
Figura 39. Tipos de rodantes giratorios comerciales	97
Figura 40. Enmallado de perfil en L de acero ASTM A36 en Ansys workbench	98
Figura 41. Simulación de momento flector en Ansys Workbench	98
Figura 42. Momento Flector (N·m) vs Distancia (m)	99
Figura 43. Simulación de deformación total en Ansys Workbench	99
Figura 44. Simulación de deformación direccional en Ansys Workbench	100
Figura 45. Notación de electrodos para soldadura con arco	101
Figura 46. Soldadura según orillas para soldadura de chaflán	102
Figura 47. Factor geométrico para análisis de soldadura de geometría circular sometida a carga por flexión.	102
Figura 48. Tipos de uniones de soldadura.	106
Figura 49. Compuerta de alimentación sin soldadura	108
Figura 50. Sistema de compuerta de alimentación soldada con tapa final	108
Figura 51. Acople de salida de gas de diámetro nominal ¼” soldado al cuerpo del reactor	109
Figura 52. Ducto de salida de gases pirolíticos instalado	110
Figura 53. Termómetro bimetalico de acero inoxidable y vidrio templado	111
Figura 54. Termómetro bimetalico instalado	112
Figura 55. Manómetro de presión de glicerina instalado	113
Figura 56. Sistema de reactor pirolítico construido	114
Figura 57. Estructura de conservación del calor – hogar construida	115
Figura 58. Estiba de madera para el soporte de componentes del reactor	116

Figura 59. Corte y disposición de perfiles en L para el marco de la estructura	118
Figura 60. Ruedas de soporte con giro	119
Figura 61. Instalación de ruedas al marco de la estructura de soporte	119
Figura 62. Equipo reactor de pirólisis de NFU ensamblado	120
Figura 63. Diagrama de proceso de funcionamiento del equipo de pirólisis	121
Figura 64. Gráficos de resultados se subproductos de pruebas piloto 1 y 2	127
Figura 65. Volumen de aceite de pirólisis producido contra tiempo para la prueba No. 2	128
Figura 66. Incremento de temperatura y presión contra tiempo de procesamiento para la prueba No. 2	129

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Histórico del parque automotor 2015	20
Tabla 2. Composición de un neumático convencional	27
Tabla 3. Acciones sobre residuos de neumáticos en Bogotá	36
Tabla 4. Resumen de priorización de alternativas para la reutilización de neumáticos usados en Bogotá	38
Tabla 5. Comparación de parámetros de operación de los tipos de pirólisis	47
Tabla 6. Productos generados por tipos de reactores de pirólisis	56
Tabla 7. Aplicación de los productos de pirólisis	64
Tabla 8. Dimensiones de tubos de acero galvanizado por diámetro nominal y schedule	72
Tabla 9. Especificaciones técnicas bomba combustible Referencia A2VA-7116	78
Tabla 10. Dimensiones comerciales de perfil en L	81
Tabla 11. Dimensiones y Pesos de componentes que integra el Equipo de Pirólisis	82
Tabla 12. Propiedades físicas y mecánicas del perfil de acero en L	86
Tabla 13. Fuerza ejercida por cada componente sobre la estructura según su peso	87
Tabla 14. Dimensiones y propiedades para perfiles de ángulos en L de alas iguales	95
Tabla 15. Tabla de aceros estructurales y de uso industrial laminados en caliente	96
Tabla 16. Tabla de factores de seguridad. Valores mínimos recomendados	96
Tabla 17. Esfuerzos cortantes y fuerzas sobre soldaduras	105
Tabla 18. Dimensiones de accesorios comerciales en acero galvanizado utilizado para el sistema de gases pirolíticos	110
Tabla 19. Dimensiones de accesorios comerciales en acero galvanizado utilizados para instalación del manómetro de presión	113
Tabla 20. Parámetros y datos iniciales de la prueba piloto No. 1	122
Tabla 21. Parámetros y resultados prueba piloto No. 1	123
Tabla 22. Parámetros y resultados finales de prueba piloto No. 1	124
Tabla 23. Parámetros y datos iniciales de la prueba piloto No. 2	124
Tabla 24. Parámetros y resultado de la prueba piloto No. 2	124
Tabla 25. Parámetros y resultados finales de la prueba piloto No. 2	126

Tabla 26. Costos totales por fabricación de reactor piloto de pirólisis	130
Tabla 27. Costos por concepto de diseño y fabricación de reactor piloto de pirólisis	131
Tabla 28. Costos por concepto de mano de obra de personal involucrado en el proyecto	133
Tabla 29. Costos por concepto de experimentación y pruebas piloto realizadas	133

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo 1. Plano detallado - Sistema Reactor de Pirólisis	146
Anexo 2. Plano detallado - Ensamble Sistema de Escape de Gases	148
Anexo 3. Plano detallado - Sistema de Conservación de Calor-Hogar	150
Anexo 4. Plano detallado - Soporte Estructura Bastidor	152
Anexo 5. Plano detallado - Ensamble del Equipo Piloto de Pirólisis	154
Anexo 6. Recomendaciones	156

RESUMEN

El contenido de este proyecto inicia con la investigación de la problemática generada por la disposición los neumáticos fuera de uso y los antecedentes a nivel legislativo en la ciudad de Bogotá. Se investiga la composición de los neumáticos y su proceso de fabricación. Se plantea una alternativa al modelo de economía lineal mediante la aplicación de un proceso que contribuya a transformar este residuo en productos de valor agregado, dentro del marco de aplicación del modelo de economía circular. Se definen los fundamentos del proceso de pirolisis. Se estudian las variables que más influyen en el proceso, además de las aplicaciones de subproductos a nivel industrial y comercial.

La segunda etapa, contempla parametrizar y realizar un acercamiento al proceso de pirolisis en función de plantear un diseño conceptual teniendo en cuenta las variables que influyen, considerando el uso de materiales reciclados o en desuso. A partir de los materiales pre seleccionados en el diseño conceptual, se plantea una etapa de evaluación para su uso, mediante el análisis de las propiedades, capacidades, resistencias y viabilidad en las modificaciones a plantear en el diseño y posterior construcción.

La última etapa, corresponde a la construcción del reactor piloto de pirólisis soportada en el diseño, donde se materializan los detalles, haciendo uso de los materiales, accesorios y adecuaciones propuestas, con el fin de ejecutar el proceso de pirolisis y la obtención de los subproductos durante las pruebas piloto, para determinar sus resultados y analizar el rendimiento del proceso.

De los resultados obtenidos, se concluye que, para el proceso de pirolisis convencional, con método de aporte de calor alotérmico de neumáticos en desuso se obtienen los siguientes porcentajes en masa de rendimiento por fracción: gas 29,41%, aceite 30,13% y sólido (negro de humo) 40,46%.

Palabras clave: Pirólisis de llantas, Disposición de llantas, Economía circular de llantas, Reaprovechamiento de neumáticos usados, Combustible TDF.

INTRODUCCIÓN

La alta generación de residuos en las ciudades es una problemática que se incrementa con el ciclo de consumo, donde los neumáticos fuera de uso, se convierten en un problema debido a las dificultades en su disposición. Existen alternativas tecnológicas que ayudan a mitigar el volumen de generación de estos residuos, muchas se encuentran en fase experimental y otras se encuentran implementadas. En la ciudad de Bogotá, se están implementando programas de posconsumo de neumáticos para mitigar el impacto que generan en la salud pública y a nivel ambiental, a pesar de no contar con la capacidad de procesamiento total que para el año 2019 según el Plan Nacional de Desarrollo 2020-2024 era de 3100 toneladas de neumáticos desechados al año.

Continuando en la búsqueda de alternativas y su desarrollo, se propone estudiar la técnica de pirólisis que es utilizada en el procesamiento de biomasa, plásticos, entre otros, para el tratamiento y revalorización de los neumáticos fuera de uso, contribuyendo a la investigación de la técnica mediante el diseño y realización de un equipo piloto, contemplando la utilización de materiales reciclables y reutilizables, con los que se pueda llevar a cabo el proceso, promoviendo la aplicación del modelo de economía circular, contribuyendo con los objetivos de desarrollo sostenible contenidos en la Agenda 2030 de la Asamblea General de la ONU.

La técnica de pirólisis aplicada para el reaprovechamiento de residuos de difícil disposición como los NFU, puede llegar a ofrecer utilidades significativas mediante la valorización de los productos generados debido a su alta demanda, considerando las aplicaciones que tienen como materia prima y su capacidad de transformación en nuevos productos.

Este proyecto consta del diseño y construcción de un equipo piloto para procesar los neumáticos fuera de uso mediante la técnica de pirólisis, como prototipo inicial para realizar pruebas de funcionamiento y determinar los resultados del proceso, demostrando el potencial de la técnica, promoviendo así su desarrollo para futuras fases de investigación, aplicación, e implementación a mayor escala, ofreciendo así una alternativa que contribuya con el reaprovechamiento de desechos.

OBJETIVOS

Objetivo General

Diseñar y construir un reactor pirolítico para procesamiento de residuos de caucho y plástico a nivel piloto.

Objetivos Específicos

- Realizar una revisión del estado del arte de reactores piloto de Pirólisis para el procesamiento de neumáticos usados.
- Definir los parámetros de diseño del reactor de Pirólisis.
- Diseñar un reactor de Pirólisis de residuos de neumáticos fuera de uso acorde con la capacidad estimada.
- Construir el reactor diseñado mediante los parámetros estipulados.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La creciente problemática de los neumáticos usados en Bogotá, y la falta de una amplia oferta de alternativas para su posterior reaprovechamiento, ha generado una problemática de acumulación y contaminación por parte de estos, que según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) a septiembre de 2016 en Bogotá, se estimaba una generación anual de 5.300.000 llantas usadas [1].

La ciudad de Bogotá carece de métodos de transporte distintos a los tradicionales buses, automóviles y tractocamiones para transporte de pasajeros y transporte de carga. Además, el incremento de la demanda de ambos sectores, tiene repercusiones importantes en el aumento del parque automotor de los bogotanos, que según movilidad Bogotá, en el año 2015 se presentó un incremento de 5,2% en el número de vehículos registrados en Bogotá. Dicho incremento, es el equivalente a 105.651 unidades [2]. En la Tabla 1 se presentan las cifras del aumento del parque automotor desde el año 2002 hasta el año 2015, y en la Figura 1 se presenta la composición del parque automotor discriminado por “*Tipo de Servicio*”.

Las anteriores cifras, se traducen en la generación de residuos provenientes del sector, particularmente en el volumen de neumáticos usados, ahondado por la carencia de sistemas de disposición de estos en la ciudad. Estos productos están compuestos por un gran número de sustancias con connotaciones peligrosas, las cuales generan impactos negativos sobre la salud y el ambiente si no se realiza un manejo apropiado. Realizar una gestión, recolección, aprovechamiento y eliminación adecuada de estos elementos se ha convertido en una problemática.

Tabla 1.*Histórico del parque automotor 2015*

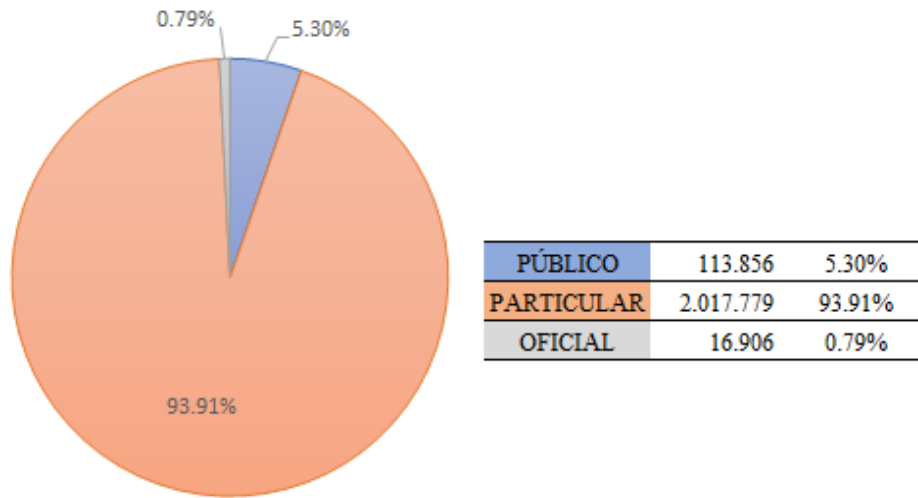
TIPO DE SERVICIO					
AÑO	OFICIAL	PÚBLICO	PARTICULAR	DIPLOMÁTICO	TOTAL
2002	3.555	84.805	590.939	0	679.299
2003	6.440	89.210	590.379	0	686.029
2004	10.121	91.079	666.528	0	767.728
2005	10.515	96.040	732.092	0	838.647
2006	10.939	96.805	835.806	0	943.550
2007	11.779	98.784	952.135	0	1.062.698
2008	12.076	99.219	1.057.390	0	1.168.685
2009	10.412	100.814	1.143.631	185	1.254.857
2010	13.103	102.408	1.277.419	32	1.392.930
2011	13.351	104.298	1.455.062	30	1.572.711
2012	13.498	105.63	1.618.834	1	1.737.962
2013	14.714	109.279	1.770.681	0	1.894.674
2014	16.385	113.843	1.912.662	0	2.042.890
2015	16.906	113.856	2.017.779	0	2.148.541

Nota. La tabla muestra el histórico en cifras del parque automotor discriminado entre tipos de servicio de vehículo (Oficial, público, particular, y diplomático) y su crecimiento anual desde el año 2002 hasta el año 2015. Tomado de: Secretaría Distrital De Movilidad, Movilidad en Cifras 2015. Artículo, Bogotá, D.C., Colombia, 2015, [En línea]. Disponible:

https://www.movilidadbogota.gov.co/web/SIMUR/ARCHIVOS/Movilidad_Cifras_2015_V4_marzo2017.pdf. [Acceso: marzo 23, 2022].

Figura 1.

Composición del parque automotor de Bogotá año 2015



Nota. El gráfico representa la composición del parque automotor registrado en Bogotá para el año 2015 de acuerdo al tipo de servicio entre público, oficial y particular, en el cual el particular es la mayor proporción. Tomado de: Secretaría Distrital De Movilidad, Movilidad en Cifras 2015. Artículo, Bogotá, D.C., Colombia, 2015, [En línea].

Disponible

en:

https://www.movilidadbogota.gov.co/web/SIMUR/ARCHIVOS/Movilidad_Cifras_2015_V4_marzo2017.pdf [Acceso: marzo 23, 2022].

Estas cifras, nos permiten estimar un número de llantas nuevas pertenecientes únicamente a la cifra de vehículos nuevos registrados en Bogotá en el año 2015. Tomando el incremento del parque automotor en Bogotá para el año 2015 (105.651 Vehículos nuevos registrados) y asumiéndolos todos como vehículos particulares de 4 ruedas para lograr un estimado promedio, tendremos un aumento de llantas en circulación de aproximadamente 422.604.

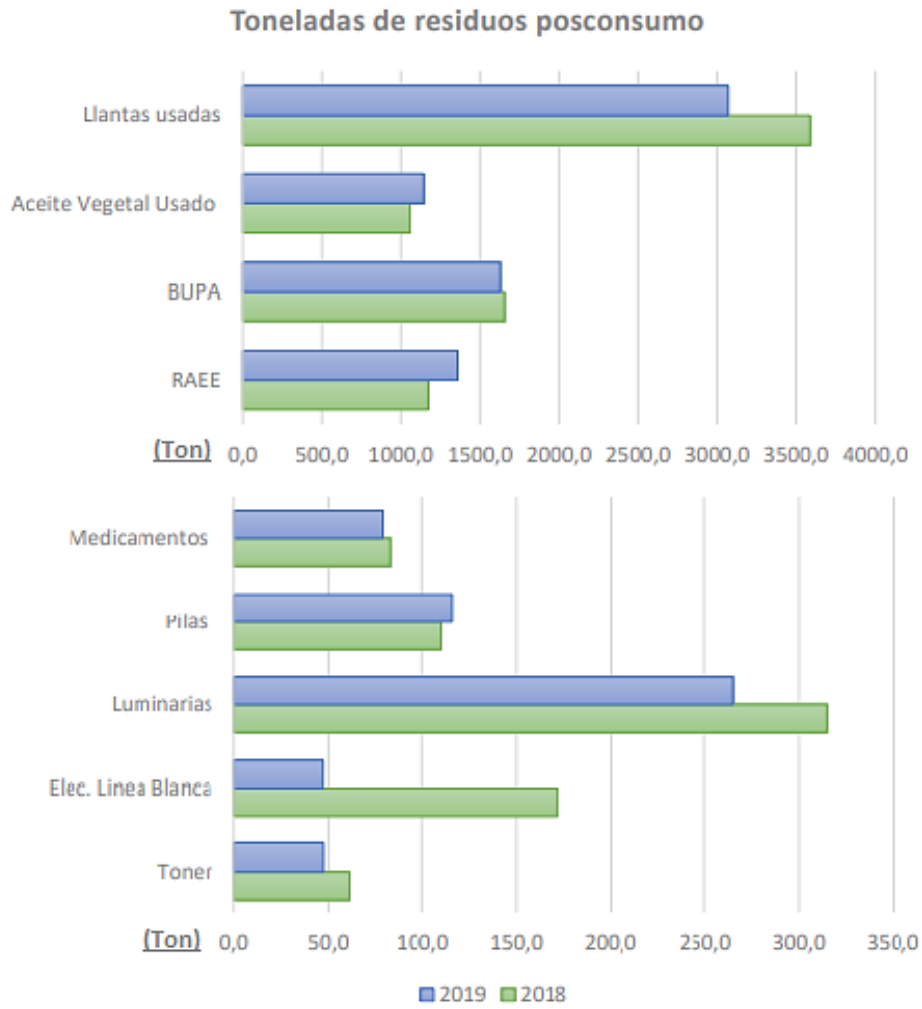
Según el fabricante de llantas *Michelin* diez años es el lapso máximo para el reemplazo de llantas en un vehículo; <<a modo de precaución, Michelin recomienda reemplazarlas por llantas nuevas. Incluso si parecen estar en estado utilizable y no se han gastado hasta el indicador de desgaste de la banda de rodamiento>> [3]. Lo anterior implica, que para el año 2025, sin tomar en cuenta los automóviles ya en circulación y el desecho propiciado por estos para dicho año, habrá aproximadamente 422.604 llantas usadas desechadas únicamente de vehículos nuevos que fueron registrados en el año 2015.

Según los compromisos adquiridos en el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), del que Bogotá hace parte, se desarrolló un estudio diagnóstico sobre el manejo ambiental de las llantas usadas y su disposición en la ciudad, dentro de las cuales se plantean tres alternativas para el aprovechamiento de las llantas usadas que se producen, entre las cuales se nombran: 1. Aprovechamiento energético y materia prima para hornos en la industria cementera como combustible alternativo al carbón. 2. Aprovechamiento energético en termoeléctricas como fuente de poder calorífico para generar energía eléctrica. 3. Utilización de la llanta usada como materia prima para producción de pavimento asfáltico. Estos métodos han sido estudiados por la Alcaldía Mayor de Bogotá y la Unión Temporal OCADE LTDA, entre los cuales se consideraron los aspectos económicos, tecnológicos, sociales y ambientales para cada alternativa, y se evaluó la factibilidad técnica y económica de la implementación de estos sistemas de reaprovechamiento de los neumáticos usados en la ciudad de Bogotá, mostrando como la opción más viable la tres [4].

Considerando las alternativas del estudio anterior y teniendo en cuenta que según estudios del Plan de Desarrollo 2020 – 2024 de la Alcaldía Mayor de Bogotá, según indica la Figura 2, para los años 2018 y 2019 se procesaron 3600 y 3100 toneladas de llantas usadas respectivamente, en programas implementados de posconsumo, luego de la creación del Decreto 442 de 2015 de la Alcaldía Mayor de Bogotá, siendo visible la necesidad de implementar alternativas adicionales para lograr abarcar la totalidad en materia de disposición de este residuo, contemplando técnicas como es el caso de la pirólisis de llantas usadas.

Figura 2.

Toneladas de residuos posconsumo gestionadas entre el año 2018-2019



Nota. La figura representa las toneladas de residuos de posconsumo gestionadas durante los años 2018 y 2019 en la ciudad de Bogotá, donde se incluyen las llantas usadas. Tomado de: *Plan Distrital de Desarrollo un Nuevo Contrato Ambiental y Social 2020-2024*. Plan de desarrollo distrital, Bogotá, D.C., Colombia, [En línea]. Disponible en: https://www.sdp.gov.co/sites/default/files/bases_del_pdd_un_nuevo_contrato_social_2020_2024_documento_uno.pdf [Acceso: marzo 23, 2022].

La solución ante la magnitud de generación de residuos de llantas, se lograría con la implementación de un conjunto de técnicas que atacan la misma problemática, siendo dentro de estas alternativas la pirólisis, una técnica eficiente que permite la transformación de este residuo en compuestos que se descomponen mediante un proceso de transferencia de calor en ausencia de

oxígeno, a productos de mayor valor agregado, que pueden ser reincorporados en la cadena de producción, fomentando así un proceso de economía circular.

¿Cuál es el diseño de un reactor de pirólisis que descompone la materia orgánica de neumáticos usados para a la producción de materiales de valor agregado?

1. MARCO TEÓRICO

Dentro de las aplicaciones del proceso de la Pirólisis, técnica de conversión energética poco estudiada con alto potencial para el aprovechamiento de residuos sólidos producidos en las ciudades, se encuentra la transformación de neumáticos fuera de uso (NFU) como materia prima proveniente de ciudades como Bogotá, para la generación de subproductos de valor agregado como: gases, líquidos hidrocarburos y sólidos (negro de humo), con aplicaciones industriales. Reincorporar estos residuos a la cadena de valor como nuevos productos, minimizando su impacto en la generación de desechos, es clave para un mundo en el que la transformación hacia una economía circular, surge como alternativa para mantener nuestro sistema consumista.

Con el objetivo de conocer el proceso de pirólisis y plasmar su viabilidad en la transformación y reincorporación de los NFU dentro de la cadena de valor mediante sus subproductos, presentamos una descripción de la composición de los neumáticos, la legislación que aplica actualmente entorno a la forma de disponerlos en la ciudad de Bogotá, los fundamentos y tipos de la técnica pirolítica, además de una descripción de los que serían sus productos finales al transformar los NFU, junto con sus aplicaciones a nivel industrial.

1.1. Neumáticos

Los neumáticos son una pieza de caucho que hace parte de la rueda de cualquier tipo de vehículo; cumplen diferentes funciones, entre las cuales están las de permitir el movimiento del vehículo que se encuentra en contacto con el suelo o la superficie, por la calidad de los materiales que estén compuestos se garantiza el arranque, adherencia, fricción y frenado del vehículo [5]. Existen diferentes tipos de neumáticos, con características físicas y químicas especiales, diseñados para los diferentes tipos de vehículos (carga, pasajeros, etc.), así como para las diversas condiciones de terreno o clima que se requieran utilizar.

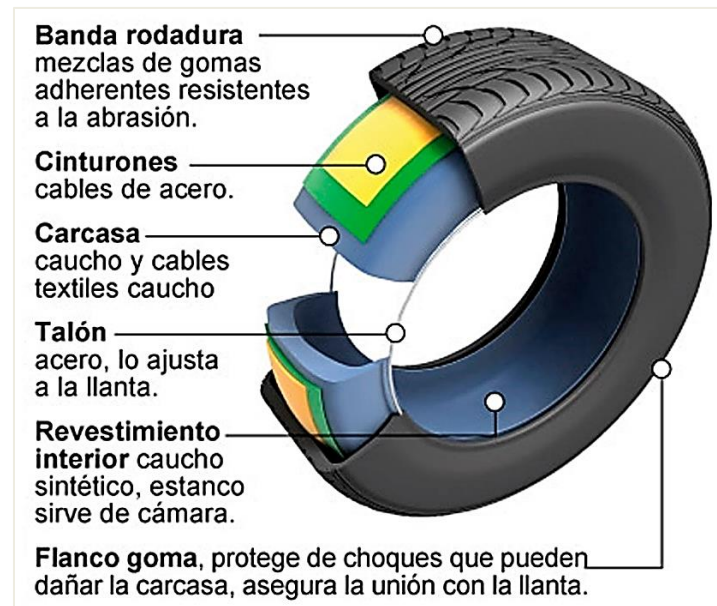
A continuación, se presentan las características generales, tanto físicas como químicas de los neumáticos.

1.1.1. Características físicas

A nivel físico, como se muestra en la Figura 3 el neumático está compuesto generalmente de tres partes, la primera una carcasa, la cual soporta la presión interna y cuenta con una gran resistencia para tolerar los impactos y torciones provocadas al momento del manejo y frenado del vehículo; la segunda denominada la pestaña (Talón y Revestimiento Interior), la cual hace parte integral de la carcasa, y tiene como función fijar el neumático a el aro metálico (Rin) del vehículo; y por último, la capa rodante (Cinturones, Banda de Rodadura y Carcasa de Goma), la cual tiene como principal función establecer el contacto con el suelo al momento del movimiento [6].

Figura 3.

Estructura de un neumático



Nota. Partes de la construcción de un neumático de calle tradicional.
Tomado de: P. Neumáticos, *El neumático: ejemplo de economía circular*, Valencia, España, [En línea]. Disponible: <https://www.neumaticospoveda.com/neumaticos-de-ocasion-economia-circular> [Acceso: marzo 11, 2022].

1.1.2. Características químicas

Para el proceso de fabricación de un neumático, como se evidencia en la Tabla 2, como materia

prima principal se encuentra el caucho (ya sea natural y/o sintético) y en total, se pueden llegar a utilizar aproximadamente 168 materias primas diferentes [7]. Los neumáticos, principalmente son elaborados mediante el proceso de vulcanización, que consiste en realizar una mezcla caliente entre el caucho natural, con pequeñas cantidades de azufre y otros productos químicos y de esta forma la mezcla genera un efecto químico de entrecruzamientos, en donde hay un incremento de las propiedades mecánicas y termo elásticas, modificando la resistencia y rigidez del caucho, manteniendo su elasticidad [8] y dejándolo resistente al deterioro producido por el calor y procesos de envejecimiento [9].

Tabla 2.
Composición de un neumático convencional

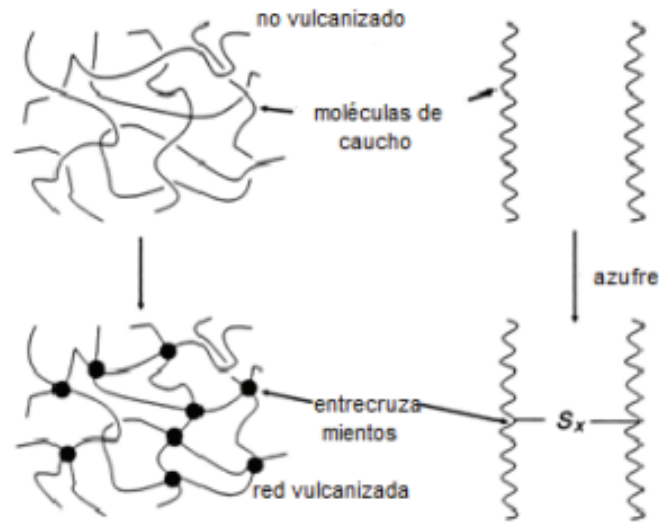
MATERIA PRIMA	CANTIDAD (%)
Caucho natural	19
Caucho sintético	26
Negro de Humo	23
Tejidos	9
Alambres	3
Aceites	6
Otros	14
Total	100 %

Nota. Cantidad porcentual de materia prima para la fabricación de neumáticos. Tomado de: P. Peñaherrera, *Aplicación de la herramienta single minute exchange of die (SMED) en el proceso de extrusión de la planta de preparación de la empresa Continental Tire Andina S.A.* Tesis pre. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador, 2013, [En línea]. Disponible: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/3689/1/tesis.pdf> [Acceso: abril 11, 2022].

Químicamente, como se presenta en la Figura 4, la vulcanización consiste en el entrecruzamiento de la unión de enlaces de azufre, con polímeros en cadena larga (tales como el isopreno, butadieno y estireno-butadieno), en donde se forman estructuras tridimensionales provocando así que físicamente el caucho sea un producto elástico [9].

Figura 4.

Formación de red tridimensional en el proceso de vulcanización



Nota. Formación de red tridimensional, desde la reacción con el azufre de las moléculas de caucho no vulcanizado. Tomado de: J. E. Mark, F. R. Eirich and B. Erman, *Science and Technology of Rubber*, 3ª Ed, Capítulo 7, Academic Press, 2005, [Acceso: abril 15, 2022].

A continuación, se presentan otras características de los principales materiales empleados en la producción de neumáticos:

- **Caucho Natural:** Se obtiene principalmente del árbol llamado *Hevea Brasiliensis* aunque existen otro tipo de especies que también lo producen. Es una secreción lechosa, más conocida como látex, extraída mediante el tratamiento de *sangrado* del árbol y mientras más se extrae, más se regenera la sustancia en la planta de la que es extraída. Mediante reacciones bioquímicas de polimerización catalizadas por encimas, se produce el caucho en el protoplasma de la planta [10].
- **Caucho Sintético:** Surge como alternativa sintética al caucho natural, debido a que su resistencia al calor no es lo suficientemente buena y difícilmente se puede modificar químicamente [11]. Es un subproducto del petróleo, en donde se realizan reacciones complejas de polimerización, comenzando con la refinación petroquímica y producción de olefinas y

aromáticos, que sirven como base para la obtención del etilbenceno, el estireno y el acrilonitrilo [12], entre sus principales características es su modificación para tolerar temperaturas elevadas en diferentes usos [11].

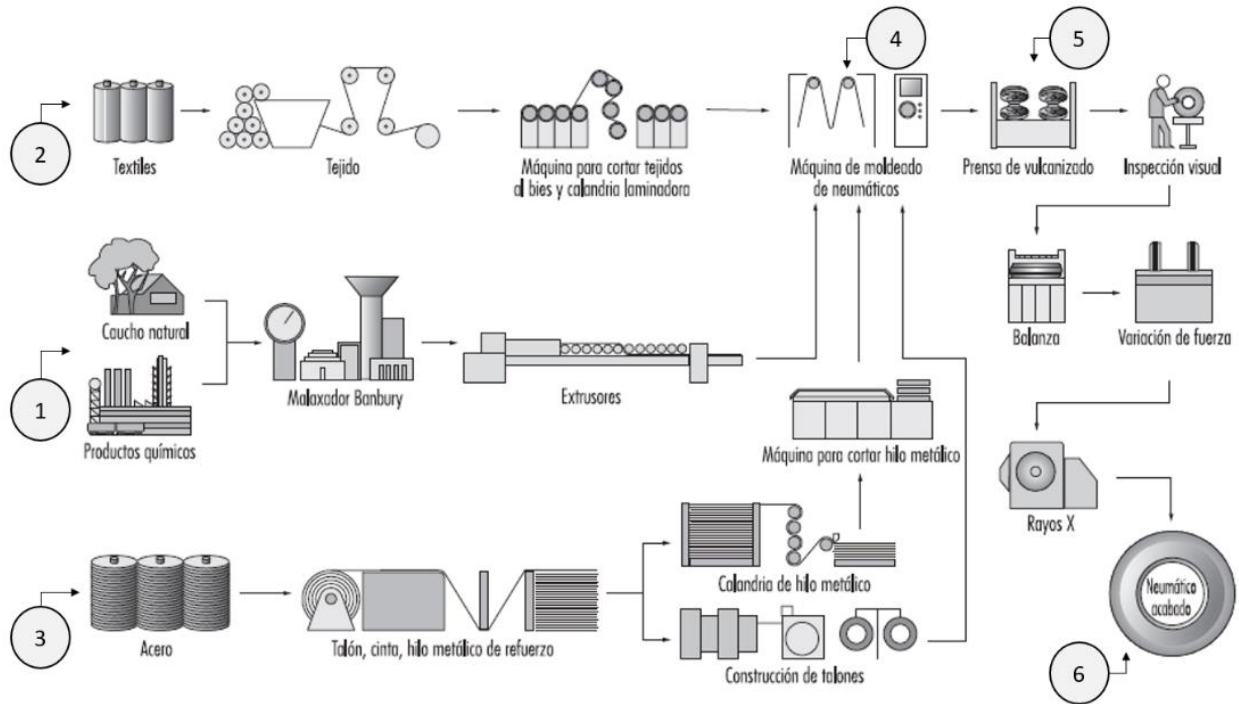
- **Negro de Humo:** También conocido como *hollín* o *char*, siendo otro de los productos procedentes de los hidrocarburos líquidos derivados del petróleo. Se considera un carbón químicamente puro y por sus características, le aporta dureza y consistencia a la mezcla que se prepare. Este se produce en reactores, donde se realiza la descomposición térmica del hidrocarburo y básicamente está compuesto por carbono (88 a 99,3%), hidrógeno (0,4 a 0,8%) y oxígeno (0,3 a 17%) [13].
- **Fibras de Rayón:** A través de la pulpa de madera, se extraen fibras de celulosa regeneradas del medio natural para producir filamentos o entretejidos. En el caso de los neumáticos, es utilizado de manera industrial para la carcasa del neumático [10].
- **Fibras de Acero:** Alambre pequeño de alta resistencia con ligeros dobleces en los extremos, hecho de alambre de acero dulce (Bajo carbono) estirado en frío, este es usado para reforzar y fortalecer la estructura del neumático [14].
- **Antioxidantes y Antiozonantes:** Le otorgan al neumático la capacidad de resistir los dañinos efectos de la luz solar y del ozono otorgándole mayor durabilidad a los neumáticos [6].

1.1.3. Proceso de fabricación de neumáticos

Haciendo uso de la numeración de la Figura 5., se describirá el proceso de producción de neumáticos, el cual inicia con la preforma o alistamiento de los principales componentes en las etapas 1, 2 y 3, que corresponden respectivamente al caucho, los textiles y el acero, como materia prima de entrada para la producción de “*Capas*”, continuando con las etapas 4, 5 hasta la 6, que corresponden al proceso de construcción del neumático.

Figura 5.

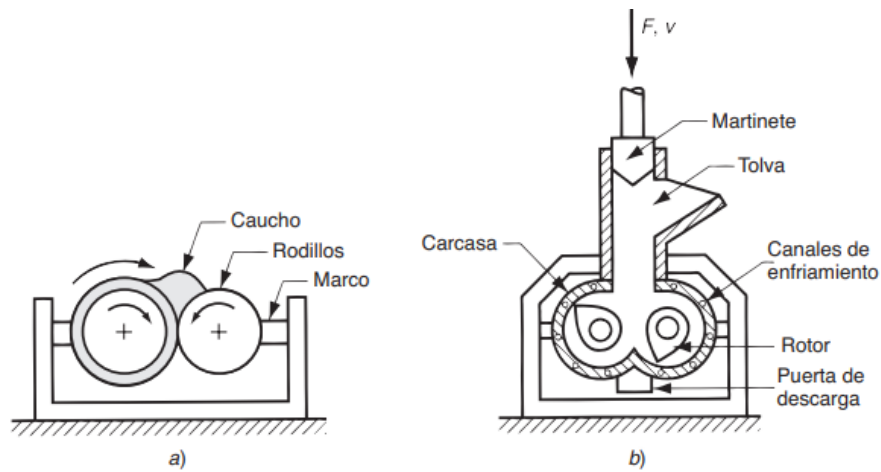
Etapas del proceso de fabricación de neumáticos



Nota. Modificada por el autor. Representación gráfica de subprocesos para la fabricación de neumáticos. Tomado de: L. Beliczky y J. Fajen, *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo*, Capítulo 80 Industria del caucho, 3ª Ed. España: Chantal Dufresne, [En línea]. Disponible en: <https://www.insst.es/documents/94886/161971/Cap%C3%ADulo+80.+Industria+del+caucho> [Acceso: abril 11, 2022].

Etapa 1. Corresponde a un proceso de mezcla de dos etapas: la primera, se combina el caucho natural con negro de humo y otros aditivos químicos no vulcanizadores. El trabajo mecánico que experimenta el caucho incrementa la temperatura de este hasta los 150 °C, por lo que se deja enfriar la mezcla antes de avanzar a la siguiente etapa; en la segunda, se agregan los agentes vulcanizadores a la mezcla. En esta mezcla, se utiliza un *Molino de dos rodillos* paralelos como el de la Figura 6 – a) para generar un mordisco de la mezcla de acuerdo al tamaño de la brecha entre los rodillos y un *Mezclador Bandury* como el de la Figura 6 – b) con rotores que poseen navajas contenidas en una carcasa, los cuales giran, generando un patrón de flujo complejo de la mezcla que contiene. La mezcla de caucho que se encuentra en una condición muy plástica pasa posteriormente a un *Extrusor de Tornillo*, el cual finaliza la etapa de mezcla con una buena conformación del caucho [8].

Figura 6.
Mezcladoras de caucho

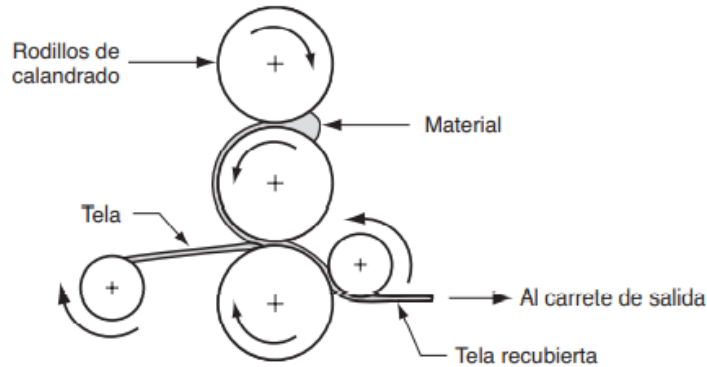


Nota. Diagrama Mezcladoras de Caucho. a) Molino de dos Rodillos b) Mezclador Tipo Bandury. Tomado de: G. Mikell P, *Fundamentos de manufactura moderna: Tecnología del procesamiento del caucho (hule)*, Capítulo 14, 3ª Ed, McGraw Hill Interamericana.

Etapla 2. La mezcla de caucho de la etapa 1 se emplea en el *Calandrado* de la etapa 2, recubriendo o impregnando los textiles de nylon, poliéster o fibra de vidrio, como se muestra en la Figura 7, donde se hacen pasar a través de una serie de espacios decrecientes por conjuntos de rodillos, produciendo una hoja de caucho determinada por el espesor de los rodillos, adherida a la capa textil, generando las denominadas “*Capas*” [8].

Figura 7.

Proceso de calandrado del caucho



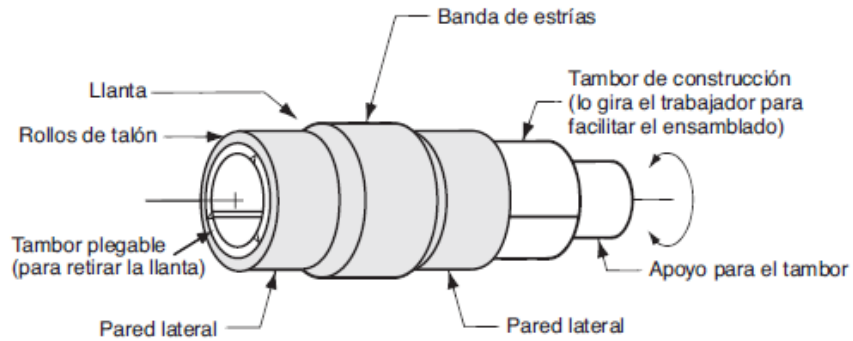
Nota. Proceso de calandrado de caucho con telas de Nylon o hilos de acero para la formación de capas. Tomado de: G. Mikell P, *Fundamentos de manufactura moderna: Tecnología del procesamiento del caucho (hule)*, Capítulo 14, 3ª Ed, McGraw Hill Interamericana.

Etapa 3. Este proceso se realiza de forma similar a la etapa 2, mediante *Calandrado*, pero utilizando hilos de acero de refuerzo para la producción de la banda de rodadura del neumático, obteniendo una hoja de caucho reforzada que soportara la fricción con en suelo [8].

Etapa 4. Inicia la etapa de construcción del neumático, al incorporar los materiales a través de una *Máquina de Moldeado o Tambor de Construcción* como se puede observar en la Figura 8, donde se construye la carcasa del neumático formando los flancos laterales y la banda de rodadura. Posee un árbol cilíndrico que ejerce rotación. Las capas preformadas inicialmente planas se les adhieren aros en ambos extremos, los cuales están conformados por rollos de filamentos múltiples de alambre de acero de alta resistencia, brindando un soporte rígido al neumático al montarse sobre la rueda. El tambor es plegadizo, acercando los bordes del tambor, e inflando la parte central para dar forma al neumático, siendo esta parte central donde se coloca una tira de banda de rodadura. Finalmente se libera el neumático crudo del tambor, con una forma de tipo tubular [15].

Figura 8.

Tambor de construcción de neumáticos

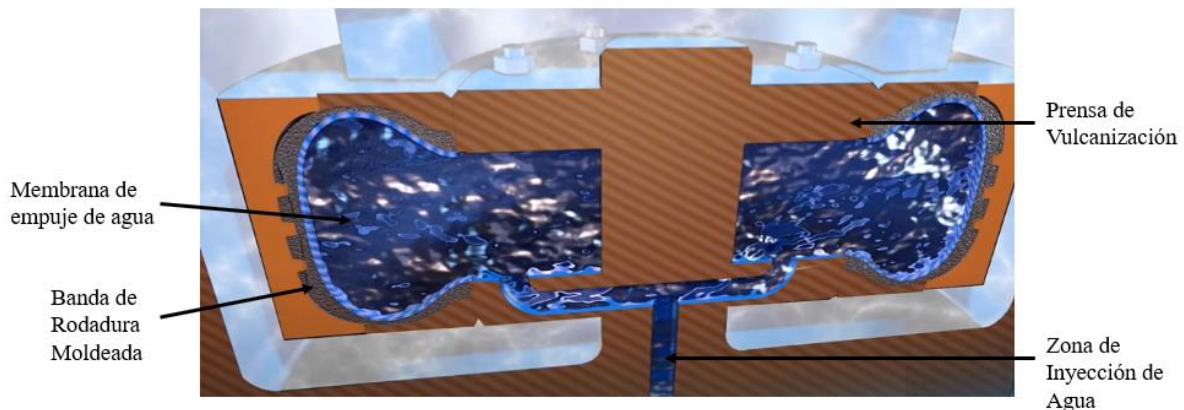


Nota. Diagrama de tambor utilizado en el ensamblaje de neumáticos. M. P. Groover. *Fundamentos de manufactura moderna, Capítulo 14, Tecnología del procesamiento del caucho.* 3ª Ed. México: McGraw Hill Interamericana, 2007.

Etapa 5. Por último, se realiza el proceso de moldeo y cura para la construcción del neumático como se observa en la Figura 9, donde se introduce el neumático crudo a una prensa de vulcanizado que tiene todos los futuros marcajes y dibujos, llenando de agua una membrana que empuja la goma del neumático crudo hacia las paredes del molde. Por efecto del calor del agua y el vapor que circula por el molde, comienza la cocción, generando la vulcanización del caucho, donde el azufre genera uniones entre las cadenas de polímeros [15].

Figura 9.

Prensa de vulcanizado



Nota. Modificada por el autor. Prensado por inyección de agua en molde de vulcanizado de neumáticos. Michelin, *Fabricación del neumático.* 2019. [En Línea]. Disponible: <https://www.youtube.com/user/Michelintrucktyres> [Acceso: septiembre 19, 2022].

Etapa 6. Finalmente, el neumático adquiere sus propiedades definitivas (6), adquiriendo mayor elasticidad, con capacidad para absorber impactos con la suficiente resiliencia evitando su deformación. En esta etapa el neumático pasa por una inspección visual, pruebas de esfuerzo y rayos X para posteriormente continuar el proceso de distribución.

1.1.1. Métodos de disposición de neumáticos

Entre las muchas alternativas de disposición final de neumáticos que han surgido conforme ha venido creciendo el uso de los mismos, los métodos principales y más utilizados son la trituración mecánica y criogénica, termólisis y la incineración, y son usados tanto por empresas y estados, con el fin de darle un uso apropiado a este tipo de residuos de la industria automotriz. A continuación, se describen las características principales de estos métodos:

1.1.1.a Trituración mecánica. Este proceso se realiza casi siempre como paso previo a diferentes métodos de recuperación, reutilización y rentabilización de neumáticos fuera de uso, consiste en fragmentar en pequeñas partes los neumáticos además de separarles de sus otros componentes estructurales como acero y fibras, obteniendo así caucho de ruedas granulado; este, puede ser usado como relleno en algunos productos de caucho, modificadores de asfalto, productos moldeados, calandrados y superficies de atletismo y deportes en general [16].

1.1.1.b Trituración criogénica. Consiste en exponer a una muy baja temperatura los neumáticos exactamente $-195.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, que corresponde al uso de nitrógeno líquido, en forma de espuma congelada o criogenizada dentro de un túnel de recirculación o también conocido como de ciclo cerrado y aislado al vacío, en estas condiciones el neumático cambia sus propiedades físicas y el caucho se vuelve frágil y quebradizo; en este proceso se separan las cenizas, el acero y las fibras, además de una trituración en granos muy finos de 0,1 mm aproximadamente [16].

1.1.1.c Termólisis. Es un proceso mediante el cual los residuos de neumáticos sufren un calentamiento en un medio en ausencia de oxígeno, para destruir los enlaces químicos mediante el uso de altas temperaturas, logrando así, una recuperación casi total de los compuestos que conforman el neumático, tales como: metales, carbones e hidrocarburos gaseosos; que pueden ser

reaprovechados en las cadenas de producción industriales como combustibles o materias primas, agregando valor a este proceso debido al gran aprovechamiento energético del mismo [16].

1.1.1.d Incineración. Es el método más popular actualmente usado para la disposición de neumáticos fuera de uso, este método de disposición consiste en llevar a un proceso de combustión a altas temperaturas los materiales orgánicos de los neumáticos fuera de uso, aprovechando el poder calorífico de estos (7.440 Kcal/kg), donde provoca un efecto exotérmico que se puede aprovechar para utilizarse como fuente de energía en el mismo proceso de incineración u otros procesos industriales, siempre que se cumpla con las exigencias técnicas y autorizaciones enmarcadas dentro de la normativa vigente [17].

1.1.4. Marco legal en la ciudad de Bogotá

1.1.4.a. Antecedentes. Para el año 2006, según la Cámara de Comercio de Bogotá, la cadena de gestión de residuos para neumáticos usados no se encontraba formalizada, encontrando que los sitios de disposición más comunes donde se dejaban las llantas después del reemplazo en la cadena de gestión existente para los grandes generadores de servicio público y particular, correspondía al mismo sitio de cambio de los neumáticos en un 72%, como se puede ver evidenciar en la Tabla 3 [18].

Tabla 3.*Acciones sobre residuos de neumáticos en Bogotá*

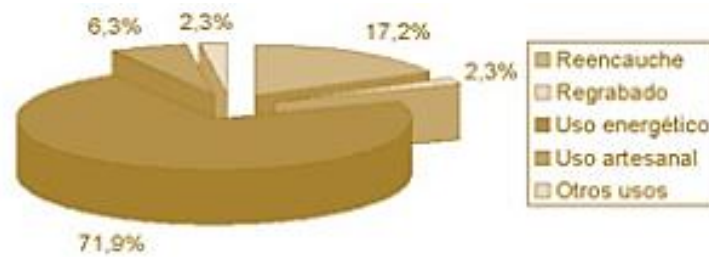
ACCIÓN	SERVICIO		TOTAL
	PARTICULAR	PÚBLICO	
Deja en el sitio de cambio	72,4 %	67,8 %	72,0 %
Dispone en la basura	12,1 %	11,6 %	12,0 %
Reencauche, reconstruida	3,3 %	9,4 %	3,8 %
Los vende	0,6 %	1,3 %	0,7 %
Los lleva y los guarda	3,2 %	5,7 %	3,4 %
Regala a recicladores	3,9 %	2,3 %	3,7 %
Sin información	4,5 %	1,9 %	4,3 %

Nota. Lugar o acción donde se depositaban las llantas usadas en Bogotá para el año 2006. Tomado de: Cámara de Comercio de Bogotá y Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente, *Guía para el manejo de llantas usadas. Un sector transporte con operación más limpia.* Bogotá D.C., Colombia, 2006, [En Línea]. Disponible: <https://bibliotecadigital.ccb.org.co/handle/11520/14583> [Acceso: septiembre 11, 2022].

Para el año 2006, el aprovechamiento térmico de los neumáticos al no estar regulado correspondía a la cadena de mayor demanda de estos residuos en un 71,9% como se observa en la Figura 10, dirigido al sector energético de los hornos de producción de panela en el noroccidente de Cundinamarca, generando altos impactos ambientales y de salud pública relacionados a los gases que se emitían en la combustión de los mismos [18].

Figura 10.

Aprovechamiento de neumáticos usados en Bogotá para el año 2006



Nota. Distribución porcentual del aprovechamiento de neumáticos usados en la ciudad de Bogotá sin regulación formalizada para el año 2006. Tomado de: Cámara de Comercio de Bogotá y Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente, *Guía para el manejo de llantas usadas. Un sector transporte con operación más limpia*. Bogotá D.C., Colombia, 2006, [En Línea]. Disponible: <https://bibliotecadigital.ccb.org.co/handle/11520/14583> [Acceso: octubre 25, 2022].

Debido a la falta de legislación existente, en relación con los planes de posconsumo de neumáticos para antes del año 2008 y dada la mala disposición de estos en toda la ciudad, la Alcaldía Mayor de Bogotá en 2008, desarrolló el proyecto “Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de Llantas y neumáticos usados generados por el parque automotor de Bogotá” desarrollado por la Unión Temporal: OCADE LTDA., Control Ambiental y Desarrollo Empresarial de Colombia, SANIPLAN de Brasil y Ambiental S.A. de Argentina; buscando con el diagnóstico, evaluar la problemática de residuos e investigar las posibles alternativas teniendo en cuenta experiencias internacionales, proponiendo y evaluando cuatro alternativas de programas de posconsumo sobre los cuales se realizó un estudio técnico y económico para poder seleccionar la mejor opción conceptual a implementar a futuro en la ciudad de Bogotá.

Dentro de las alternativas estudiadas se encontraban: 1) El aprovechamiento energético y materia prima para hornos en la industria cementera, 2) el aprovechamiento energético en termoeléctricas, 3) la utilización de la llanta usadas como materia prima para producción de pavimento asfáltico, y 4) suministro de materias primas para usuarios del caucho [4].

Tabla 4.

Resumen de priorización de alternativas para la reutilización de neumáticos usados en Bogotá

PARÁMETRO	MÁXIMO PUNTAJE PROBABLE	PUNTAJE ALTERNATIVA 1 (HORNO DE CEMENTO)	PUNTAJE ALTERNATIVA 2 (TERMOELÉCTRICA)	PUNTAJE ALTERNATIVA 3 (PAVIMENTO ASFÁLTICO)	PUNTAJE ALTERNATIVA 4 (MATERIAS PRIMAS PROD. DE CAUCHO)
Económico cuantificable	20	15	3	13	11
Económico no cuantificable	25	5	5	15	20
Social	20	8	7	17	17
Ambiental	20	15	10	13	18
Tecnológico	15	9	4	5	15
TOTAL	100	52	29	63	81

Nota. La tabla muestra los resultados del estudio de priorización de alternativas para el reciclaje de llantas usadas en la ciudad de Bogotá de acuerdo a los parámetros de estudio. Tomado de: Alcaldía Mayor de Bogotá y Unión Temporal OCADE LTDA., *Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de llantas y neumáticos usados generados por el parque automotor de Santa Fe de Bogotá*. Estudio de Prefactibilidad, Bogotá D.C., Colombia, 2008, [En Línea]. Disponible:

<https://ambientebogota.gov.co/documents/10184/506375/Diagn%C3%B3stico+ambiental+sobre+el+manejo+actual+de+llantas+y+neum%C3%A1ticos+usados+generados+por+el+parque+automotor+de+Santa+Fe+de+Bogot%C3%A1..pdf/cb9ec01a-7724-48ab-b8b4-6744aacfb95> [Acceso: julio 15, 2022].

Teniendo en cuenta la Tabla 4, el estudio concluyó considerar los siguientes escenarios posibles a implementar los primeros programas de posconsumo de neumáticos en la ciudad de Bogotá definidos en el siguiente orden: 1) Planta de producción de caucho de llanta pulverizado a malla 40 con destino al mercado de exportación, 2) Planta de producción de caucho de llanta pulverizado, 50% a malla 40 con destino al mercado de exportación, y 50% a malla 80 para ser utilizado en la fabricación de pavimento asfáltico.

Adicionalmente, el estudio señala que en el modelo de negocio propuesto se debía asumir un costo por la captación y acopio de los neumáticos del orden de <<COL \$753 por cada llanta>> aplicado sobre el mercado de los neumáticos nuevos en el momento de su adquisición, asumido por el usuario directo, además de adelantar un estudio piloto con el IDU para establecer las especificaciones que regulen la utilización de del triturado de caucho en la producción de asfalto [4].

1.1.4.b. Legislación vigente. Dando alcance al cumplimiento normativo vigente, a continuación, se presenta la legislación del tema de referencia:

- Constitución Política de Colombia de 1991, Artículo 80, el cual establece:

<<El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados>> [19].

- La Alcaldía Mayor de Bogotá, emite la Resolución No. 1457 de Julio de 2010, que establece los <<Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas>>:

Prohíbe a las empresas y particulares el abandono o eliminación incontrolada de llantas usadas, ocupar el espacio público, depositarlas en rellenos sanitarios, enterrarlas, acumularlas a cielo abierto o incinerarlas. Además, exige la implementación de sistemas de recolección selectiva de las llantas fuera de uso por parte de los productores e importadores de llantas en Colombia [20].

- La secretaria Distrital de Ambiente y Movilidad mediante Resolución 6981 de Diciembre 27 de 2011, <<Dicta los lineamientos para el aprovechamiento de llantas y neumáticos usados, y llantas no conforme en el Distrito Capital>>:

Considera la recuperación del residuo mediante diversas técnicas, para la elaboración del mismo producto o de otros, a efectos de volver a introducir en la cadena de comercialización. Técnicas para el reciclaje como son el uso como relleno o ligante en asfaltos, uso como combustible, obtención de materias primas para industria del caucho y derivados entre otros [20].

- La Alcaldía Mayor de Bogotá emite el Decreto 442 de noviembre de 2015, <<se crea el programa de aprovechamiento y/o valorización de llantas usadas para Bogotá>>:

Aplica a todos los actores que almacenan llantas o subproductos derivados de actividades de tratamiento o su aprovechamiento; ejecuten y/o adelanten procesos constructivos con asfalto, en obras de infraestructura del transporte en el Distrito Capital, todas las Entidades que conforman la administración pública distrital, que cuenten con vehículos de transporte con llantas de rin 15" en adelante, maquinaria y equipos propios o en alquiler, y las Entidades que conforman la administración pública del Distrito que realicen obras en áreas destinadas para recreación y deporte. Se establecen definiciones, las obligaciones y registro de gestores y acopiadores, aprovechamiento en obras de infraestructura, obligaciones de la Secretaría de Ambiente, alcaldes Locales y consumidores; prohibiciones, entre otras disposiciones para el cumplimiento del programa [21].

- La Alcaldía Mayor de Bogotá emite el Decreto 265 de junio de 2016, por medio del cual modifica en Decreto 442 de 2015 en los temas relacionados con el registro para acopiadores y gestores de llantas, planes de contingencia, el aprovechamiento en obras de infraestructura del transporte en el Distrito y mesa distrital de llantas usadas.
- La Resolución 1326 de Julio de 2017, <<Establece los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas entre otras, tiene por objetivo establecer a cargo de los productores de llantas que se comercializan en el país, la obligación de formular, presentar e implementar y mantener actualizados los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas con el fin de prevenir y controlar la degradación del ambiente>> A su vez, indica que a partir de 2019 deberán adaptarse a la meta de recolección y gestión ambiental otros vehículos (bicicletas, motocicletas, motociclos, ciclomotor y llantas fuera de carretera).

1.1.4.c. Planes de post consumo actuales. Como parte de la implementación de la Resolución 1326 de 2017, en la ciudad de Bogotá se implementaron los *Programas de Posconsumo* para los neumáticos usados, donde es obligación hacer parte del Sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas para darle la correcta disposición a estos residuos. Es por ello que, en Bogotá con la creación y operación de la “*Corporación Posconsumo de Llantas Rueda Verde*” y “*Sistema Verde S.A.S.*”, logra recolectar, gestionar, procesar y dar valor una capacidad

importante de estos residuos, con el fin reincorporarlos en la cadena de valorización, a través de la transformación en combustible TDF para valorización energética en hornos cementeros [22].

Según la Corporación Posconsumo de Llantas Rueda Verde, para el año 2017 habría logrado recolectar 6'500.000 de llantas para darle una adecuada disposición final a estos residuos. Así mismo, indicó que la meta para el año 2021 su meta era ser líder en gestión ambiental de posconsumo de llantas en Colombia con la meta de reincorporar el 65% de las llantas usadas puestas en el mercado por los productores vinculados al programa [23]. Esta cifra, evidentemente propone la falta de programas para cumplir al 100% la capacidad de procesamiento de estos neumáticos de una forma tanto económicamente como ambientalmente sostenible para los Bogotanos.

1.1.5. Economía Circular aplicada a los neumáticos

Luego de la Revolución Industrial, la humanidad se instaló bajo un modelo de Economía Lineal que viene desarrollando con etapas sucesivas como se puede observar en la Figura 11, donde el producto se fabrica a partir de la materia prima, se distribuye hasta el consumidor, este le da un tiempo de vida útil, finalizando con una etapa de vertimiento, generando altos volúmenes de residuos. Este modelo promueve el extractivismo de materias primas fósiles, generando altos impactos ambientales por la cadena de consumo. Solo una pequeña porción de estos residuos tiene la posibilidad de finalizar su vida útil siendo reciclados, reutilizados, reparados, renovados o recuperados. Esta visión se convierte en algo contradictorio al modelo de Sostenibilidad Ambiental que se busca impere en la actualidad [24].

Figura 11.

Modelo general de Economía Lineal



Nota. Modelo de Economía Lineal tradicional como Sistema de consumo actual. Tomado de: A. Sanchis, A. Veses, J. D. Martínez, T. García, and R. Murillo, “Hacia una economía circular del de carbono por medio de la pirólisis de neumáticos fuera de uso,” vol. 65, pp. 5–12, 2022, [En Línea]. Disponible: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8583096> [Acceso: noviembre 6, 2022].

El modelo de Economía Circular, tal y como se presenta en la Figura 12 surge como alternativa y se fundamenta en la recuperación de las materias primas a partir de productos en fuera de uso al utilizarlos en la fabricación de nuevos productos, entre otras ventajas reduciendo el consumo energético y de materias primas asociadas a las siguientes tres etapas: extracción, procesamiento y disposición final, para reducir su huella ambiental y potencialmente es capaz de acelerar la creación de nuevos modelos de negocio. De esta manera, se introduce la Economía Circular para dar cumplimiento al Objetivo número 12 de Desarrollo Sostenible, hacia modelos de producción y consumo sostenibles de la Agenda 2030 adoptada por la Asamblea General de la ONU [24].

Figura 12.

Modelo general de Economía Circular



Nota. Modelo de Economía Circular. Tomado de: A. Sanchis, A. Veses, J. D. Martínez, T. García, and R. Murillo, “Hacia una economía circular del de carbono por medio de pirólisis de neumáticos fuera de uso,” vol. 65, pp. 5–12, 2022, [En Línea].

Disponible:

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8583096>

[Acceso: noviembre 6, 2022].

Los neumáticos fuera de uso no escapan a este modelo económico propuesto de Economía Circular, donde se propone el desarrollo y estudio de técnicas como la Pirólisis de Neumáticos, para poder procesar estos desechos, reincorporarlos a la cadena de valor mediante subproductos que sirvan para la producción de nuevos neumáticos o productos que utilizan la fracción sólida

denominada Negro de Humo, además de las fracciones líquida y gaseosa producto de los condensados que se desprenden durante el proceso.

1.2.Pirólisis

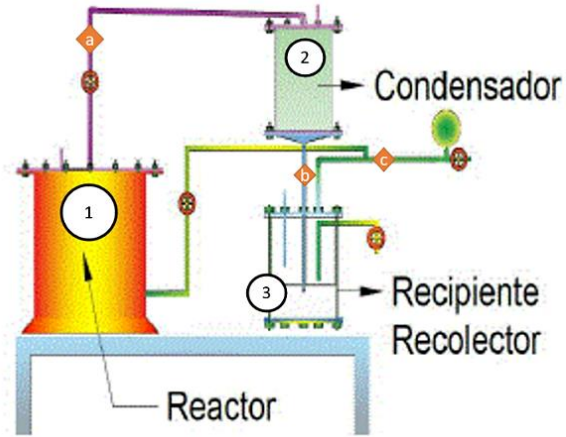
1.2.1. Fundamentos del proceso de pirólisis

La Pirólisis es un proceso endotérmico que implica la descomposición térmica de la materia orgánica y/o los polímeros que la componen en ausencia de oxígeno o en una cantidad limitada, al elevar las temperaturas entre 300 a 800 °C. Sus subproductos pueden variar en función de parámetros como la presión, los flujos, la carga de materia prima, la velocidad de calentamiento, tamaño de las partículas, tiempo de exposición, entre otros. Dentro de los subproductos de pirólisis se encuentran: gases condensables, líquidos hidrocarburos y sólido (negro de humo) [25].

Su principio de funcionamiento se explica haciendo uso de la Figura 13. donde la materia prima se inserta en el Reactor Piroclítico (1), que a medida que incrementa su temperatura hasta el punto de la degradación térmica del material, comienza a liberar sus fracciones por la salida (a), donde fluye la corriente de gas condensado hacia el condensador (2), que reduce la temperatura de la corriente de gas de pirólisis y la libera por la salida (b), permitiendo que la fracción que logra condensarse en líquido, caiga al recipiente (3), mientras la fracción de gas liviano, continúa su salida hacia una tea (c) o se utiliza como gas para la regeneración del proceso para producir calor en el reactor.

Figura 13.

Modelo básico de un reactor de pirólisis

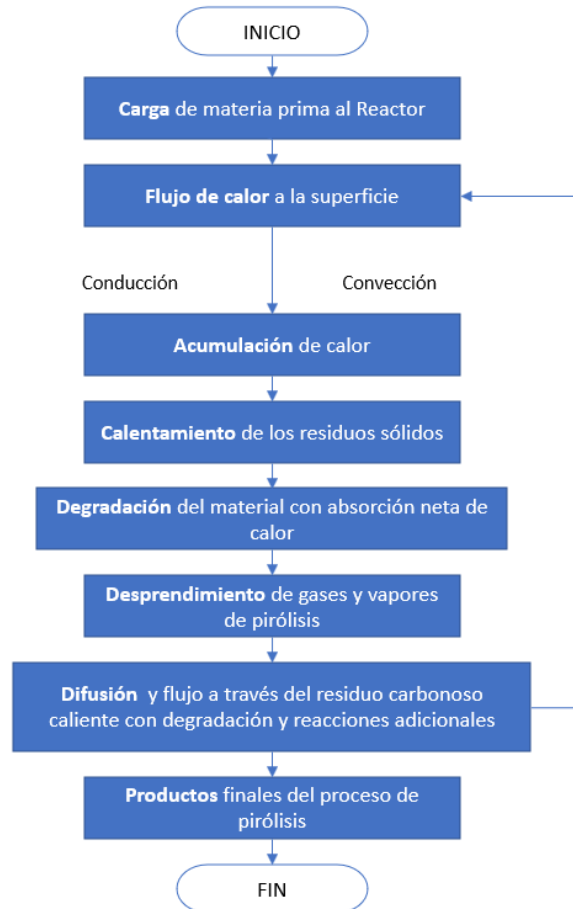


Nota. Modificada por el autor. Diagrama conceptual del proceso de pirólisis, Tomado de: Imagen Web [En línea]. Disponible en: <https://es.quora.com/Qu%C3%A9-tipo-de-maquinas-se-utilizan-para-la-Pirólisis-de-plasticos> [Acceso: abril 13, 2022].

Este proceso físico-químico ocurre como una etapa previa a la combustión (requiere atmosfera con oxígeno) y la gasificación (requiere mayores temperaturas), dando la posibilidad de obtener productos de usos industriales diferentes y de valor agregado [26], siguiendo el diagrama de proceso de la Figura 14.

Figura 14.

Diagrama de procesos de pirólisis



Nota. Diagrama de proceso de pirólisis. Tomado de: Polo del Conocimiento, “*Diseño de un prototipo de reactor de pirólisis térmica para la descomposición y aprovechamiento de residuos plásticos fabricados a partir de: PP, PE y PS*”, 2021 [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8016903.pdf> [Acceso: septiembre 9, 2022].

La forma en la que se realiza el aporte de calor al sistema o básicamente como está diseñado el reactor, divide la pirólisis en dos grandes grupos descritos a continuación:

1.2.1.a. Sistemas Alotérmicos (Indirecto). La transmisión del calor se realiza de forma indirecta por conducción y radiación de las paredes del reactor, producto de la fuente de energía, que en algunos casos incluye la regeneración del gas producido por la misma pirólisis para la radiación.

Se lleva a cabo en ausencia de aire, por lo cual el reactor debe tener sus sistemas de válvulas de entrada y salida completamente hermetizadas. Este proceso requiere del uso de intercambiadores de calor para independizar los volátiles y los vapores, mejorando su futura valorización. La máxima temperatura de la pared del reactor debe ser de alrededor de 750 °C. El metal del reactor puede sufrir de degradación producto de las altas temperaturas y de los gases ácidos disgregados, generando estrés en el material [26].

1.2.1.b. Sistemas Autotérmicos (Directo). La generación de calor se realiza de forma directa, o expresada de otra forma, mediante la combustión de parte de la carga del mismo reactor. Las reacciones deben realizarse en atmósfera reductora para evitar la combustión descontrolada, presentando una mayor eficiencia en la transmisión de calor, llegando a temperaturas de funcionamiento de 1250 °C, sin embargo, no permite independizar la temperatura de pirólisis a la de la combustión. Los gases de combustión y pirólisis, se mezclan dentro de la misma unidad. Pero como punto a favor, a pesar de funcionar a mayores temperaturas, el reactor de metal no presenta una alta dilatación térmica, eliminando el estrés que puede sufrir el material [26].

1.2.2. Tipos de pirólisis

De acuerdo a la combinación de las condiciones de operación del equipo, la pirólisis se puede clasificar en tres grandes grupos que difieren entre sí, conocidos como: Pirólisis Convencional, Pirólisis Rápida y Pirólisis Flash, según se observa su comparación en la Tabla 5. Entre las condiciones que pueden variar se encuentran: tasa de calentamiento, ambiente de reacción, uso de catalizadores, tiempo de retención, forma de calentamiento [27].

Tabla 5.*Comparación de parámetros de operación de los tipos de pirólisis*

PROCESO	TEMP °C	VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO °C/s	TIEMPO RESIDENCIA	PRODUCTO MAYORITARIO
Convencional	500	2	Gases 5 s Sólido horas	Negro de humo y condensables
Rápida	400 a 800	> 2	Gases: < 2 s	A temperaturas moderadas, 500°C, condensables
Instantánea	> 600	> 200	Gases: < 0,5 s	Gases e hidrocarburos ligeros

Nota. Tabla comparativa entre clasificación de los procesos de pirólisis de acuerdo a sus condiciones de operación. Tomado de: X. Elías y E. Velo, *Tratamiento y Valorización energética de Residuos, La Pirólisis*. España: Diaz de Santos, 2005, pp. 477–538. Disponible: Biblioteca Universidad de La Salle.

De acuerdo a lo anterior, se describen algunas características y como afectan la naturaleza de sus subproductos:

1.2.2.a. Pirólisis Convencional. Implica un proceso de descomposición que favorece la producción de sólido (negro de humo) a temperaturas intermedias-bajas (500 °C), debido al largo tiempo de exposición o residencia de los sólidos al calor dentro del reactor, asegurando la homogeneidad de la transformación de manera ordenada, completa y homogénea; además de una alta tasa de condensables, dado el largo tiempo de residencia de la fase de vapor (5 segundos). La velocidad de calentamiento es bastante inferior a los otros procesos, con alrededor de 2 °C/s [28].

1.2.2.b. Pirólisis Rápida. Su tasa de calentamiento se incrementa a hasta rangos superiores a 2 °C/s y menores a 200 °C/s, reduciendo la producción de la fracción sólida y favorece la producción de condensables (fracción con gas y líquido pirolítico). Sus temperaturas ocurren en un rango mayor de 400 a 800 °C. El tiempo de residencia de los gases es bajo y favorece la producción de olefinas ligeras, debido a la reducción de la polimerización de las mismas [27]. Requiere de tamaños de grano de neumático de menor tamaño para transmitir de forma ideal el calor [28].

1.2.2.c. Pirólisis Instantánea (Flash). Utiliza velocidades de calentamiento más rápidas, mayores a 200 °C/s, favoreciendo la producción de las fracciones líquidas e hidrocarburos ligeros, debido a la rápida volatilización que ocurre al elevar la temperatura. Sus temperaturas son mayores a 600

°C. El periodo de residencia para los gases es el menor, inferiores a 0,5 segundos [27] [28].

1.2.3. Tipos de reactores de pirólisis

Teniendo en cuenta el uso de diferentes tecnologías y la aplicación a los procesos industriales, el proceso pirolítico puede llevarse a cabo en equipos con características que dependen de la naturaleza del lecho del reactor y sus diferentes aspectos prácticos operacionales, clasificando los distintos tipos de equipos así:

1.2.3.a. Reactor de Pirólisis Tipo Batch. Este tipo de reactor, como se presenta en la Figura 15, se caracteriza por poseer un depósito cerrado que conserva una periferia calefactora en donde se colocan los reactivos; en la mayoría de los casos internamente cuenta con un dispositivo de agitación mecánico, este reactor no cuenta con flujos inertes que ayuden en el desplazamiento de volátiles que son producidos como consecuencia de la reacción, produciendo reacciones secundarias (aromatizaciones) que influyen en la prestación del equipo en tanto que se obtienen productos no deseados [29].

Figura 15.

Esquema de un reactor tipo Batch



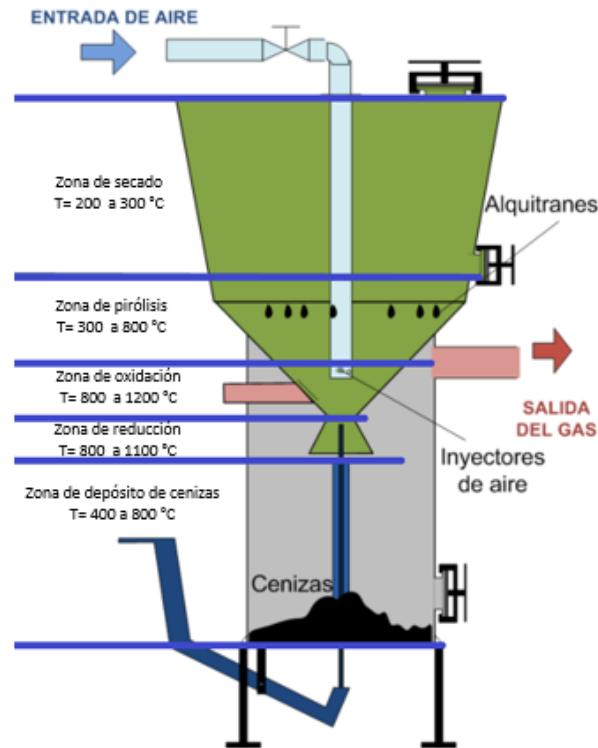
Nota. En la figura se muestra un reactor tipo Batch y su dispositivo interior de agitación mecánica. Tomado de: W. Morales, P. Garcés, Diseño y construcción de un reactor de pirólisis térmica, para el aprovechamiento de residuos plásticos de polipropileno, generados en la Epoch, Tesis pre. Facultad de ciencias, Escuela superior politécnica de Chimborazo, Rioamba, Ecuador. 2018, [En línea]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/8661/1/96T00463.pdf> [Acceso: octubre 25, 2022].

1.2.3.b. Reactor de Lecho Fijo. Este tipo de reactores que son desarrollados como se presentan en la Figura 16, son los más importantes en la industria y son utilizados para la producción a gran escala de reactivos primarios o intermedios, ya que su funcionamiento tiende a ser continuo y como ventaja, no requiere la separación del catalizador y su regeneración, requiere el uso de gases y tiene una alta conversión por unidad de masa de catalizador, es decir una mayor conversión por peso del catalizador, es fácil de limpiar y tiene un bajo costo de operación. Los catalizadores a utilizar no pueden ser de partículas pequeñas ya que se generaría un taponamiento del sistema y

ocasionaría las caídas de presión, usualmente se utilizan sistemas de recirculación para generar una mayor eficiencia de reactivación y maneja temperaturas entre los 200 a 1200 °C [30].

Figura 16.

Esquema de un reactor de lecho fijo



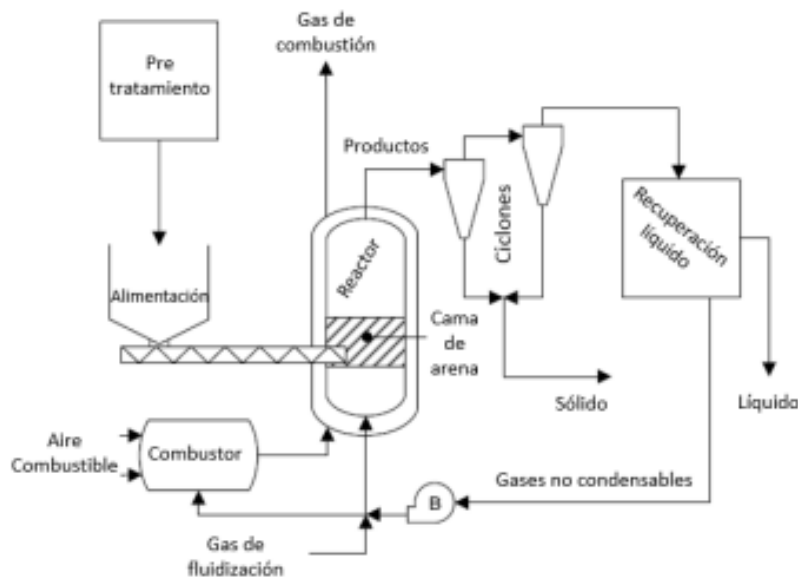
Nota. Modificada por el autor. Esquema de reactor de lecho fijo con perfil de temperaturas. Tomado de: Perfil de temperaturas de un reactor de lecho fijo downdraft, [En línea]. Disponible en: https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Perfil_de_temperaturas_en_un_reactor_de_lecho_fijo_downdraft.png [Acceso: abril 12, 2022].

1.2.3.c. Reactor de Lecho Burbujeante. El reactor de lecho burbujeante es frecuentemente utilizado en la producción de aceite pirolítico, ya que este ofrece un rendimiento elevado en lo que respecta enfáticamente a la producción del producto líquido obtenido a partir del proceso. Se compone de una cámara que contiene arena caliente, donde un constante flujo de gas en estado de inercia se utiliza para que la arena sea fluidizada, en adición a esto, el gas también desempeña la función de

mejorar las condiciones de transferencia de calor para facilitar el desempeño de las reacciones llevadas a cabo en el proceso, resultado de homogenizar la mezcla; como fuente de generación de calor el reactor puede contar con distintos métodos tales como la utilización de resistencias eléctricas, la recirculación de los gases obtenidos a partir del mismo proceso o tal como se muestra en la Figura 17, donde se puede apreciar que el reactor es calentado directamente a partir de un proceso de combustión [31].

Figura 17.

Esquema de proceso reactor de lecho burbujeante



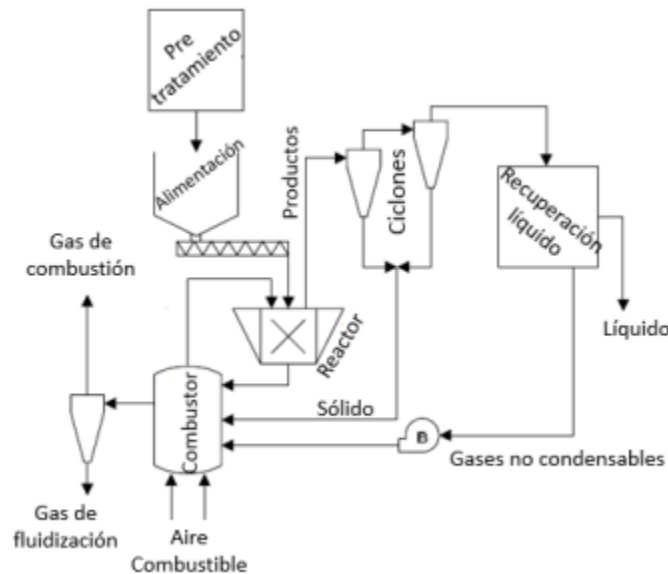
Nota. Diagrama de proceso de reactor de lecho burbujeante y sus demás componentes. Tomado de: W. Fonseca, *Evaluación de un reactor de Lecho Fluidizado en el proceso de pirólisis catalítica usando desecho de caucho de llanta*, Tesis pre. Facultad de ingenierías, Universidad de los Andes, Bogotá, D.C., Colombia, 2016, [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/1992/13916> [Acceso: abril 15, 2022].

1.2.3.d. Reactor de Cono Rotatorio. El concepto de este reactor fue desarrollado por Prins y Wagenaar en la Universidad de Twente en Países Bajos, este tipo de reactor es comercializado por “The Biomass Technology Group – Biomass to Liquid” [32]. Se compone de un recipiente de reacción vertical en el cual un lecho de materia prima (puede ser biomasa y arena), está constantemente mezclado a consecuencia de la utilización de un gas de fluidización; en este se

utiliza un cono rotatorio junto con un sólido que funciona como medio de calentamiento (en la mayoría de los casos arena) para la mezcla de la materia prima al interior del reactor, donde la fuerza centrífuga empuja la arena caliente y el carbón fuera de la cima del cono, tal como es mostrado en la Figura 18, donde posteriormente el producto obtenido pasa a un proceso de ciclones para finalmente obtener la fracción líquida del producto y recircular el gas no condensable; la utilización del reactor de cono rotatorio ofrece como ventaja la minimización de la cantidad de gas utilizado en el proceso [33].

Figura 18.

Esquema de proceso de cono rotatorio



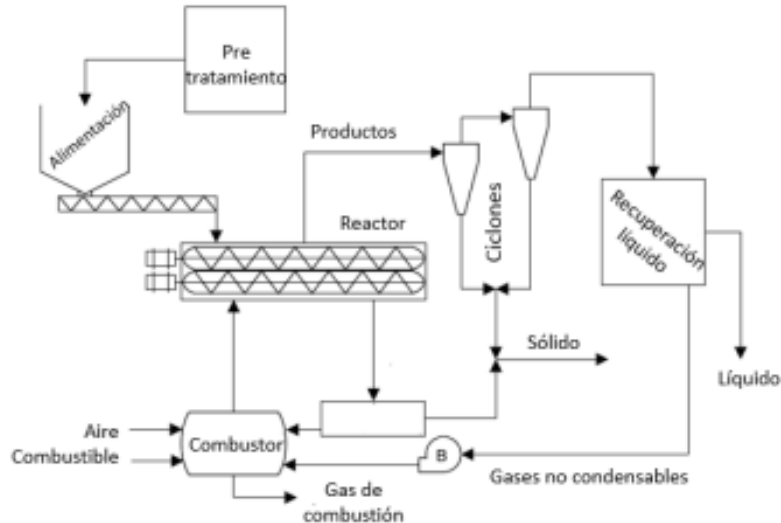
Nota. Diagrama de proceso de reactor de cono rotatorio. Tomado de: W. Fonseca. *Evaluación de un reactor de Lecho Fluidizado en el proceso de pirólisis catalítica usando desecho de caucho de llanta*, Tesis pre. Facultad de ingenierías, Universidad de los Andes, Bogotá D.C, Colombia, 2016, [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1992/13916>. [Acceso: abril 15, 2022].

1.2.3.e. Reactor de Tornillo Sin Fin. Similar al sistema empleado en el reactor de cono rotatorio, el reactor de tornillo sin fin ejecuta un proceso en el cual se mezcla la materia prima con un sólido que permite el calentamiento de la muestra. Este tipo de reactor se caracteriza principalmente por la ausencia de un gas de fluidización, el proceso es ejecutado en el interior de un recipiente

horizontal en el cual es posicionado un tornillo sin fin que permite la mezcla de la materia que entra en contacto directo con el lecho de calentamiento, para posteriormente pasar por un sistema de ciclones, donde se realiza la separación de la fase sólida de la fase gaseosa y líquida (gas condensado de pirólisis), donde esta última pasa por un proceso de condensación, que permite separar el líquido del gas pirolítico o no condensable, que se utiliza como combustible de manera simultánea en la regeneración del proceso produciendo el calor. Cabe mencionar que en la Figura 19. es mostrado un proceso con doble tornillo, siendo una variable tecnológica de este tipo de equipos [33].

Figura 19.

Esquema de procesos de pirólisis con reactor de tornillo sin fin



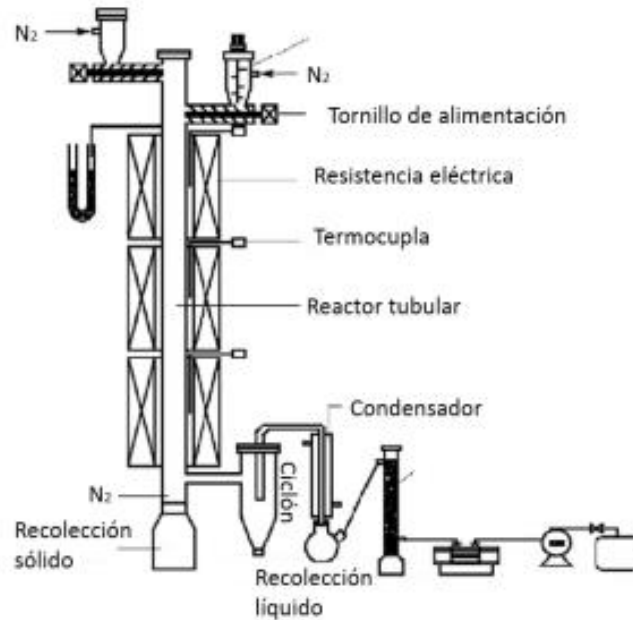
Nota. Diagrama de proceso de reactor de tornillo sin fin. Tomado de: W. Fonseca, *Evaluación de un reactor de Lecho Fluidizado en el proceso de pirólisis catalítica usando desecho de caucho de llanta*, Tesis pre. Facultad de ingenierías, Universidad de los Andes, Bogotá D.C, Colombia, 2016, [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1992/13916> [Acceso: abril 16, 2022].

1.2.3.f. Reactor de Caída Libre. Este tipo de reactores de pirólisis están compuestos de un tubo ubicado de forma vertical (reactor tubular), como se observa en la Figura 20, por donde pasa la materia prima, en el cual es degradada por la acción de transferencia de calor, semejante al reactor de cono rotatorio, el reactor de caída libre minimiza la necesidad de un flujo de fluidización ya

que la alimentación de este se hace a través de su cima; los reactores de caída libre han tenido múltiples aplicaciones como la gasificación del carbón [31] [33].

Figura 20.

Esquema de un reactor de caída libre



Nota. Diagrama de proceso de un reactor de caída libre C.J. Ellens, *Design, optimization and evaluation of a free-fall biomass fast pyrolysis reactor and its products*, tesis Mast, Mechanical engineering, University State Iowa, Ames, United States, 2009, [En línea]. Disponible en: <https://dr.lib.iastate.edu/handle/20.500.12876/25302> [Acceso: abril 17, 2022].

1.2.4. Pirólisis de neumáticos fuera de uso

El reciclado de neumáticos fuera de uso, hoy en día se ha convertido en una necesidad, debido a los altos volúmenes de generación. La mayoría de estos residuos en el mundo tiene como destino final los rellenos sanitarios, presentando un peligro latente por su poca degradación que requiere de mínimo 100 años, además de su fácil combustión [34].

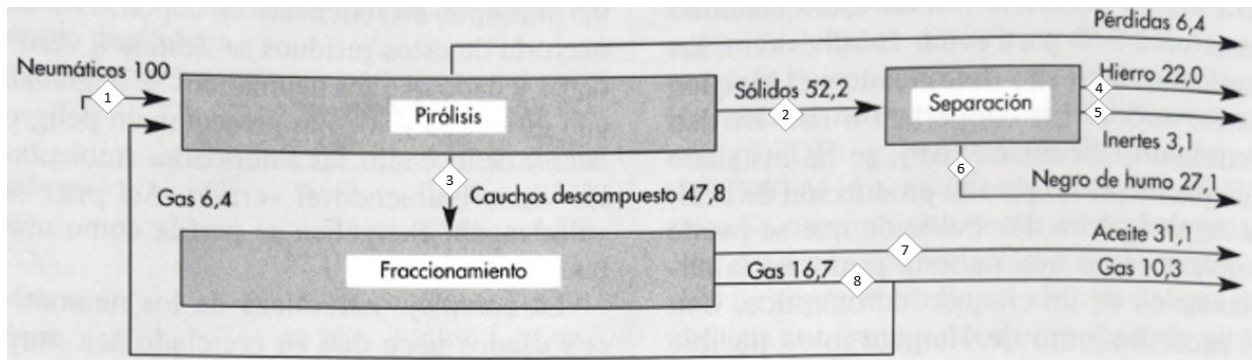
Dentro de las características más problemáticas para su reciclaje se encuentran: 1) son polímeros

químicamente reticulados o entrecruzados, por lo que son materiales que no tienen la capacidad de fundir al aplicar calor para ser remodelados. Además, 2) los neumáticos poseen composiciones muy diversas, con altos contenidos de metales pesados en su composición. De forma alternativa, el proceso de pirólisis de los NFU produce la descomposición de los componentes orgánicos (sus polímeros y cauchos) en productos de menor peso molecular líquidos y gaseosos, útiles como combustibles o materia prima química, y los componentes inorgánicos (composición de acero) permaneciendo de forma inalterable posterior al proceso [27].

Según se observa en la Figura 21, el balance másico propuesto por el autor bajo el esquema de Pirólisis Convencional, indica el tratamiento de neumáticos por la entrada (1), con resultados de transformación por pirólisis en las siguientes cantidades de subproductos: negro de humo de un 27,1% en la salida (6), un fluido condensable fraccionado (3) por: aceite en la salida (7) de 31,1% y gas en la salida (8) de 16,7% [27]. Otros autores resaltan la optimización del proceso como se observa en la Tabla 6, mediante la obtención de mayores cantidades de aceite (hasta un 58,2% para Reactores de Lecho Fijo, Tipo Batch) aplicando variables tecnológicas en la construcción y parámetros de operación de reactores [35], mejorando la viabilidad del proceso de pirólisis para el tratamiento de NFU.

Figura 21.

Balance másico del proceso de pirólisis de neumáticos usados



Nota. Modificada por el autor. Balance masico para procesos de pirólisis. Se denotan cantidades de entrada y salida de materia prima y subproductos según proceso referidas por el autor. Tomado de: X. Elías y E. Velo, *Tratamiento y Valorización energética de Residuos, La Pirólisis*. España: Diaz de Santos, 2005, pp. 477–538, Disponible: Biblioteca Universidad de La Salle [Acceso: noviembre 15, 2022].

Tabla 6.*Productos generados por tipos de reactores de pirólisis*

TIPO DE REACTOR	CONDICIONES DE OPERACIÓN	TEMPERATURA MÁXIMA DE RENDIMIENTO DE ACEITE (°C)	ACEITE (%)	NEGRO DE HUMO (%)	GAS (%)	REFERENCIA
Lecho fijo, Batch	Temperatura 400–700°C	500	40,26	47,88	11,86	[36]
Lecho fijo	Temperatura 375–575°C, 750 g NFU	475	55	36	9	[37]
Lecho fijo	Temperatura 500–1000°C, tasa calentamiento 1200°C/min	500	58	37	5	[38]
Lecho fijo, Batch	Temperatura 450–600°C, Tasa calentamiento 5°C/min, 3 kg NFU	475	58,2	37,3	4,5	[39]
Vacío	Temperatura 450–600°C, Batch, 100 g NFU	550	47,1	36,9	16	[40]
Tornillo rotatorio	Temperatura 600–800°C, Tasa de flujo masico 3.5–8 kg/h	600	48,4	39,9	11,7	[41]
Lecho fluidizado	Temperatura 450–600°C, Tasa de flujo masico 220 g/h, NFU granulado	450	55	42,5	2,5	[42]
Lecho rotatorio	Temperatura 550–680°C, Tasa de flujo masico 4.8 kg/h	550	38,12	49,09	2,39	[43]

Nota. Porcentaje de subproductos generados por pirólisis de acuerdo al tipo de reactor y sus condiciones de operación.

Tomado de: S. Arya *et al*, "Tyre pyrolysis oil as an alternative fuel: A review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 28, pp. 2481-2484, 2020, [En línea].

Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320334519> [Acceso: noviembre 15, 2022].

1.2.5. Variables de proceso

Cualquier variación en las condiciones de operación del proceso, afectan directamente el desempeño y la capacidad para transformar los NFU en subproductos, lo que las convierte en variables que se deben contemplar durante la etapa de diseño con el fin de obtener los resultados y rendimientos propuestos. Su lectura e interpretación durante la etapa de operación de las pruebas piloto, brinda información que permite ajustar el proceso al enfoque deseado para la obtención de los subproductos. Las siguientes variables influyen sobre la operabilidad para el caso de un Reactor de Pirólisis Convencional:

1.2.5.a. Atmosfera de funcionamiento. La hermeticidad, garantiza la ausencia de oxígeno al interior del reactor. El proceso de pirólisis a diferencia de la combustión, es un proceso llevado a cabo totalmente en la ausencia de oxígeno, omitiendo aquellas situaciones donde se permite la combustión como medio para proveer la energía térmica usada en el proceso [26].

1.2.5.b. Tamaño de partícula. A medida que se reduce el tamaño de las partículas, la repartición del calor se realiza de forma más uniforme, favoreciendo la fase líquida por el rápido incremento y absorción de la temperatura que tiene la muestra. Al aumentar el tamaño, el calentamiento es menos uniforme, generando que la pirólisis ocurra a temperaturas inferiores [28]. El tipo de diseño de reactor también influye en el tamaño de muestra requerido [44]. Un mayor tamaño de partícula, favorece el incremento en la producción de negro de humo. La transferencia de calor más rápida a través de una muestra, reduce la cantidad necesaria de aporte de calor, y por ende el tiempo de reacción del proceso de pirólisis [44]. La producción de negro de humo aumenta de 35,15% a 37,15% al incrementar el tamaño de la muestra de 0,5 a 2 mm [45].

1.2.5.c. Humedad del sistema. Algunos sistemas de procesamiento continuo de pirólisis, suelen utilizar corrientes de calor de forma previa al ingreso del reactor con el fin de reducir la humedad de la materia prima, que en todo caso no debe exceder el 10% [26]. Es un factor que reduce el rendimiento, debido al aumento de la demanda energética para vaporizar el agua, debido a que el calor latente de vaporización del agua es mayor al requerido para la fusión, cracking y vaporización de hidrocarburos [46]. A nivel experimental, se puede calcular utilizando la norma ASTM-D3173,

para determinar la humedad en la muestra de análisis de carbón o coque en un horno a temperaturas entre 104 y 110°C, como se indica en la Ecuación 1 [47].

$$\text{Humedad de la muestra (\%)} = \frac{\text{Masa de muestra sin secar (g)} - \text{Masa de muestra después del secado (g)}}{\text{Masa de muestra sin secar (g)}} * 100$$

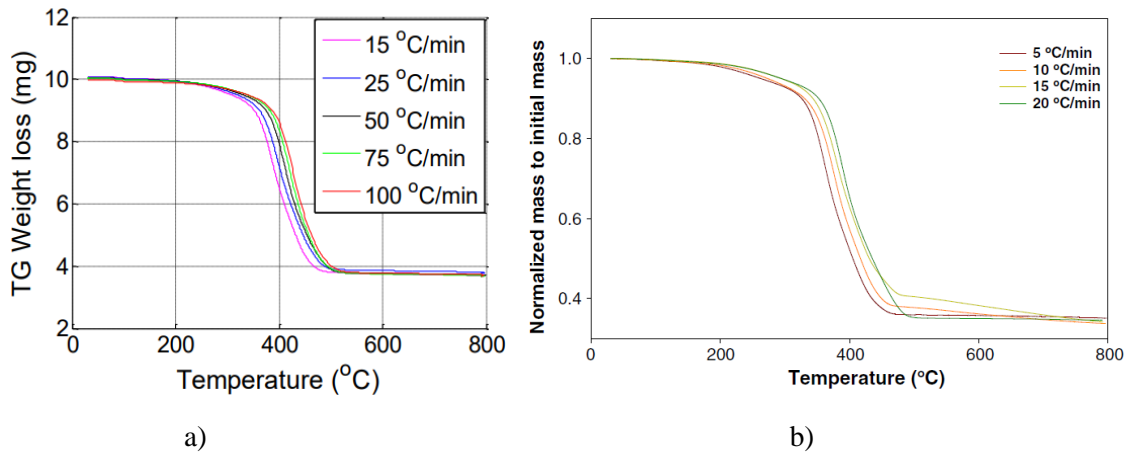
Ecuación (1)

1.2.5.d. Temperatura. Determina la cantidad de entrada de energía y afecta la capacidad del craqueo de los enlaces moleculares, afectando directamente el rendimiento del proceso. A temperaturas muy bajas (300 °C), favorece el subproducto sólido (negro de humo), mientras que al aumentar la temperatura (500 °C), puede disminuir la fracción sólida de un 86% hasta un 41%, en compensación de la fase condensable [48]. De forma general, para el conjunto de diseños de reactores se puede estimar una temperatura de pirólisis de NFU de aproximadamente 500 °C, para favorecer la máxima producción de la fracción líquida (aceite) [49].

Para determinar el rango de temperatura en el cual ocurren las reacciones de pirólisis, se hace uso de un análisis termogravimétrico, que permite establecer e identificar los cambios físicos y químicos que sufren los compuestos, midiendo la masa del material de estudio mientras se varía la temperatura con una tasa de calentamiento constante. Como se puede observar en el análisis termogravimétrico de la Figura 22, la temperatura general para las isotermas donde inicia la pérdida de peso de material sólido coincide en el rango entre los 300 hasta 500 °C, dentro de los cuales se da la transformación en la fracción líquida (aceite) y la fracción de gas en aumento, en la medida que se incremente tanto la temperatura como la tasa de calentamiento [44].

Figura 22.

Termogravimetrías de neumáticos fuera de uso a diferentes tasas de calentamiento



Nota. a) Termogravimetría de pérdida de peso de material sólido en (mg) en función de la temperatura de pirólisis. b) Normalización de la pérdida de masa en masa inicial en función de la temperatura. Tomado de: N. Gao *et al.*, "Tire pyrolysis char: Processes, properties, upgrading and applications," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 93, pp. 101022, 2022, [En Línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128522000314> [Acceso: noviembre 14, 2022].

1.2.5.e. Velocidad de calentamiento. Es una variable importante, ya que afecta la tasa de transferencia de calor y la degradación térmica de pirólisis. Como se observa en la Figura 22, donde se comparan 5 isotermas que varían la velocidad de calentamiento desde una tasa de 5 °C/min hasta 20 °C/min. Como resultado, al incrementar la tasa de calentamiento en el termograma, la curva de pérdida de peso se mueve hacia la región de alta temperatura, indicando así que requiere de mayores temperaturas para incrementar la pérdida de peso [50]. Se ha encontrado que, a mayores velocidades de calentamiento, las temperaturas se conducen más altas, llevando a producir reacciones secundarias que favorecen la fase gaseosa [51].

1.2.5.f. Tiempo de residencia. Depende del tipo de proceso que se realiza. Influye directamente sobre la calidad y composición del producto líquido teniendo en cuenta dos aspectos: 1) el tiempo de residencia de los volátiles condensables de pirólisis; y 2) el tiempo de residencia de la materia prima del reactor. La tasa de flujo de salida del gas del reactor, es inversamente proporcional al tiempo de residencia de los volátiles condensables. Debido a que el gas liviano de pirólisis facilita la salida de los volátiles (condensables), se requiere un mayor tiempo de residencia del gas al

interior del reactor, para lograr la obtención de las tres fracciones (gas, aceite y negro de humo). Así mismo, un tiempo de residencia largo para la materia, favorece la formación de reacciones secundarias, aunque estas se vuelven lentas por debajo de unos 350 °C [51]. La Tabla 5, presentada en el Título 1.2.2, cataloga los tipos de pirólisis acorde al tiempo de residencia. Para pirólisis convencional, un tiempo prolonga de residencia asegura una transformación homogénea de forma ordenada, completa y homogénea. Mantener altas temperaturas permite que los vapores sigan craqueando al interior del reactor [26].

1.2.5.g. Presión de operación. Afecta la calidad de los subproductos de pirólisis, por ende, su incremento genera acumulación de los gases volátiles, además de aumentar el tiempo de residencia. Bajo condiciones de alta presión, los volátiles pueden descomponerse en componentes orgánicos más pequeños debido al craqueo secundario. La disminución de presión, por el contrario, disminuye los tiempos de residencia de los volátiles en la superficie y en los poros de la materia prima (NFU), reduciendo las reacciones de craqueo secundarias, mejorando el rendimiento de la fase líquida (aceite) y el gas, en detrimento del sólido (negro de humo). No obstante, ambos extremos generan costos adicionales en la construcción del reactor y su operación [44].

1.2.5.h. Rendimiento de reacción. Es la cantidad de producción de cada subproducto de pirólisis, expresado en términos de cantidad de masa final de cada subproducto, sobre el total de materia prima (NFU) alimentada en el proceso inicialmente al interior del reactor [27].

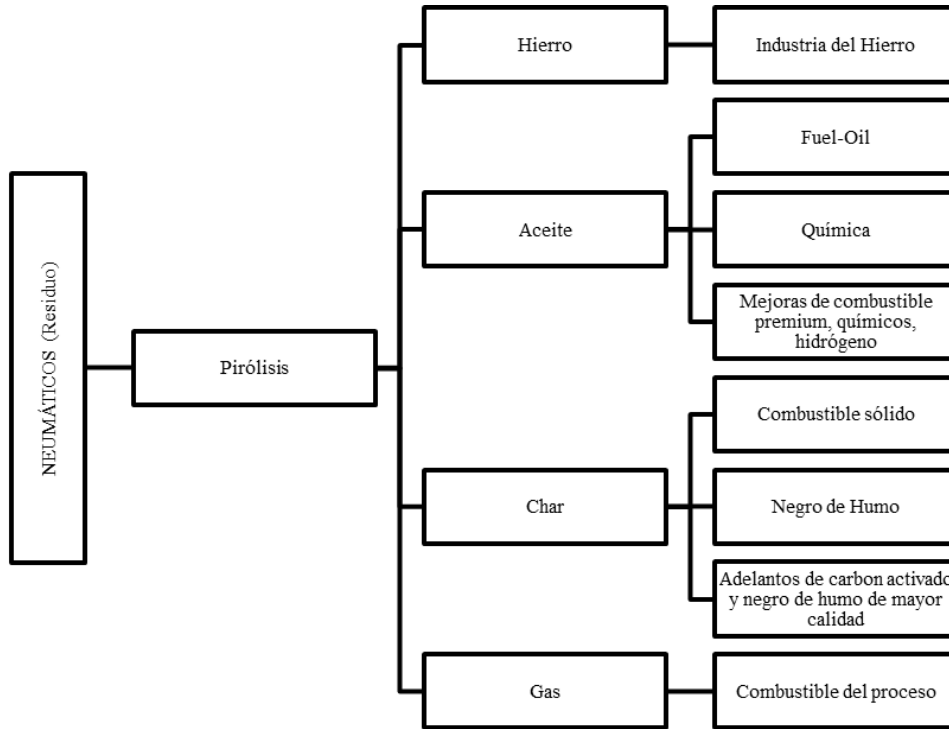
$$\text{Rendimiento de Subproducto (\%)} = \frac{\text{Masa de subproducto (g)}}{\text{Masa inicial de NFU (g)}} \times 100 \quad \text{Ecuación (2)}$$

1.2.6. Productos obtenidos a través del proceso de pirólisis

Los productos obtenidos a partir del proceso de pirólisis a nivel general son productos cuya finalidad es nuevamente ser dispuesto para su respectivo reaprovechamiento energético o uso comercial; estos productos pueden ser clasificados en cuatro tipos como se observa en el esquema de la Figura 23.

Figura 23.

Subproductos generados de pirólisis de NFU y sus potenciales usos industriales



Nota. Categorías de subproductos de pirólisis de NFU y sus transformaciones a nivel industrial como materia prima. Tomado de: P. T. Williams, "Pyrolysis of waste tyres: A review," *Waste Manage.*, vol. 33, (8), pp. 1714-1728, 2013, Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X13002122>. [Acceso: octubre 20, 2022].

A continuación, se describen las características y la composición de los subproductos:

1.2.6.a. Producto sólido. La pirólisis brinda la oportunidad de recuperar sólidos carbonosos de alto contenido de materia orgánica, para el caso de los NFU, corresponde a la fracción carbonosa (negro de humo) y a la fracción inorgánica (materiales añadidos como Si, Zn, Ca y otros metales pesados). El negro de humo es un atractivo, pero a la vez contaminante combustible sólido, con un valor calorífico de 25 MJ/kg a 34 MJ/kg dependiendo del tipo de pirólisis y la materia prima utilizada en la producción de neumáticos [35]. Su rango de producción durante un proceso de pirólisis es del orden de 22 a 49% en peso de negro de humo. El contenido carbonoso en el negro de humo puede llegar hasta un 90% en peso, con altos contenidos de sulfuro entre 1,9 a 2,7% en peso. El

contenido de cenizas es bastante alto, del orden de 8,27 a 15,33%, proveniente de la adición de metales como el Zinc y otros materiales contaminantes en las materias primas de la producción del neumático [51].

1.2.6.b. Producto líquido (condensable). Es el más importante, siendo la mayor cantidad de subproducto de pirólisis que gases no condensables y sólidos, con una gran semejanza al crudo. Su poder calorífico se encuentra en el rango de 39 a 44 MJ/kg, dependiendo de la materia prima procesada de NFU [35]. Tiene un color café/negro oscuro, de viscosidad media entre los aceites con un alto contenido de sulfuros y aromáticos. De composición compleja, encontrando más de 100 compuestos. Para reactores de lecho fluidizado se han reportado fracciones de un 26,77% en peso de alcanos, 42,09% en peso de aromáticos, 26,64% en peso de no hidrocarburos, un 4,04% en peso como asfalto, y entre 0,11-1,54% en peso de azufre (similar a un hidrocarburo ligero) [51]. Existe una amplia caracterización de todos los líquidos pirolíticos obtenidos a distintas temperaturas 300-400-500-600-700 °C, compuestos por mezclas complejas de compuestos orgánicos entre los que se encuentran aromáticos (algunos oxigenados y otros nitrogenados), además de otros en distintas cantidades de hidrocarburos ligeros como: benceno, tolueno, xileno, etc. La concentración de estos incrementa con temperaturas sobre los 500 °C y luego decrece. También una porción de aromatizantes policíclicos tales como: naftalenos, fenantrenos, fluorenos, fenilbencenos [38]. El punto de ignición de los aceites de neumáticos derivados, es generalmente menor que el de los aceites refinados de petróleo, debido a que el aceite de llantas es un aceite no refinado y posee un rango en el punto ebullición de sus fracciones, incluidas las fracciones volátiles. La prueba de su residuo carbonoso, mide la tendencia del aceite a la formación de carbón en condiciones de combustión deficientes, produciendo la coquización en los inyectores de los motores de combustión por aspersion, indicando que los residuos generados de los aceites derivados de los neumáticos son bastante altos (1,78 - 2,2%), lo que puede generar el taponamiento de los inyectores [51].

1.2.6.c. Producto gaseoso. El gas pirolítico, es la fracción correspondiente a la mezcla de gas no condensable que sale del reactor, compuesta por un conjunto de gases de menor peso molecular en el proceso de transferencia de calor [52]. Entre los principales componentes de la fracción gaseosa se encuentran: hidrogeno (H_2), metano (CH_4), etano (C_2H_6), eteno (C_2H_4), propano (C_3H_8),

propeno (C_3H_6), butano (C_4H_{10}), buteno (C_4H_8), butadieno (C_4H_6), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) y sulfuro de hidrógeno (H_2S). El poder calorífico del gas se encuentra en el orden 20 MJ/m^3 hasta 65 MJ/m^3 , dependiendo de factores del proceso de pirólisis como: la temperatura, tasa de calentamiento, tipo de reactor, etc. El gas tiene el suficiente poder energético para realizar la auto regeneración del proceso, mediante su combustión. Algunos autores han realizado pruebas a temperaturas de 450, 750 y 1000°C , mostrando el marcado incremento en la producción de metano, mientras se reduce el dióxido de carbono y eteno durante el proceso de pirólisis [51].

1.2.7. Aplicaciones de los productos de pirólisis

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, los productos de pirólisis de neumáticos, son normalmente utilizados para la recuperación de energía y otros subproductos de las industrias químicas y agrícolas. A continuación, en la Tabla 7, se presentan algunas de las aplicaciones de los mismos:

Tabla 7.

Aplicación de los productos de pirólisis

ESTADO	SÓLIDO	LÍQUIDO	GASEOSO
PRODUCTO	Negro de Humo	Aceites (Hidrocarburos, Aromáticos) Bioaceite, Biopetróleo y Biochar	Gas de pirólisis
APLICACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> • Agente reforzante de productos de plástico y caucho. • Reincorporado en la capa reforzante de los neumáticos. • Pigmento para tintas, coberturas y plásticos. • Agente conductor donde se requiere de baja resistencia eléctrica, como en el recubrimiento de cableados. • Estabilizante de rayos ultravioleta para evitar la degradación del polipropileno. • Toners de impresoras láser. 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Resinas</u>: Resina RF como adhesivo en materiales estructurales de madera, por mayor resistencia a la tracción y flexión. • <u>Bioaceite o combustible</u>: para la combustión en motores diésel duales y turbinas, combustibles de automoción y sintéticos. • <u>Fertilizantes de liberación lenta</u>: para el acondicionamiento de suelos por su reacción rápida con el amoníaco, urea y compuestos asociados a nitrógeno orgánico. • <u>Filtración</u>: Elaboración de filtros de Biochar (diferentes a los de carbón activado) para potabilización de agua. • <u>Recuperación de suelos</u>: Biochar como rectificador de suelos para la absorción de carbono y mejorar las condiciones físicas, retención de agua y calidad microbiana. 	<p>El producto con menor valoración del proceso de pirólisis se atribuye al gas no condensable, sus aplicaciones son limitadas dadas las restringidas opciones que existen para su almacenamiento.</p> <p>En la mayoría de aplicaciones, se utiliza como fuente de generación de calor por combustión directa en el mismo proceso retornando el gas al proceso y de esta manera contribuya con mantener o elevar la temperatura del reactor, esto hace el proceso térmicamente más eficiente y reduce la cantidad de combustibles fósiles que se emplean en este. Normalmente, el gas de pirólisis es frecuentemente ventilado hacia el exterior.</p>
REF.	[53]	[54] [55]	[54]

Nota. Aplicaciones de los productos de pirólisis en las diferentes industrias.

2. PARAMETROS Y DISEÑO CONCEPTUAL DEL REACTOR PILOTO

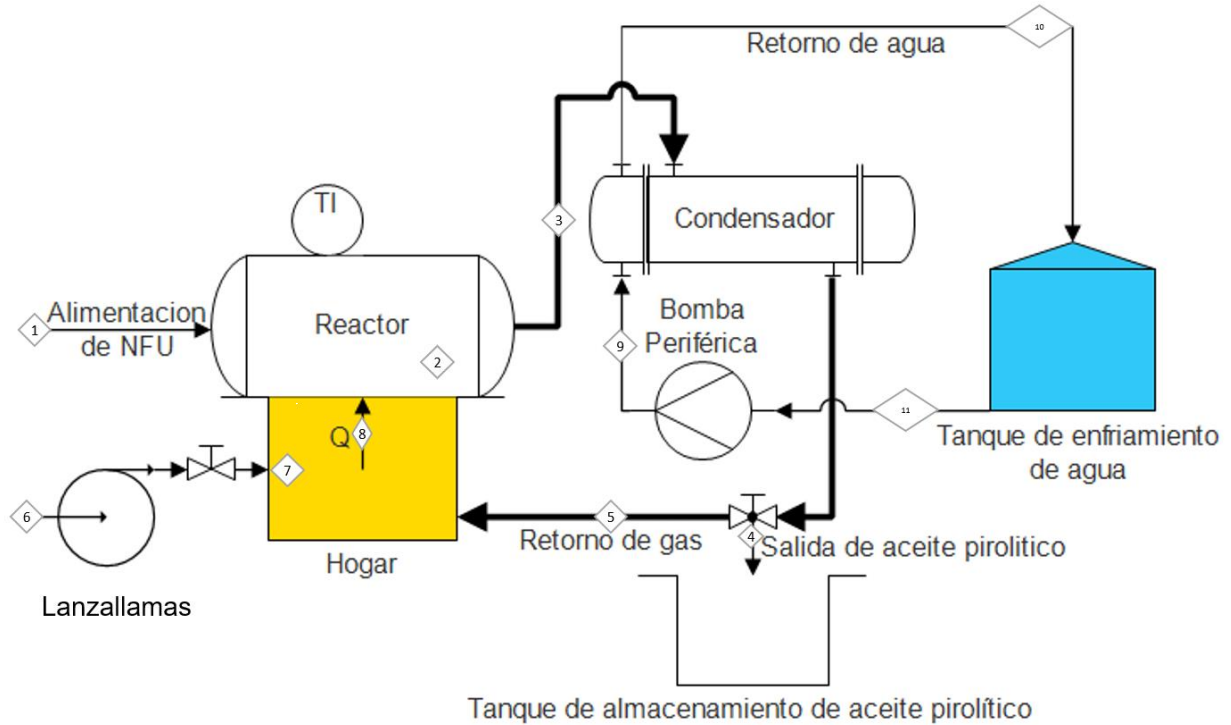
El Equipo Piloto de Pirólisis de neumáticos fuera de uso (NFU) a través del cual se llevará a cabo el proceso de descomposición térmica, consiste en un grupo de sistemas que conforman un equipo que funciona de forma armónica y secuencial, como se puede observar en el diagrama de flujo de la Figura 24, con el propósito de reproducir a escala piloto, la transformación energética de residuos como los NFU, con la finalidad presentar los beneficios y la viabilidad del proceso en la reincorporación como materia prima a nivel industrial de los subproductos del proceso; entre otras, como modelo de confrontación de la teoría con la práctica y su experimentación.

2.1. Diagrama de flujo

La alimentación del proceso descrita en la Figura 24, se realiza de forma manual ingresando los NFU por (1), el reactor realiza el proceso de pirólisis y en su interior queda la fracción de negro de humo, la cual se retira del reactor luego de su enfriamiento (2). La corriente efluente del reactor (3) es homogénea, la cual incluye el gas condensable que sale del reactor, dado que no posee material sólido suspendido. La corriente pasa por el condensador de tubos y coraza, reduciendo la temperatura del gas, condensando la fracción líquida del gas pirolítico (4), permitiendo su almacenamiento en un tanque. La fracción no condensable del gas (5), se recircula para la auto regeneración del proceso, aportando calor al mismo (8). El aporte de calor para iniciar el proceso de pirólisis se hace mediante el suministro de diésel (6) a un quemador, que produce el calor Q (8). El condensador de tubos y coraza emplea agua como fluido de servicio de enfriamiento, que ingresa a temperatura ambiente (9), reduciendo la temperatura del gas condensado de proceso. El agua sale del intercambiador por la corriente (10) a una temperatura más alta en dirección al tanque de enfriamiento de agua, donde posteriormente la bomba periférica recircula el agua del tanque (11) enfriada a temperatura ambiente.

Figura 24.

Diagrama de flujo de equipo piloto propuesto para pirólisis de NFU



Nota. Representación esquemática por Diagrama de Flujo de Equipos Piloto de Pirólisis de NFU.

2.2. Parámetros de proceso

De acuerdo a la teoría consultada en el Título 1.2 correspondiente al proceso de pirólisis, es importante denotar los principales parámetros de funcionamiento del proceso con el fin de determinar las posibles variables a intervenir y monitorear durante el funcionamiento del reactor pirolítico, que conlleven a mostrar los efectos de los cambios realizados en las condiciones operación del equipo, con el objetivo de lograr su graduación y optimización en cada una de las pruebas piloto. Cabe resaltar que las variables de este diseño conceptual se adaptan al funcionamiento de un reactor pirolítico que se propone construir de clasificación “Convencional” con suministro de calor “Alotérmico”, enfocado en la ejecución de “Pruebas Piloto” por ello se enfocan a la siguiente parametrización:

2.2.1. Atmósfera de funcionamiento

Para lograr efectuar el proceso de degradación térmica de pirólisis, el sistema necesariamente requiere de la ausencia de aire, debido a que la concentración de oxígeno en el aire puede alterar el proceso permitiendo la coexistencia de los procesos de gasificación y/o combustión. Considerando lo anterior, el contenedor seleccionado debe cumplir con el requisito de conservar la hermeticidad durante el proceso, además de que las válvulas tanto de entrada como de salida deben aislar completamente el sistema.

2.2.2. Muestras de neumáticos

Acorde a la falta de disponibilidad de equipos para realizar la trituración mecánica de neumáticos en desuso, se debe procesar manualmente en cortes los neumáticos que se acopien del menor tamaño posible (20 a 80 mm), teniendo en cuenta que los factores de rendimiento se verán afectados por el tamaño de partícula que procesa el reactor, ya que para cumplir con los requerimientos de calentamiento rápido, conociendo que el mecanismo de transferencia de calor se da por convección o contacto a través de la pared caliente del reactor, el material particulado debe tener idealmente un tamaño granulado para favorecer mayores rendimientos de la fracción líquida, lo que se considera más conveniente. Considerando lo anterior, la viabilidad para conseguir el tamaño de granulometría ideal eleva los costos de operación.

2.2.3. Humedad del sistema

Teniendo en cuenta las condiciones de almacenamiento en las que se encuentran los neumáticos en desuso que alimentan el proceso, se debe garantizar humedades inferiores al 10% con la utilización de un equipo de secado; debido a su carencia, se debe utilizar un horno para eliminar la humedad en ellas.

2.2.4. Temperatura de funcionamiento

Para pirólisis convencional, se requiere de una velocidad de calentamiento igual o menor a 2 °C/s,

operando a temperaturas mínimas de 300 °C, donde comienza a ocurrir la reducción del grado de polimerización por ruptura de los enlaces de las macromoléculas de carbono, y se lleva hasta temperaturas de funcionamiento inferiores a 500 °C, con el objetivo de obtener el mayor rendimiento en la producción de aceite de pirólisis y sólidos. Por tanto, se debe utilizar un equipo de suministro de calor que tenga la capacidad de elevar la temperatura del reactor al rango deseado por radiación de calor y convección hacia los NFU.

2.2.5. Tiempo de residencia

Este proceso requiere de un tiempo de residencia entre la formación de los vapores de pirólisis y su enfriamiento, que corresponde a tiempos cercanos a los 5 segundos, y para sólidos durante horas al interior del reactor, influyendo en la maximización de la fracción líquida a temperaturas intermedias.

2.2.6. Presión de funcionamiento

Tiene lugar a presión atmosférica, sin embargo, la adición de calor al interior del reactor que cuenta con condiciones de hermeticidad puede provocar un aumento de presión en su interior durante el funcionamiento. Se debe siempre garantizar la continua liberación del gas pirolítico para evitar el incremento de presión, garantizando que el gas fluya siempre hacia la zona de menor presión por el sistema de escape de los gases pirolíticos. En todo caso, debe soportar incrementos medibles máximos de 5 psi por condiciones de seguridad del proceso.

2.3. Diseño Conceptual

Como ya se mencionó en el Título 1.1.5., la condición inicial para el planteamiento de diseño del reactor piloto es la priorización del uso de materiales reutilizables y reciclados, cumpliendo así con el enfoque de economía circular que se asumió; y, que de igual manera se alimente de materia prima desechada (NFU), ratificando así el enfoque de cambio desde una economía de consumo lineal, hacia una economía de consumo sostenible.

Justificando lo anterior, los materiales que se disponen para el diseño del reactor son materiales que se encuentran como desecho de las obras efectuadas en la adecuación de la Universidad de América, entre: Chatarra, mampostería de construcción, madera de construcción y equipos en desuso, entre otros adquiridos en el mercado por su necesidad y adaptabilidad. Por lo anterior, muchos de los parámetros de diseño que se contemplan a continuación, se adaptan a las dimensiones, especificaciones y requerimientos de los materiales a utilizar, pero se verifica y confirma su capacidad de utilización mediante un posterior diseño y cálculo detallado que se tratará en el Título 3.

2.3.1. Sistema Reactor Pirolítico

Dada la complejidad y envergadura de ciertos sistemas constructivos dentro de los “Tipos de Equipos de Pirólisis” denotados en el Título 1.2.3. que se utilizan para procesar otros materiales como carbones, plásticos, maderas, residuos sólidos urbanos, entre otros a escala industrial, y acorde al enfoque de búsqueda de disponibilidad de materiales en desuso para la fabricación del reactor, se propone la construcción a nivel piloto de un reactor de *Pirólisis Convencional* de alimentación por carga individual de forma manual mediante compuerta, la cual debe ser construida y adaptada en un tanque en desuso que cumpla con las condiciones para ser adaptado como Equipo Reactor, con capacidad de procesamiento de hasta 5 kg de muestras de NFU por carga (basado en el volumen del cilindro de refrigerante R134a). Se busca que el sistema de aporte de calor al proceso sea *Alotérmico* (por conducción y radiación del calor), por lo cual debe tener la capacidad de generar la mayor hermeticidad posible, para garantizar la ausencia de oxígeno y acelerar las reacciones de termo reducción, soportar temperaturas de funcionamiento de 500 °C (hasta un máximo de 600°C por seguridad) y presión atmosférica de funcionamiento (+5 psi de rango de seguridad) dentro del reactor, sin permitir la combustión de los NFU, evitando la fuga gases pirolíticos hacia el exterior.

2.3.1.a. Compuerta de Alimentación. De acuerdo con lo anterior, para el diseño del Sistema Reactor, se selecciona un cilindro en desuso de refrigerante R134a de las siguientes dimensiones y especificaciones: Dimensiones: 340 mm de longitud x 250 mm de diámetro, Peso: 2,52 kg, Clasificación Industrial: II (Baja presión - presión máxima de trabajo 500 psi), Calibre: 1,5 mm de

espesor, Material: Acero al carbón DC01, Punto de Fusión del material: 1516 °C, Coeficiente Conductividad Térmica a 600 °C: $35 \text{ W/m} \cdot \text{°C}$; como el que se observa en la imagen de la Figura 25, los cuales disponen en la zona industrial de Ricaurte en la ciudad de Bogotá, específicamente en las industrias de refrigeración y su ciclo de vida tiene un único uso de carga y posterior desecho.

Previo a su intervención, al cilindro se le realiza despresurización y limpieza interna para eliminar cualquier residuo que este pueda contener, garantizando las condiciones óptimas, para su posterior adecuación técnica y asegurando su funcionamiento como Reactor Piloto de Pirólisis.

Figura 25.

Cilindro Seleccionado para fabricación de reactor pirolítico



Nota. Cilindro de Gas Refrigerante R134a usado comercialmente, estos son desechados luego del primer uso. Tomado de: Made in China, [En línea]. Disponible: https://es.made-in-china.com/co_hallyparts/product_Freon-Gas-Pure-R134A-Refrigerant-Gas-in-30-Lb-Cylinder_ruugugnyg.html [Acceso: noviembre 22, 2022].

Se debe modificar la estructura inicial del cilindro de refrigerante, adaptando un sistema de

alimentación por carga manual, utilizando materiales reutilizados y seleccionados como: Niple de acero denominación ASTM A53 galvanizado de: diámetro nominal 76,2 mm (3”), espesor 5,6844 mm, Schedule 40, rosca NPT (según Tabla 8), Punto de Fusión del material: 1380 – 1514 °C, Coeficiente Conductividad Térmica: 21 W/m·°C; Tapón de acero galvanizado denominación ASTM A53 de: diámetro nominal 76,2 mm (3”), rosca NPT. Lo anterior plantea una fácil adaptabilidad al cilindro y permite la introducción y retiro de material para procesar (NFU) a través de este, garantizando mediante la rosca la hermeticidad del sistema a la hora de cerrarlo para iniciar el procesamiento de NFU, según como se observa en la Figura 26.

Figura 26.

Compuerta de alimentación roscada propuesta



Nota. Modelado en 3D de compuerta de alimentación Tomado de: Software SolidEdge 2022.

Tabla 8.*Dimensiones de tubos de acero galvanizado por diámetro nominal y schedule*

TAMAÑO NOMINAL DEL TUBO (NPS)		DIÁMETRO EXTERIOR (pulg)	TUBOS CÉDULA - PIPE SCHEDULE							
NPS	DN	OD	SCH 5s	SCH 10s	SCH 40s	SCH STD	SCH 40	SCH 80s	SCH XS	SCH 80
1/8	6	0,405		1,240	0,068	0,068	0,068	0,095	0,095	0,095
1/4	8	0,540		1,650	0,088	0,088	0,088	0,119	0,119	0,119
3/8	10	0,675		1,650	0,091	0,091	0,091	0,126	0,126	0,126
1/2	15	0,840	0,065	2,110	0,109	0,109	0,109	0,147	0,147	0,147
3/4	20	1,050	0,065	2,110	0,113	0,113	0,113	0,154	0,154	0,154
1	25	1,315	0,065	2,770	0,133	0,133	0,133	0,179	0,179	0,179
1 1/4	32	1,660	0,065	2,770	0,140	0,140	0,140	0,191	0,191	0,191
1 1/2	40	1,900	0,065	2,770	0,145	0,145	0,145	0,200	0,200	0,200
2	50	2,375	0,065	2,770	0,154	0,154	0,154	0,218	0,218	0,218
2 1/2	65	2,875	0,083	3,050	0,203	0,203	0,203	0,276	0,276	0,276
3	80	3,500	0,083	3,050	0,216	0,216	0,216	0,300	0,300	0,300

Nota. Selección de tuberías galvanizadas por diámetro nominal a nivel comercial. Tomado de: Comercializador Octal Stell, [En Línea]. Disponible: <https://www.octalacero.com/dimensiones-de-tubos-cedula-40-80> [Acceso: noviembre 24, 2022].

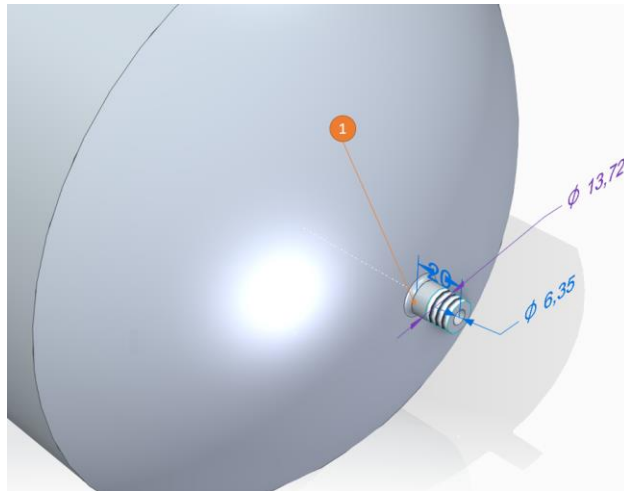
2.3.1.b. Sistema de Escape Gases Pirolíticos. Una vez inicia el proceso de pirólisis de NFU al interior del reactor, el gas condensado producto de las altas temperaturas en ausencia de oxígeno durante el tiempo de residencia al interior del reactor (Gases: 5 segundos para Pirólisis Convencional), comienza su escape hacia una zona de menor presión fuera del interior del reactor. El gas pirolítico a temperaturas desde los 150 hasta 220 °C en la salida del reactor, posee las fracciones líquida y gaseosa que deberán ser enfriadas más adelante en un Intercambiador de Calor de Tubos y Coraza (Proyecto de construcción paralelo), para así reducir la temperatura de la corriente de gas pirolítico y posteriormente condensar la mayor cantidad de líquido (aceite de pirólisis) de la fracción de gas (gas condensable de pirólisis).

De acuerdo a lo anterior, para el Sistema de Escape de los Gases Pirolíticos y acorde a la disponibilidad de los elementos y accesorios obtenidos de equipos en desuso disponibles en la Universidad de América, se plantea modificar la válvula de salida del cilindro y se adapte un Niple galvanizado de las siguientes características: diámetro nominal 6,3 mm (1/4") por 20 mm de

longitud, espesor 3,022 mm, Schedule 80 (especificaciones según Tabla 8); para conectar y extender el conducto de salida de los gases pirolíticos y convertir la tubería a tamaño comercial y rosca NPT como las nombradas en la Tabla 8, como se plantea en la Figura 27, facilitando la conexión de otros accesorios en acero galvanizado disponibles, como los numerados en la Figura 28. Esta zona se encuentra expuesta a transferencia de calor por convección (paredes del reactor) y radiación (del quemador planteado), siendo necesario adaptar accesorios de material resistente a las altas temperaturas y ante los posibles incrementos de presión que se generen durante el funcionamiento. Para identificar las partes de la Figura 27 y Figura 28, la Tabla 18 del Título 4.1.2, presenta las características de los accesorios comerciales propuestos.

Figura 27.

Zona de escape de gases pirolíticos propuesto



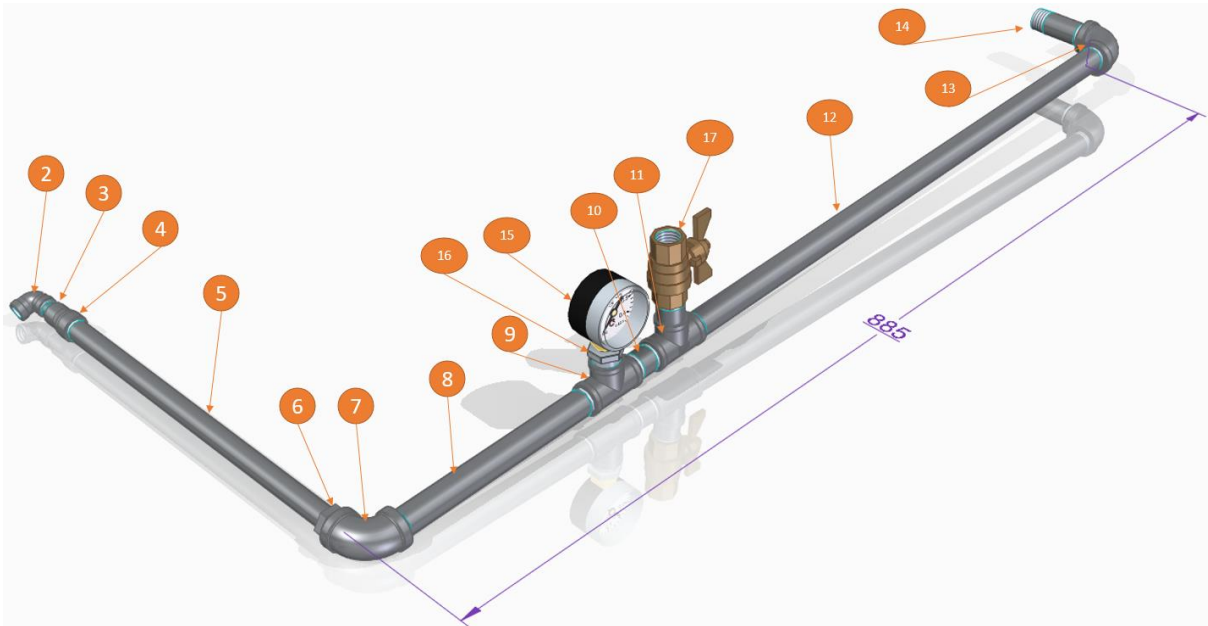
Nota. Modelado en 3D de ducto de salida de gases.

Tomado de: Software SolidEdge 2022.

En adición, se debe realizar la conexión del escape para conducir los gases de pirólisis desde el reactor hasta el punto de conexión del intercambiador de calor, haciendo uso de accesorios de acero galvanizado, que deben contar con una distancia de 885 mm entre ambos puntos para acoplar correctamente el sistema. Se deben conducir por fuera de la zona de transferencia de calor del quemador, siguiendo la secuencia que se plantea en la Figura 28, según el ensamble propuesto en el plano del Anexo B – Ensamble Sistema de Escape de Gases.

Figura 28.

Adaptación del sistema de escape de gases pirólíticos propuesto



Nota. Modelado en 3D de distribución de accesorios para conducir los gases de pirólisis hacia el intercambiador de calor. Tomado de: Software SolidEdge 2022.

Para la medición de parámetros de proceso, se requiere de los siguientes componentes:

- **Temperatura:** Para monitorear la pirólisis de NFU, es necesaria la medición constante de la temperatura que se alcanza al interior del reactor, con el fin de determinar su incremento y así poder dosificar la aportación de calor al sistema para que este alcance un óptimo funcionamiento mayor a los 300 °C (temperatura a la que inicia el pirólisis de NFU) y que no supere los 550 °C. En consecuencia, se requiere adquirir en el mercado un Termómetro Análogo para adaptar en el cilindro que cuente con: Rango de medición: 0 - 550 °C, Conexión: trasera-roscada; de tal forma que a través de este se pueda monitorear la temperatura de trabajo interna del reactor constantemente y se garantice la hermeticidad del reactor en la zona instalada, según se observa en la Figura 29.

Figura 29.

Adaptación sensor de temperatura propuesto



Nota. Vista frontal y superior de adaptación. Tomado de: Software SolidEdge 2022.

- **Presión:** Debido a las altas temperaturas al interior del reactor pirólítico a las que se someten los NFU y teniendo en cuenta la aplicación de medidas de control y seguridad, se hace necesario monitorear la presión de salida del reactor de pirólisis constantemente. Considerando que la pirólisis del presente proyecto se realiza a presión atmosférica, la lectura del manómetro de presión no debe superar en ningún caso los +5 psi, recordando que los materiales utilizados para la construcción son reutilizables y pueden carecer de condiciones de diseño estipuladas en su primer ciclo de uso. Para ello, se debe adquirir un Manómetro de Presión de glicerina de las siguientes especificaciones: Conexión: inferior-roscada, Material: acero o cobre, Rango de lectura: 0 – 10 psi, como se observa en la Figura 30.

Figura 30.

Adaptación manómetro de presión propuesto

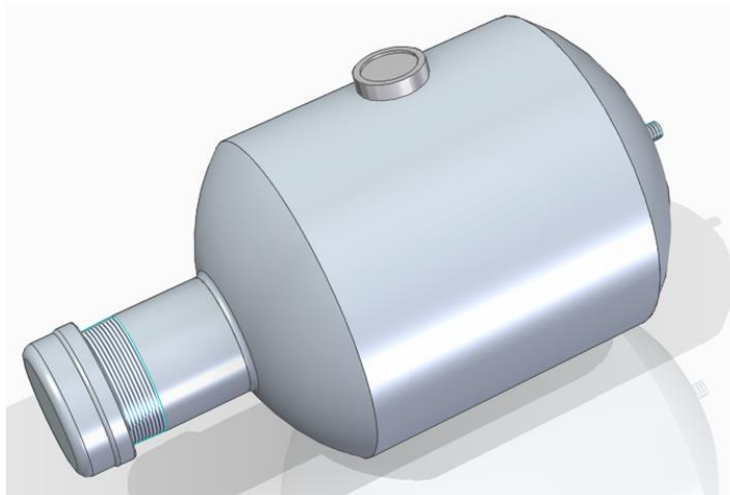


Nota. Instalación de manómetro de presión. Tomado de: Software SolidEdge 2022.

De acuerdo a las modificaciones descritas anteriormente y la incorporación de los accesorios descritos, en la imagen de la Figura 31, se propone el diseño completo del reactor pirólítico.

Figura 31.

Sistema reactor pirólítico propuesto



Nota. Modelado en 3D de ensamble de Cilindro Reactor Pirólítico.

Tomado de: Software SolidEdge 2022.

2.3.2. Sistema de Transferencia de Calor

Teniendo en cuenta el proceso de pirólisis convencional para NFU que se propone diseñar y construir, se requiere de aporte de calor de forma indirecta (*Sistema Alotérmico*). Este proceso requiere de temperaturas que no superen los 600 °C, pero que a su vez garantice los 300 °C mínimos sobre los cuales inicia la descomposición térmica de los neumáticos, asegurando que las moléculas complejas de cadena larga se transformen en otras sencillas mucho más manejables que se convierten en los subproductos de pirólisis [26].

Para lo anterior, se selecciona una Bomba de Combustible (Referencia A2VA-7116) adaptada a un quemador que sirve como impulsor del diésel, la cual proviene de una caldera que se encuentra en desuso en las instalaciones de la Universidad de América; cuenta con las siguientes medidas según manual del fabricante de acuerdo a la Figura 32 y las siguientes especificaciones técnicas: Velocidad de giro: 3450 RPM, Capacidad de Bombeo: 3 gph; consignadas en la Tabla 9. El quemador impulsa el diésel vaporizándolo dentro del “Hogar” bajo el reactor, para así generar la

flama que a través del calor generado por radiación en la combustión del diésel y su posterior transmisión por conducción a través de las paredes del reactor (Cilindro de Refrigerante R134a), permite al reactor alcanzar la temperatura de funcionamiento del sistema y asegura la descomposición térmica de los NFU.

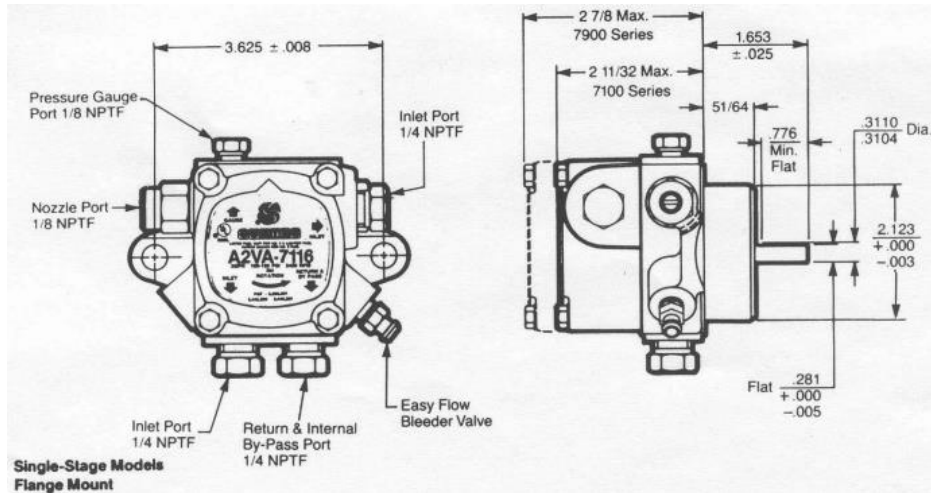
Las medidas correspondientes del quemador en conjunto (Bomba de Combustible y Conjunto Aspersor de Diésel) posee las siguientes medidas: Ancho: 425 mm, Alto: 220 mm y Profundidad: 154 mm.

El combustible que se plantea utilizar para el proceso de transferencia de calor es diésel, dando relevancia a la importancia de la seguridad y manejo adecuado para las pruebas, debido a que este no se vaporiza como la gasolina y evita la generación de una atmosfera explosiva, adicional que este posee una buena capacidad de generación de calor de 5,990 MJ/bbl [56], para alcanzar así la temperatura deseada del proceso.

Para regular la temperatura del Reactor Pirolítico, y así mismo, controlar el volumen y generación de la flama, se selecciona una válvula de bola manual de 1/4" de acero galvanizado para dosificar la cantidad de diésel que ingresa al aspersor.

Figura 32.

Dimensiones y disposición de bomba de combustible referencia A2VA-7116



Nota. Plano de medidas del fabricante Suntec para bomba de combustible referencia A2VA-7116 utilizada en el aspersor de Diesel. Tomado de: Suntec Performance Proven Fuel Units and Valves Manual, [En Línea]. Disponible: <https://inspectapedia.com/heat/Suntec-Fuel-Unit-Models-Specifications.pdf> [Acceso: septiembre 20, 2022].

Tabla 9.

Especificaciones técnicas bomba combustible referencia A2VA-7116

MODEL NUMBER	RPM	ROTATION	NOZZEL PORT LOCATION	STRAINER & NOZZEL RATING AT 100 psi
A2VA-7116	3450	R.H.	R.H.	3 gph
A2VB-7117	3450	R.H.	L.H.	3 gph

Nota. Especificaciones técnicas de trabajo del fabricante Suntec para bomba de combustible Referencia A2VA-7116 utilizada en el aspersor de Diesel. Tomado de: Suntec Performance Proven Fuel Units and Valves Manual, [En Línea]. Disponible: <https://inspectapedia.com/heat/Suntec-Fuel-Unit-Models-Specifications.pdf> [Acceso: septiembre 20, 2022].

2.3.3. Sistema de Conservación de Calor – Hogar

Con el objetivo de mantener y conservar el calor generado por el quemador diésel, se debe contemplar la fabricación de una estructura que encierre el calor generado por la flama y la dirija

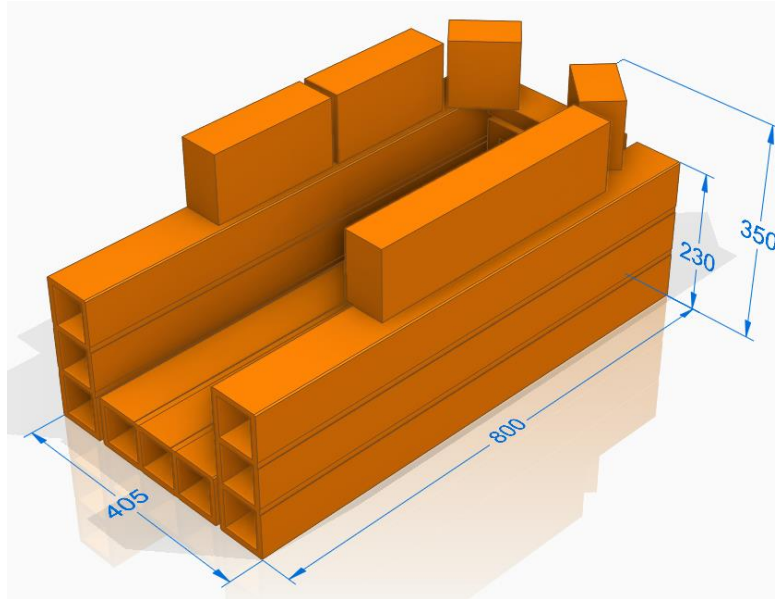
directamente al Reactor de Pirólisis, para alcanzar la temperatura de trabajo de hasta 600 °C, sin que el calor se disipe, reduciendo así la pérdida de energía del sistema y garantizando la suficiente capacidad de oxigenación para la flama y el escape de los gases de combustión.

Para esta etapa, se contempla la construcción de una estructura con ladrillo y cemento, que soporte las altas temperaturas en analogía a la construcción de un horno de ladrillo. Teniendo en cuenta lo anterior, se hace necesaria la adquisición de bloques denominados en el mercado como “Bloquelón” (Medidas: 800 mm x 230 mm x 80 mm, Conductividad térmica: 0,8 W/m·°C) compuestos de arcilla cocida que cuentan con el tamaño necesario para hacer una estructura cerrada, además que por su tamaño requieren de una menor cantidad de piezas y uniones de mortero para pega, reduciendo así la posibilidad de fractura del material producto de las altas temperaturas de operación, y un coeficiente de conductividad térmica bajo, evitando que la temperatura se disipe. Adicionalmente para completar las medidas necesarias de la estructura que igualmente soporte las altas temperaturas, se requiere de ladrillos convencionales de arcilla cocida (Medidas: 210 mm x 65 mm x 110 mm), para que el reactor pirolítico alcance a formar un cajón bajo su estructura donde el calor se conserve, y así mismo la estructura contenga en la parte superior al Reactor de Pirólisis.

El diseño de la estructura descrita haciendo uso de los materiales nombrados anteriormente se puede contemplar en la imagen de la Figura 33, donde se dimensiona el tamaño final del “Hogar” propuesto y como este se adapta a las dimensiones para que encaje el reactor pirolítico.

Figura 33.

Construcción del sistema de conservación de calor propuesto



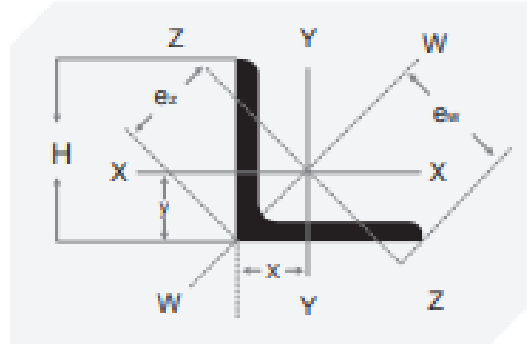
Nota. Modelado en 3D de ensamble de mampostería para conservar el calor e instalar el reactor. Tomado de: Software SolidEdge 2022.

2.3.4. Sistema de Estructura – Bastidor

Teniendo en cuenta la construcción del Reactor Piloto de Pirólisis del presente proyecto junto con el proyecto de “*Diseño y construcción de un condensador para un reactor piloto de pirólisis*” desarrollado en paralelo, se contempla el diseño y construcción de una estructura que soporte y sitúe el conjunto equipos, de tal forma que se haga más fácil su transporte y ensamble; para esto se seleccionan materiales de desecho producto de las obras de acondicionamiento y renovación de la Universidad de América, se acopian retazos sobrantes de perfiles de acero estructural denominación ASTM A36 laminados en caliente que cuentan con una sección transversal con forma de L de lados iguales; se propone el uso de estos para la construcción de la estructura, ya que estos poseen propiedades como: durabilidad, acabado liso y uniforme, resistencia y fácil soldabilidad. Los perfiles en L acopiados cuentan con dimensiones comerciales enunciados en la Figura 34 y registradas en la Tabla 10 como: Longitud de ala “H” de 31.7 mm (1 ¼”), espesor de 6.35 mm (¼”), radio “r1” de 4.7 mm (9/50”).

Figura 34.

Denominación de medidas de perfil en L



Nota. Gráfico de representación de dimensiones de perfiles en L. Tomado de: Agofer DITH Group, [En Línea]. Disponible: <https://www.agofer.com.co/productos-angulos-de-acero> [Acceso: noviembre 18, 2022].

Tabla 10.

Dimensiones comerciales de perfil en L

DESIGNACIÓN	DIMENSIONES			DISTANCIAS DE LOS EJES			ÁREA	PESO	PROPIEDADES ELÁSTICAS							
	ALTURA = ALA		RADIOS	LOS EJES					EJE X - X = Y - Y			EJE W - W		EJE Z - Z		
	h	s	r1	x = y	W	Z			I _x	S _x	r _x	I _w	r _w	I _z	S _z	r _z
mm	mm	mm	cm	cm	cm	cm ²	kg/mt	cm ⁴	cm ³	cm	cm ⁴	cm	cm ⁴	cm ³	cm	
L 1/4" X 1"	19,05	6,35	3,220	0,86	1,79	1,21	2,80	2,22	1,54	0,92	0,74	2,49	0,91	0,83	0,69	0,48
L 1/4" X 1 1/4"	31,75	6,35	4,70	1,02	2,24	1,44	3,72	2,86	3,21	1,49	0,94	4,99	1,16	1,24	0,86	0,60
L 1/4" X 1 1/2"	38,10	6,35	4,70	1,19	2,69	1,68	4,40	3,48	5,83	2,20	1,14	8,74	1,42	2,49	1,48	0,73

Nota. Tabla de dimensiones y propiedades de perfiles comerciales en L de caras iguales. Tomado de: Agofer DITH Group, [En Línea]. Disponible: <https://www.agofer.com.co/productos-angulos-de-acero> [Acceso: noviembre 18, 2022].

Haciendo uso de los perfiles de acero en “L” para el diseño y ensamble de la estructura, se plantea la construcción de un marco, para lo cual se propone cortar y soldar los perfiles fabricando una cama de 2000 mm de longitud por 730 mm de ancho, teniendo en cuenta la dimensión y peso de los componentes en conjunto que esta albergará consignados en la Tabla 11, para lo cual se calcula y confirma la capacidad de carga de la estructura teniendo en cuenta la sección de la viga más crítica como se observará en el Título 3.1.

Tabla 11.*Dimensiones y pesos de componentes que integra el Equipo de Pirólisis*

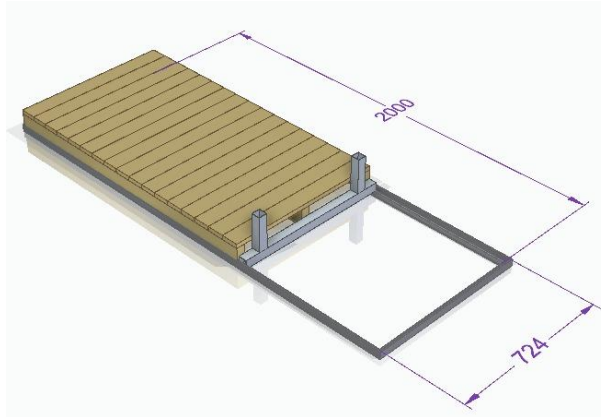
COMPONENTE	LONGITUD (mm)	ANCHO (mm)	ALTURA (mm)	PESO (kg)
Reactor de Pirólisis	467	250	250	4.1
Estiba de madera	1330	720	10	27.2
Sistema de Conservación de Calor–Hogar	800	400	350	73.4
Quemador de diésel	425	154	220	13.5
Estructura-Bastidor (incluye ruedas)	2000	730	31.7	22
Tablas del sistema de enfriamiento	629	72	15	4
Accesorios de tubería galvanizada + sensores	-	-	-	4.5
Diésel (1.5 gal)	-	-	-	4.8
Carga de neumáticos	-	-	-	5
Intercambiador de Calor + Mangueras	147	715	147	9.92
Sistema de Enfriamiento de Agua (tanque de agua + bomba periférica)	300	300	400	5.6
Agua del sistema de enfriamiento (5 gal)	-	-	-	18.93
PESO TOTAL				192.95

Nota. Esta tabla consigna las dimensiones y los pesos por componente del Equipo Piloto a construir.

Los últimos 3 componentes mencionados en la Tabla 11., corresponden al proyecto de Tesis denominado: “*Diseño y construcción de un condensador para un reactor piloto de pirólisis*” que se contienen dentro de la misma estructura de soporte.

Figura 35.

Construcción marco de estructura propuesto



Nota. Modelado en 3D de ensamble de estructura soporte del reactor. Tomado de: Software SolidEdge 2022.

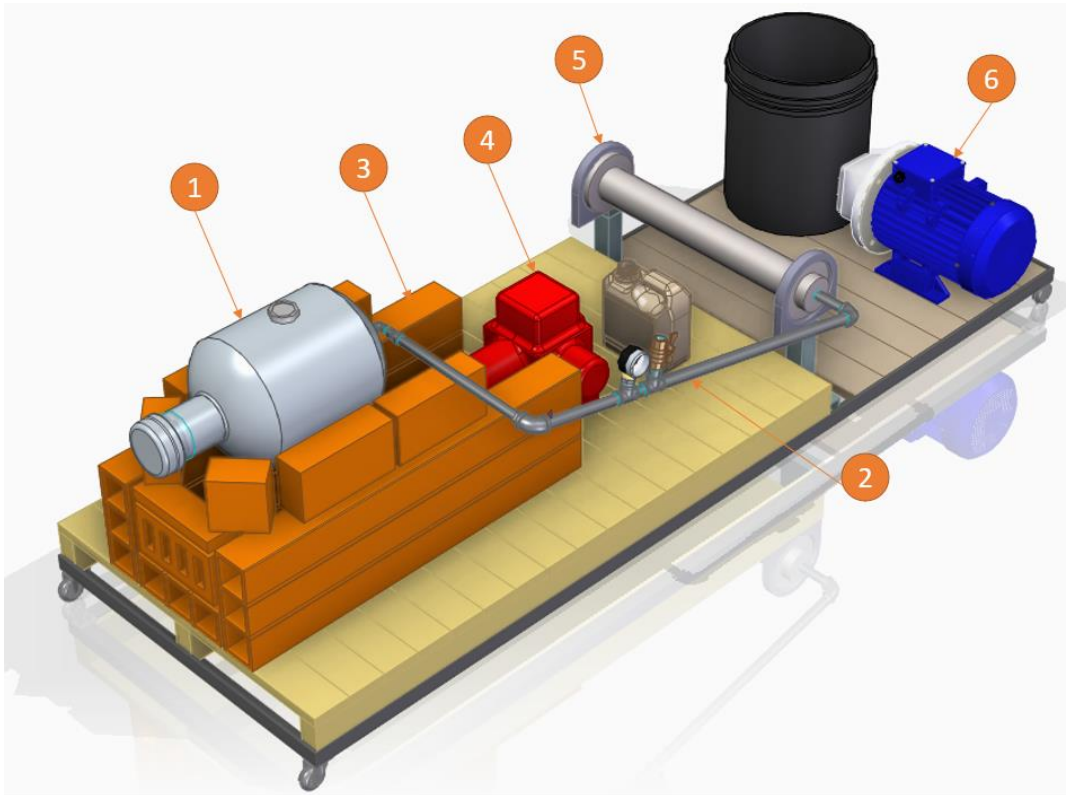
En adición a lo anterior, como bastidores de la estructura, se hará uso de 4 ruedas adquiridas en el mercado que resistan el peso de la estructura contemplando cuatro puntos de apoyo; se propone acoplar estas cuatro ruedas a la estructura de acero a través de tornillos comerciales de cabeza redonda de: diámetro: 4.76 mm, longitud: 2.54 mm, paso: 1 mm, rosca: UNC (3/16" – 24 UNC x 0.5"); con su respectiva tuerca y arandela, esto facilitara el movimiento de todo el sistema acoplado para su fácil transporte sobre superficies planas.

2.3.5. Ensamble

Finalmente, para reunir y distribuir los sistemas de funcionamiento del Reactor de Pirolisis, se realiza el ensamble de los distintos sistemas como se observa en la Figura 36, donde se utiliza la numeración para cada uno así: 1) Reactor de pirolisis, 2) Sistema de escape de gases, 3) Sistema de conservación de calor-hogar, 4) Quemador de diésel, 5) Intercambiador de calor y 6) Sistema circulación y enfriamiento de agua.

Figura 36.

Ensamble del conjunto de sistemas del equipo propuesto



Nota. Modelado en 3D de ensamble de sistemas del reactor en la estructura soporte. Tomado de: Software SolidEdge 2022.

2.3.6. Espacio disponible

Teniendo en cuenta las condiciones de operabilidad del equipo, se requiere de un espacio abierto para su funcionamiento, en función de permitir la correcta ventilación para la transferencia de calor por combustión del diésel del sistema y teniendo en cuenta las condiciones de seguridad ambiental, dadas las emisiones de gases tóxicos producto de la descomposición pirolítica de los neumáticos fuera de uso. Adicionalmente, el área de ocupación del equipo y los desplazamientos que se deben hacer para operarlo requieren de un espacio disponible mínimo de 3 metros de ancho por 3 metros de largo ($9 m^2$).

3. DISEÑO DETALLADO

3.1. Análisis de diseño Sistema Estructura – Bastidor

Para el cálculo y análisis del sistema Estructura – Bastidor se tienen en cuenta distintos factores definidos por los componentes que integran el equipo incluyendo la misma estructura. Dichos factores son determinantes para el cálculo y diseño de una estructura que pueda soportar las cargas a las que se somete, agrupando en un solo espacio el conjunto de sistemas que conforman el equipo.

El peso de los sistemas que la estructura debe soportar se registra en la Tabla 11 y corresponden a los siguientes componentes: cilindro reactor, sistema de conservación de calor–hogar, quemador de diésel, intercambiador de calor de tubos y coraza, sistema y tanque de enfriamiento de agua, componentes de soporte (estiba y tablas de madera), accesorios, y materia prima (NFU).

3.1.1. Análisis de viga

Se realiza el análisis de la viga que soporta las cargas más críticas en la sección de mayor peso y longitud (2000 mm), teniendo en cuenta el perfil de acero en L denominación ASTM A36 seleccionado. Se registran las propiedades físicas y mecánicas en la Tabla 12, con el fin de calcular la capacidad de carga y su posible utilización durante la construcción. Se determinan los esfuerzos a los que está sometida, su deformación, momentos flectores y la deflexión que esta pueda resistir.

Tabla 12.*Propiedades físicas y mecánicas del perfil de acero en L*

PERFIL EN L - ACERO ASTM A36	
<i>Longitud de ala</i>	31.7 mm (1 ¼")
<i>Espesor</i>	6.35 mm (¼")
<i>Resistencia a la tracción</i> <i>(Esfuerzo a la tensión)</i>	400 – 550 MPa 41 – 56 kg/mm ² 58 – 80 ksi
<i>Limite elástico mínimo</i> <i>(Esfuerzo de fluencia)</i>	23 – 25 kg/mm ² 250 MPa 36 ksi
<i>Módulo de elasticidad</i>	200 GPa 29 x 10 ³ ksi
<i>Módulo de corte</i>	79.3 GPa 11.5 x 10 ³ ksi

Nota. Tabla de propiedades del perfil alar en L en acero ASTM A36.

A continuación, se realiza un cálculo detallado considerando los factores, cargas puntuales, cargas distribuidas, apoyos, módulo de sección y la flexión de la viga. Los cálculos de conversión peso-fuerza de cada carga situada sobre la viga, se registran en la Tabla 13, a continuación:

Tabla 13.*Fuerza ejercida por cada componente sobre la estructura según su peso*

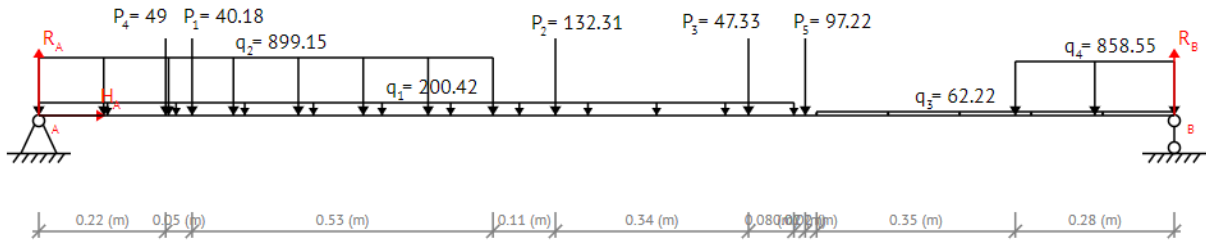
EQUIPO	TIPO DE CARGA (P_x o q_x)	DISTANCIA	
		PUNTO A (m) - LONG CARGA DISTRIBUIDA (m)	CARGA (N – N/m)
Estiba de madera	Distribuida q_1	0 m – 1.33 m	$\frac{27.2 \text{ Kg} \cdot \frac{9.8m}{s^2}}{1.33m} = 200.42 \text{ N/m}$
Reactor	Puntual P_1	0.22 m	$\left(4.1 \text{ Kg} \cdot \frac{9.8m}{s^2}\right) = 40.18 \text{ N}$
Hogar	Distribuida q_2	0 m – 0.8 m	$\frac{73.4 \text{ Kg} \cdot \frac{9.8M}{s^2}}{0.8m} = 899.15 \text{ N/m}$
Quemador	Puntual P_2	0.91 m	$13.5 \text{ Kg} \cdot \frac{9.8m}{s^2} = 132.31 \text{ N}$
Diesel (1.5 gal)	Puntual P_3	1.20 m	$4.83 \text{ Kg} \cdot \frac{9.8m}{s^2} = 47.33 \text{ N}$
Neumáticos	Puntual P_4	0.27 m	$5 \text{ Kg} \cdot \frac{9.8m}{s^2} = 49 \text{ N}$
Condensador	Puntual P_5	1.35 m	$9.92 \text{ Kg} \cdot \frac{9.8m}{s^2} = 97.22 \text{ N}$
Tablas de madera	Distribuida q_3	1.37 m – 0.63 m	$\frac{4 \text{ Kg} \cdot \frac{9.8M}{s^2}}{0.63} = 62.22 \text{ N/m}$
Sistema de enfriamiento (Tanque, agua 5 gal, bomba hidráulica)	Distribuida q_4	1.72 m – 0.28 m	$\frac{(18.93 \text{ kg} + 5.6 \text{ Kg}) \cdot \frac{9.8m}{s^2}}{0.28m} = 858.55 \text{ N/m}$

Nota. En la tabla se muestran las fuerzas y cargas ejercidas sobre la estructura por componente y la distancia o punto donde se distribuye.

En la Figura 37 se aprecian el diagrama de cuerpo libre indicando las cargas distribuidas y puntuales, a lo largo de los 2 metros correspondientes a la longitud de la viga, de donde determinaremos lo siguiente:

Figura 37.

Diagrama de cuerpo libre



Nota. Distribución de cargas puntuales y distribuidas en la longitud de la viga. Tomado de: Utilizando la herramienta en BeamGuru, [En Línea]. Disponible: <https://beamguru.com/online/beam-calculator/>

- **Determinación de las cargas puntuales:** Para las cargas distribuidas q_1 , q_2 , q_3 y q_4 , se calcula su valor como carga puntual a lo largo de la viga utilizando la ecuación:

$$q_x = W_x \cdot L_x \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

F - Fuerza de la carga puntual (N)

W - Magnitud de la carga distribuida (N/m)

L - Distancia de la carga distribuida (m)

$$q_1 = W_1 \cdot L_{q1}$$

$$q_2 = W_2 \cdot L_{q2}$$

$$q_3 = W_3 \cdot L_{q3}$$

$$q_4 = W_4 \cdot L_{q4}$$

$$q_1 = 200.42 \frac{N}{m} * 1.33m$$

$$q_2 = 899.15 \frac{N}{m} * 0.8m$$

$$q_3 = 62.22 \frac{N}{m} * 0.63m$$

$$q_4 = 858.55 \frac{N}{m} * 0.28m$$

$$q_1 = 266.55 \text{ N} \\ @ 0.66m$$

$$q_2 = 719.32 \text{ N} \\ @ 0.4m$$

$$q_3 = 39.19 \text{ N} \\ @ 1.68m$$

$$q_4 = 240.39 \text{ N} \\ @ 1.86m$$

- **Determinación de las reacciones R_A y R_B en los apoyos de la viga:** Para propósitos de facilitar la identificación de los puntos de reacción, llamaremos al apoyo fijo de la viga “Punto A” y al soporte de rodillo “Punto B”.

Reacción R_{B_y} : Sumatoria de momentos en con respecto a A:

$$\Sigma M_A = 0$$

$$\Sigma M_A = -(P_1 * L_{P1}) - (P_4 * L_{P4}) - (q_2 * L_{q2}) - (q_1 * L_{q1}) - (P_2 * L_{P2}) - (P_3 * L_{P3}) \\ - (P_5 * L_{P5}) - (q_3 * L_{q3}) - (q_4 * L_{q4}) + (R_{By} * L_{By}) = 0$$

(Ecuación 4)

$$\Sigma M_A = -(40.18 \text{ N} * 0.22\text{m}) - (49 \text{ N} * 0.27\text{m}) - (719.32 \text{ N} * 0.4\text{m}) \\ - (266.55 \text{ N} * 0.66\text{m}) - (132.31 \text{ N} * 0.91\text{m}) - (47.33 \text{ N} * 1.2\text{m}) \\ - (97.22 \text{ N} * 1.35\text{m}) - (39.19 \text{ N} * 1.68\text{m}) - (240.39 \text{ N} * 1.86\text{m}) \\ + (R_{By} * 2\text{m}) = 0$$

$$R_{By} = 653.57 \text{ N}$$

Reacción R_{Ay} : Sumatoria de fuerzas en “x” y “y”:

$$\Sigma F_x = 0$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$\Sigma F_y = R_{Ay} - P_1 - P_4 - q_2 - q_1 - P_2 - p_3 - P_5 - q_3 - q_4 + R_{By} = 0$$

(Ecuación 5)

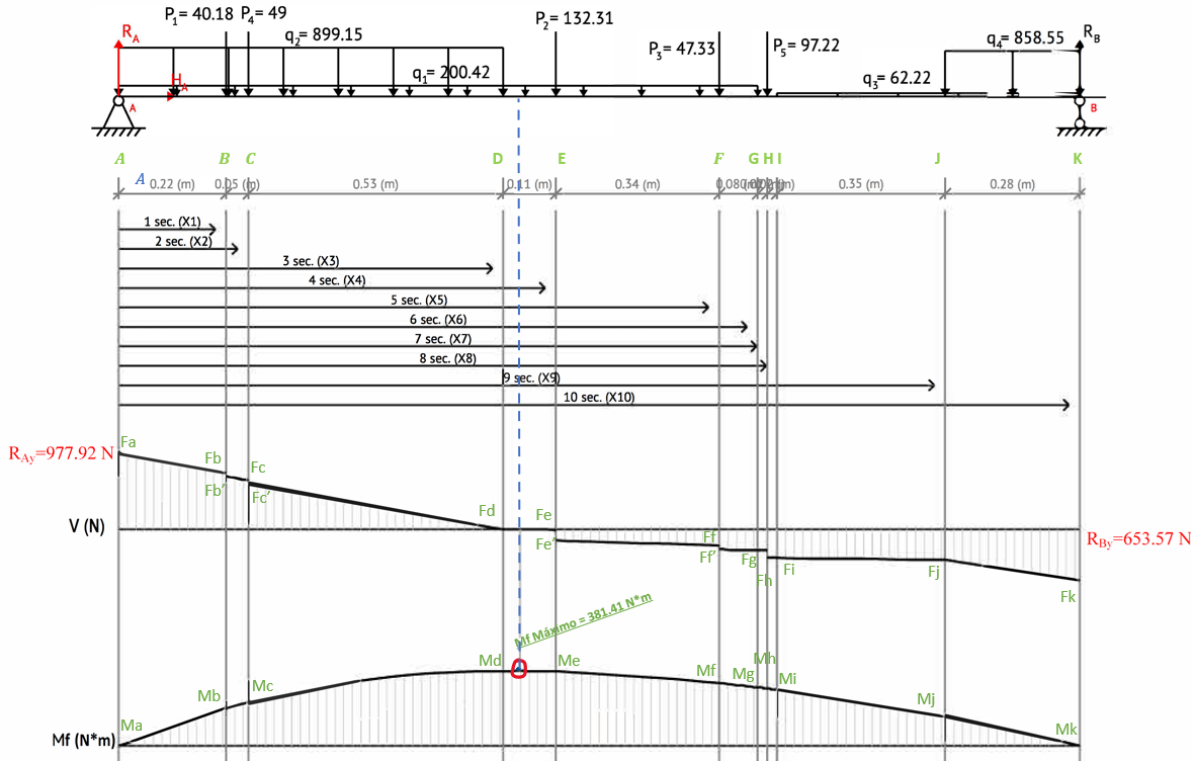
$$\Sigma F_y = R_{Ay} - 40.18 \text{ N} - 49 \text{ N} - 719.32 \text{ N} - 266.55 \text{ N} - 132.31 \text{ N} - 47.33 \text{ N} - 97.22 \text{ N} \\ - 39.19 \text{ N} - 240.39 \text{ N} + 653.57 \text{ N}$$

$$R_{Ay} = 977.92 \text{ N}$$

- **Determinación del Esfuerzo Cortante (V) y Momento Flector (Mf) para la sección de la viga:** Se hace uso de la Figura 38., donde se calculan los valores por intervalo de longitud de la viga.

Figura 38.

Diagrama de Esfuerzo Cortante (V) y Momento Flector (Mf) vs. Distancia (x)



Nota. Diagrama de Esfuerzo Cortante (Superior) y Momento Flector (Inferior) para la longitud de la viga en su sección más crítica. Tomado de: Utilizando la herramienta BeamGuru, [En Línea]. Disponible: <https://beamguru.com/online/beam-calculator/>

Cálculo de Esfuerzo Cortante (V) vs Distancia (x): Las expresiones “ F_x ” corresponden al Esfuerzo Cortante en cada uno de los puntos denotados con la distancia “x” de la Figura 38.

$$F_a = R_{A_y} = 977.92 \text{ N}$$

$$F_b = R_{A_y} - (q_1 * L_{AB}) - (q_2 * L_{AB}) \tag{Ecuación (6)}$$

$$F_b = 977.92 \text{ N} - (200.42 \text{ N/m} * 0.22 \text{ m}) - (899.15 \text{ N/m} * 0.22 \text{ m})$$

$$F_b = 736.02 \text{ N}$$

$$F_b' = F_b - P_1 \tag{Ecuación (7)}$$

$$F_b' = 736.02 \text{ N} - 40.18 \text{ N}$$

$$F_b' = 695.84 \text{ N}$$

$$F_c = F_b' - (q_1 * L_{BC}) - (q_2 * L_{BC}) \quad \text{Ecuación (8)}$$

$$F_c = 695.84 \text{ N} - (200.42 \text{ N/m} * 0.05 \text{ m}) - (899.15 \text{ N/m} * 0.05 \text{ m})$$

$$F_c = 640.86 \text{ N}$$

$$F_c' = F_c - (P_4) \quad \text{Ecuación (9)}$$

$$F_c' = 640.86 \text{ N} - 49 \text{ N}$$

$$F_c' = 591.86 \text{ N}$$

$$F_d = F_c' - (q_1 * L_{CD}) - (q_2 * L_{CD}) \quad \text{Ecuación (10)}$$

$$F_d = 591.86 \text{ N} - (200.42 \text{ N/m} * 0.53 \text{ m}) - (899.15 \text{ N/m} * 0.53 \text{ m})$$

$$F_d = 9.09 \text{ N}$$

$$F_e = F_d - (q_1 * L_{DE}) \quad \text{Ecuación (11)}$$

$$F_e = 9.09 \text{ N} - (200.42 \text{ N/m} * 0.11 \text{ m})$$

$$F_e = -12.96 \text{ N}$$

$$F_e' = F_e - (P_2) \quad \text{Ecuación (12)}$$

$$F_e' = -12.96 \text{ N} - (132.31 \text{ N})$$

$$F_e' = -145.27 \text{ N}$$

$$F_f = F_e' - (q_1 * L_{EF}) \quad \text{Ecuación (13)}$$

$$F_f = -145.27 \text{ N} - (200.42 \text{ N/m} * 0.34 \text{ m})$$

$$F_f = -213.41 \text{ N}$$

$$F_f' = F_f - (P_3) \quad \text{Ecuación (14)}$$

$$F_f' = -213.41 \text{ N} - (47.33 \text{ N})$$

$$F_f' = -260.74 \text{ N}$$

$$F_g = F_f' - (q_1 * L_{FG}) \quad \text{Ecuación (15)}$$

$$F_g = -260.74 \text{ N} - (200.42 \text{ N/m} * 0.08 \text{ m})$$

$$F_g = -276.77 \text{ N}$$

$$F_h = F_g - (P_5) \quad \text{Ecuación (16)}$$

$$F_h = -276.77 \text{ N} - (97.22 \text{ N})$$

$$F_h = -374 \text{ N}$$

$$F_i = F_h = -374 \text{ N}$$

$$F_j = F_i - (q_3 * L_{IJ}) \quad \text{Ecuación (17)}$$

$$F_j = -374 \text{ N} - (62.22 \text{ N/m} * 0.35 \text{ m})$$

$$F_j = -395.78 \text{ N}$$

$$F_k = F_j - (q_3 * L_{JK}) - (q_4 * L_{JK}) \quad \text{Ecuación (18)}$$

$$F_k = -395.78 \text{ N} - (62.22 \text{ N/m} * 0.28 \text{ m}) - \left(858.55 \frac{\text{N}}{\text{m}} * 0.28 \text{ m}\right)$$

$$F_k = -653.59 \text{ N}$$

$$F_k + (R_{By}) = 0 \quad \text{Ecuación (19)}$$

$$-653.59 \text{ N} + 653.57 \text{ N} \approx 0$$

Cálculo de Momento Flector (Mf) vs Distancia (x): Aplicamos el método de áreas teniendo en cuenta la gráfica de la Figura 38. Las expresiones Mf'_x corresponden al Momento Flector en cada uno de los puntos denotados con la distancia “x”.

$$Mf_a = \text{Área AA} = 0 \quad \text{Ecuación (20)}$$

$$Mf_b = \text{Área AB} \quad \text{Ecuación (21)}$$

$$Mf_b = \left(\left(\frac{977.92 \text{ N} - 736.02 \text{ N}}{2} * 0.22 \text{ m} \right) + (736.02 \text{ N} * 0.22 \text{ m}) \right)$$

$$Mf_b = 188.53 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$Mf_c = \text{Área AB} + \text{Área BC} \quad \text{Ecuación (22)}$$

$$Mf_c = 188.53 \text{ N} \cdot \text{m} + \left(\left(\frac{695.84 \text{ N} - 640.86 \text{ N}}{2} * 0.05 \text{ m} \right) + (640.86 \text{ N} * 0.05 \text{ m}) \right)$$

$$Mf_c = 221.95 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$Mf_d = \text{Área AC} + \text{Área CD} \quad \text{Ecuación (23)}$$

$$Mf_d = 221.95 \text{ N} \cdot \text{m} + \left(\left(\frac{591.86 \text{ N} - 9.09 \text{ N}}{2} * 0.53 \text{ m} \right) + (9.09 \text{ N} * 0.53 \text{ m}) \right)$$

$$Mf_d = 381.2 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Intervalo de Máximo Momento Flector (DE):

$$Mf_{\text{Máximo}} = \text{Área AD} + \text{Área DD}' \quad \text{Ecuación (24)}$$

Donde: D' – Corresponde a la distancia desde D hasta el punto de Máximo Momento Flector.

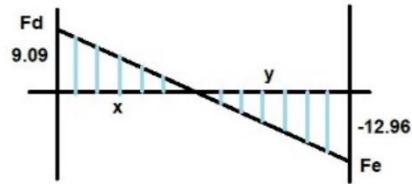
Para determinar distancia D a D', aplicamos semejanza de triángulos (criterio ángulo-ángulo):

$$\frac{9.09 N}{12.96 N} = \frac{x}{y}$$

$$\frac{9.09 N}{12.96 N} = \frac{0.11 - y}{y}$$

$$y = 0.06465 m$$

$$x = 0.04534 m$$



$$Mf_{Máximo} = 381.2 N \cdot m + \left(\frac{9.09 N - 0 N}{2} * 0.04534 m \right)$$

$$Mf_{Máximo} = 381.41 N \cdot m$$

$$Mf_e = \text{Área AD} + \text{Área DE} \quad \text{Ecuación (25)}$$

$$Mf_e = 381.2 N \cdot m + \left(\left(\frac{9.09 N - 0 N}{2} * 0.04534 m \right) - \left(\frac{0 N - (-12.96 N)}{2} * 0.06465 m \right) \right)$$

$$Mf_e = 381 N \cdot m$$

$$Mf_f = \text{Área AE} + \text{Área EF} \quad \text{Ecuación (26)}$$

$$Mf_f = 381.2 N \cdot m - \left(\left(\frac{(-145.27 N) - (-213.41 N)}{2} * 0.34 m \right) - (145.27 N \cdot m * 0.34 m) \right)$$

$$Mf_f = 320.02 N \cdot m$$

$$Mf_g = \text{Área AF} + \text{Área FG} \quad \text{Ecuación (27)}$$

$$Mf_g = 320.02 N \cdot m - \left(\left(\frac{(-260.74 N) - (-276.77 N)}{2} * 0.08 m \right) - (260.74 N \cdot m * 0.08 m) \right)$$

$$Mf_g = 298.52 N \cdot m$$

$$Mf_h = \text{Área AG} + \text{Área GH} \quad \text{Ecuación (28)}$$

$$Mf_h = 298.52 N \cdot m - (276.77 N \cdot m * 0.02 m)$$

$$Mf_h = 292.99 N \cdot m$$

$$Mf_i = \text{Área AH} + \text{Área HI} \quad \text{Ecuación (29)}$$

$$Mf_i = 292.99 N \cdot m - (374 N \cdot m * 0.02 m)$$

$$Mf_i = 285.51 N \cdot m$$

$$Mf_j = \text{Área AI} + \text{Área IJ} \quad \text{Ecuación (30)}$$

$$Mf_j = 285.51 N \cdot m - \left(\left(\frac{(-374 N) - (-395.78 N)}{2} * 0.35 m \right) - (374 N \cdot m * 0.35 m) \right)$$

$$Mf_j = 146.8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$Mf_k = \text{Área AI} + \text{Área IJ} \quad \text{Ecuación (31)}$$

$$Mf_k = 146.8 \text{ N} \cdot \text{m} - \left(\left(\frac{(-395.78 \text{ N}) - (-653.59 \text{ N})}{2} \right) * 0.28 \text{ m} \right) - (395.78 \text{ N} * \text{m} * 0.28 \text{ m})$$

$$Mf_k = -0.118 \text{ N} \cdot \text{m} \approx 0 \text{ N} \cdot \text{m}$$

- **Determinación de Flexión en la Viga:** El esfuerzo a flexión en la viga está definido por la siguiente ecuación:

$$S = \frac{Mc}{I} = \frac{M}{Z} \quad \text{Ecuación (32)}$$

Donde:

S - Flexión (Pa, MPa)

M_c - Momento flector en la sección más crítica (N·m)

I - Momento de inercia del área transversal con respecto a su eje neutro (cm⁴)

M - Momento flector en la sección a calcular (N·m)

Z - Módulo Rectangular de sección (cm³)

Para determinar el punto de Flexión máxima en la viga, tenemos en cuenta la sección “DE” de la Figura 38, donde se encuentra el punto más crítico debido al Momento Flector en el punto D’. Teniendo en cuenta que se dispone utilizar un perfil en L de alas iguales (longitud de ala 1 ¼” x 1 ¼”, espesor ¼”) determinamos Z_{xx} según Tabla 14.

$$S = \frac{381.41 \text{ N} \cdot \text{m}}{1.49 \times 10^{-6} \text{ m}^3}$$

$$S = 2.5598 \times 10^8 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 255.98 \text{ MPa}$$

Tabla 14.*Dimensiones y propiedades para perfiles de ángulos en L de alas iguales*

Ancho de las alas (DxB)		Espesor (th)		Área (cm ²)	Ixx = Iyy	Zxx = Zyy	kxx = kyy	x = y	Peso (kgf/m)
(pulg)	(mm)	(pulg)	(mm)		(cm ⁴)	(cm ³)	(cm)	(cm)	
1 ¼	31.75	¼	6.35	2.80	1.54	0.92	0.74	0.86	2.22
1 ¼	31.75	¼	6.35	3.72	3.21	1.49	0.94	1.02	2.86
1 ¼	31.75	¼	6.35	4.40	5.83	2.20	1.14	1.19	3.48

Nota. La tabla muestra las dimensiones y propiedades para diseño de los perfiles en L de lados iguales encontrados comercialmente. Tomado de: Codiacero Acero y Servicio, *Manual de medidas y tipos de perfiles comerciales*, [En Línea]. Disponible: <https://docplayer.es/22571747-Angulos-de-lados-iguales-perfiles-en-l.html> [Acceso: noviembre 22, 2022].

- **Determinación de Factor de Seguridad de la viga:** Para verificar la capacidad de carga del perfil estructural en L seleccionado acorde a las cargas a las cuales se somete, determinamos el Factor de Seguridad mínimo de 1.5, teniendo en cuenta que según la Tabla 16 para aceros y metales dúctiles con carga muerta y la resistencia máxima a tracción para el material es de 400 MPa según Tabla 15, haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$S = \frac{Su}{N} \quad \text{Ecuación (33)}$$

Donde:

S – Flexión para el punto más crítico (MPa)

Su – Resistencia a la Tracción mínima del material (MPa)

N – Factor de Seguridad

$$255.98 \text{ MPa} = \frac{400 \text{ MPa}}{N}$$

$$N = 1.56$$

$$N = 1.56 * 2 \text{ apoyos} = 3.12$$

Según lo determinado en el cálculo anterior, el perfil en L seleccionado cumple el factor de seguridad mayor a 1,5; confirmando que la estructura cumple con la capacidad de carga de los elementos que componen el sistema del reactor pirolítico. Teniendo en cuenta que la estructura

cuenta con dos ruedas en cada uno de los apoyos A y B, el factor de seguridad se duplica a 3,12 según el análisis de cargas.

Tabla 15.

Tabla de aceros estructurales y de uso industrial laminados en caliente

ACERO LAMINADO EN CALIENTE	COMPOSICIÓN QUÍMICA DE COLADA	RESISTENCIA A FLUENCIA MÍNIMA, S _y		RESISTENCIA A TRACCIÓN MÍNIMA, S _u		ELONGACIÓN MÍNIMA (en 200 mm) %	CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES
		MPa	ksi	MPa	ksi		
ASTM A-36 (NTC1920)	Carbono (C): 0,26% máx.	250	36	400	58	12,5 a 20,0	Acero estructural al carbono. Estructuras metálicas, puentes, torres de energía y para comunicación edificaciones soldadas, remachadas o atornilladas, herrajes eléctricos y señalización
	Manganeso (Mn): no hay requisito						
	Fósforo (P): 0,04% máx.						
	Azufre (S): 0,5% máx.						
	Silicio (Si): 0,40% máx.						
Cobre (Cu): 0,20% mín.							

Nota. Propiedades de resistencia y elongación para acero denominación ASTM A36. Tomado de: L. V. Vanegas Useche, *Diseño De Elementos De Máquinas*. Pereira, Colombia: UTP, 2018.

Tabla 16.

Tabla de factores de seguridad. Valores mínimos recomendados

TIPO O CLASE DE CARGA	ACEROS, METALES, DÚCTILES		HIERRO FUNDIDO, METALES FRÁGILES	MADERA DE CONSTRUCCIÓN
	BASADO EN LA RESISTENCIA MÁXIMA	BASADO EN LA RESISTENCIA DE FLUENCIA	BASADO EN LA RESISTENCIA MÁXIMA	
Carga muerta o carga variable bajo análisis por fatiga	3 - 4	1,5 - 2	5 - 6	7

Nota. Factores de seguridad recomendados según tipo o clase de trabajo. Tomado de: L. V. Vanegas Useche, *Diseño De Elementos De Máquinas*. Pereira, Colombia: UTP, 2018.

- **Determinación de la capacidad de carga de las ruedas:** El apoyo R_{Ay} , corresponde al punto que resiste la mayor carga debida a la distribución de peso del equipo, lugar de instalación de 2 ruedas (frontal y trasera). Lo anterior significa que entre las 2 ruedas deben soportar la reacción $R_{Ay} = 977.92 \text{ N}$.

$$\text{Masa por cada rueda} = \frac{\frac{R_{Ay}}{\text{Gravedad}}}{\text{Ruedas de soporte en el apoyo}} \quad \text{Ecuación (34)}$$

$$\text{Masa por cada rueda} = \frac{\frac{977.92 \text{ N}}{9.8 \text{ m/s}^2}}{2 \text{ ruedas}}$$

$$\text{Masa por cada rueda} = 49.89 \text{ kg}$$

Verificando la capacidad de carga de las ruedas según la Figura 39, para la rueda de referencia MPG4 080 TXT4, se cumple que las ruedas seleccionadas, pueden soportar hasta 150 kg por rueda, superando la masa requerida de 49,89 kg que tiene el equipo en su punto más crítico.

Figura 39.

Tipos de rodantes giratorios comerciales

Rotantes Giratorios



Código	Referencia	A	B	G	H	Kg		(kg)
34-090/5	MPG4 080 TXT4	80	35	81	108	150	≡	0,75
34-092/9	MPG4 100 TXT4	100	35	91	128	175	≡	0,85
34-092/94	MPG4 100 TXB4	100	35	91	128	175	≡	0,90
34-094/48	MPG4 125 TXS4	125	40	104	155	200	≡	1,10

Nota. Dimensiones y capacidades de rodantes giratorios comerciales. Tomado de: Gayner Soluciones en movimiento, [En línea]. Disponible: <https://www.gayner.es/productos/ruedas-y-rotantes/rotantes-para-cargas-medias-y-traccion-manual/mp4.html> [Acceso: noviembre 22, 2022].

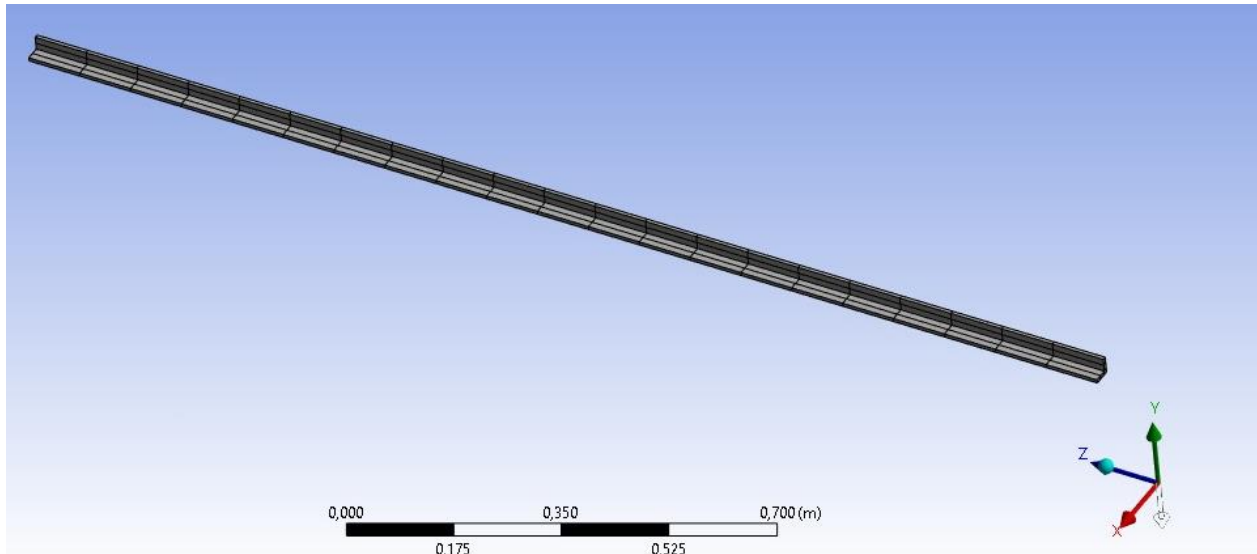
3.1.2. Simulación análisis de la estructura

A continuación, se realiza el análisis en el programa Ansys Workbench, con el propósito de simular las cargas ejercidas en la longitud de la viga del perfil en L de longitud de ala 1 ¼” x 1 ¼” espesor ¼”, según se presentan las cargas en el diagrama de cuerpo libre de la Figura 37 con el fin de validar los resultados obtenidos en el Título 3.1.1., utilizando el Método de Elementos Finitos.

Se modela un sistema de análisis estático estructural para el perfil en L, utilizando un enmallado de 53 nodos que satisface el análisis detallado para una viga de 2 metros de longitud, como se observa en la Figura 40.

Figura 40.

Enmallado de perfil en L de acero ASTM A36 en Ansys Workbench

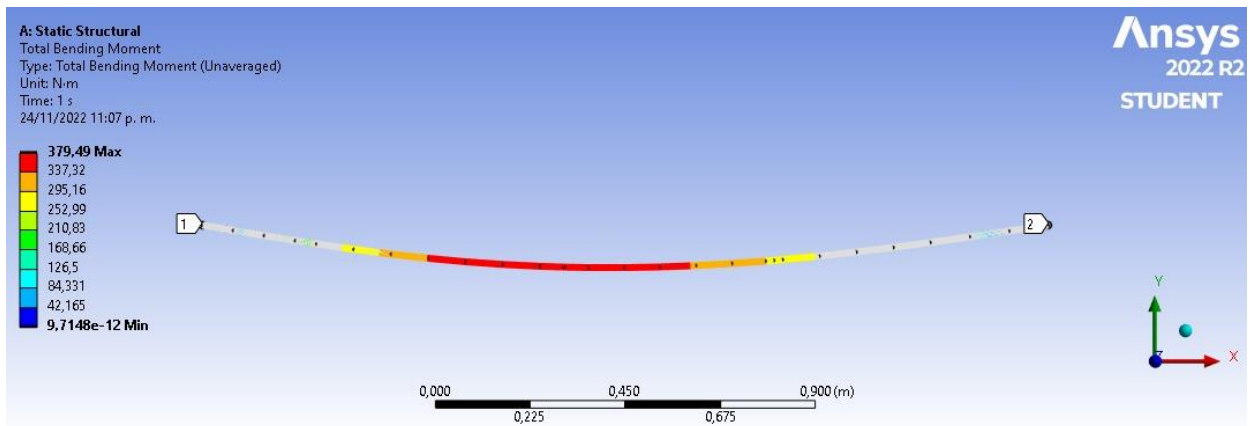


Nota. Modelado de perfil en L. Tomado de: utilizando la herramienta Ansys Workbench.

3.1.2.a. Análisis de Momento flector. Se realiza la distribución de cargas puntuales y distribuidas a lo largo de la viga, donde se puede concluir que el punto más crítico donde ocurre el mayor momento flector en la viga coincide con los cálculos descritos en el Título 3.1.1 con un valor máximo de 379.49 N·m como se observa en la Figura 41, en el intervalo de 0.75 a 1 metro, según se observa en la gráfica representada en la Figura 42.

Figura 41.

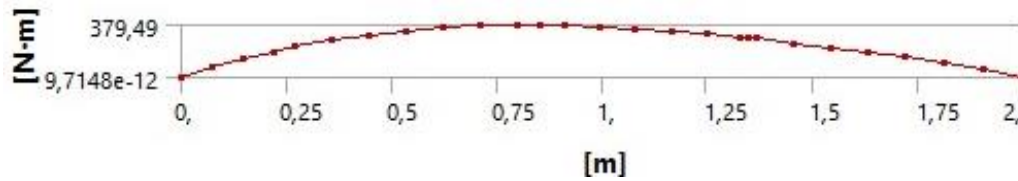
Simulación de momento flector en Ansys Workbench



Nota. Simulación de comportamiento a flexión para viga de perfil en L. Tomado de: utilizando la herramienta Ansys Workbench.

Figura 42.

Momento flector (N-m) vs Distancia (m)

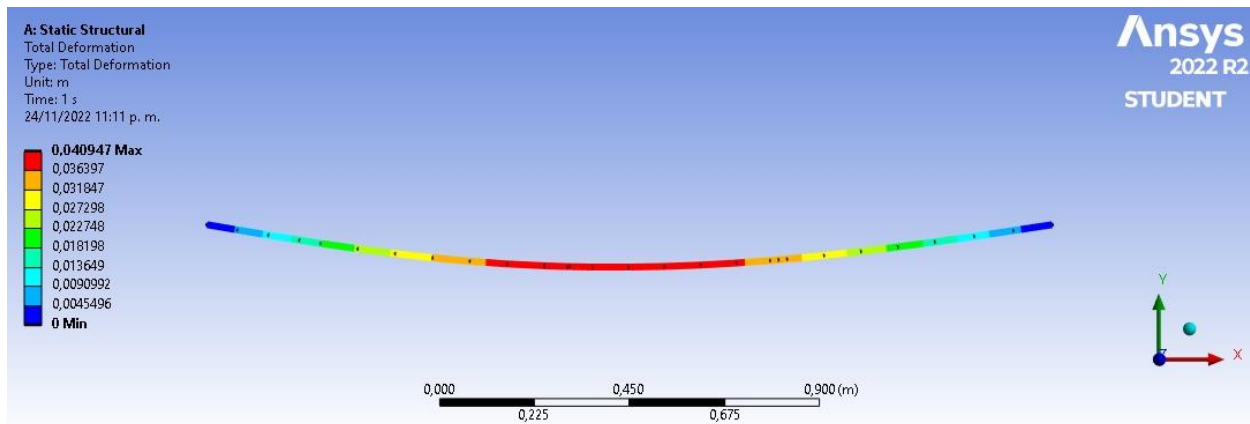


Nota. Gráfica de momento flector versus distancia para viga de perfil en L. Tomado de: utilizando la herramienta Ansys Workbench.

3.1.2.b. Análisis de Deformación Total. Teniendo en cuenta la composición del material de la viga en el punto de mayor momento flector, tomado como punto más crítico de la sección, se puede observar que la máxima deformación a la cual se somete en condiciones de trabajo estático es de 0.040947 metros, como se observa en la Figura 43, concluyendo que la viga seleccionada no afecta las condiciones de trabajo del equipo, sin ser un valor crítico para la resistencia del material.

Figura 43.

Simulación de deformación total en Ansys Workbench

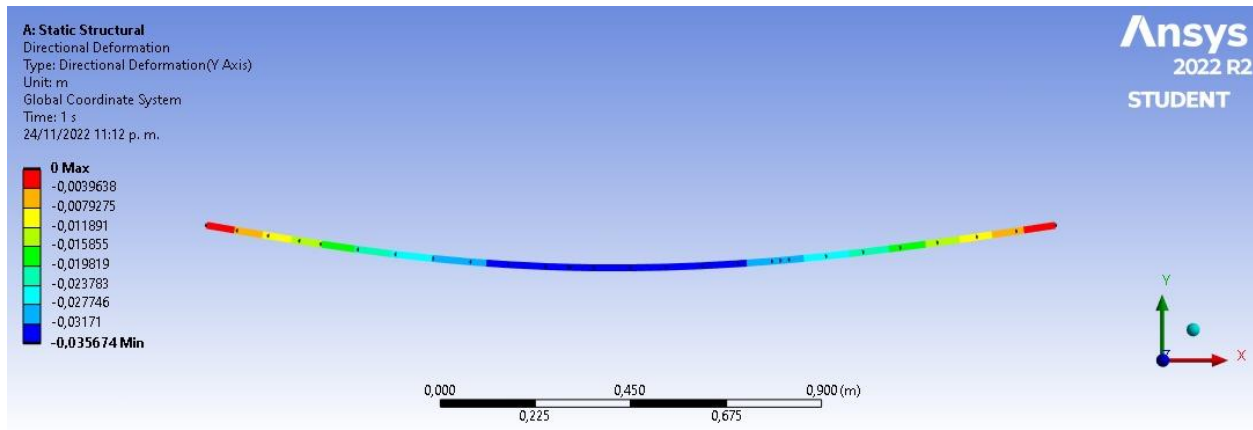


Nota. Simulación de deformación total para viga de perfil en L. Tomado de: utilizando la herramienta Ansys Workbench.

3.1.2.c. Análisis de Deformación Direccional. Teniendo en cuenta lo observado en la Figura 44, se puede concluir que los extremos en los cuales se encuentran los apoyos A y B, (ruedas de la estructura), es donde ocurre el mayor cambio en la dirección de la viga en comparación a sus condiciones en ausencia de cargas.

Figura 44.

Simulación de deformación direccional en Ansys Workbench



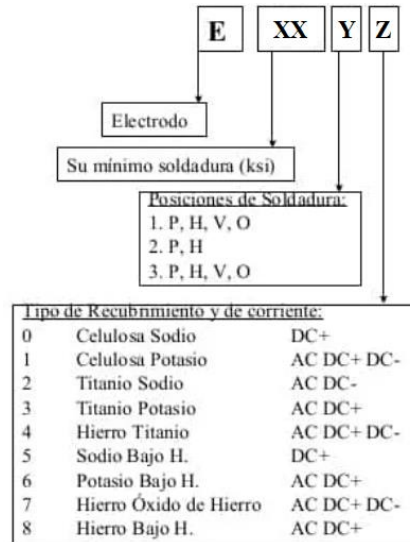
Nota. Simulación de deformación direccional para viga de perfil en L. Tomado de: utilizando la herramienta Ansys Workbench.

3.2. Análisis de soldadura

Teniendo en cuenta que para realizar las modificaciones a los componentes que conforman el Equipo Piloto de Pirólisis, se requiere realizar empalmes de soldadura entre los componentes metálicos de la compuerta del cilindro reactor y de la Estructura - Bastidor, empleando un equipo Soldador Inversor (15-160 A), que permite realizar soldadura por arco, utilizando electrodo E6013, el cual cumple con las características descritas de la Figura 45.

Figura 45.

Notación de electrodos para soldadura con arco



Nota. Nomenclatura para electrodos de soldadura por arco. Tomado de: Material Welding, [En Línea]. Disponible: <https://www.materialwelding.com/especificacion-del-electrodo-e6010-y-su-significado/> [Acceso: noviembre 18, 2022].

Tenemos para el Electrodo E6013:

E – Tipo de Soldadura = **Electrodo para soldadura de arco**

XX - Resistencia a tracción de la soldadura = **60 ksi**

Y – Posición a ser soldado = **Todas las posiciones**

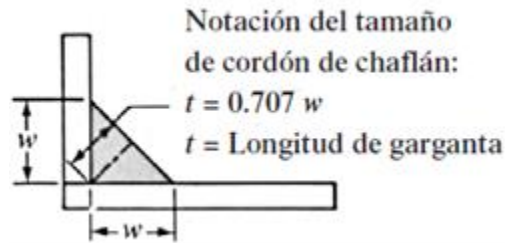
Z – Revestimiento = **Titanio Potasio**

3.2.1. Análisis de soldadura Reactor

En la soldadura tipo “Chaflan” requerida para adaptar la compuerta de alimentación al cilindro reactor seleccionado como se observa en el Anexo A, haciendo uso de electrodo E6013 de diámetro 1/8”, se realiza el cálculo del tamaño del cordón de soldadura (w) necesario en la unión a soldar

alrededor del cilindro como se observa en la Figura 46 que se unirá al niple de acero galvanizado de diámetro nominal 3", Schedule 40, ASTM A53 (Diámetro externo 3.5"). Se contempla la fuerza que ejerce el tapón de acero galvanizado en su extremo (masa 0.92 kg).

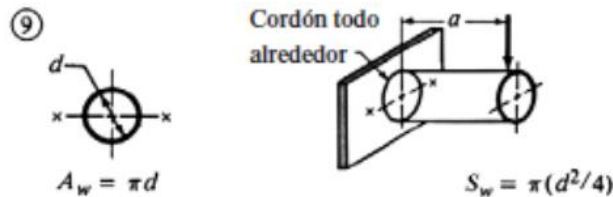
Figura 46.
Soldadura según orillas para soldadura de chaflán



Nota. Diagrama de explicación para tamaño de cordón de soldadura en geometría tipo chaflán. Tomado de: R. Mott, Diseño De Elementos De Maquinas. Cuarta edición, México: Pearson, 2009.

- **Cálculo de Factores Geométricos:** Según la geometría del niple de 3" como se observa en la Figura 47, para un cordón de soldadura alrededor de la geometría con carga por flexión en su extremo tenemos:

Figura 47.
Factor geométrico para análisis de soldadura de geometría circular sometida a carga por flexión.



Nota. Diagrama de explicación para factores geométricos según geometría de soldadura cilíndrica. Tomado de: R. Mott, Diseño De Elementos De Maquinas. Cuarta edición, México: Pearson, 2009.

$$A_w = \pi * d$$

Ecuación (35)

Donde:

A_w – Longitud del cordón de soldadura (m)

d – Diametro externo de la geometría (m)

$$A_w = \pi * \left(\frac{3.5''}{1''} * 0.0254 m\right)$$

$$A_w = 0.2793 m$$

$$S_w = \pi * \frac{d^2}{4}$$

Ecuación (36)

Donde:

S_w – Factor geométrico para soldadura a Flexion (m^2)

$$S_w = \pi * \frac{\left(\frac{3.5''}{1''} * 0.0254 m\right)^2}{4}$$

$$S_w = 6.2072 \times 10^{-3} m^2$$

- **Cálculo de Momento flector:** Producida por el tapón (masa 0.92 kg) a 97 mm (Largo del Niple).

$$M = V * a$$

Ecuación (37)

Donde:

M – Momento flector ($N \cdot m$)

V – Esfuerzo cortante (N)

a – Distancia soldadura a la carga (m)

$$M = (0.92 kg * 9.8 m/s) * 0.097 m$$

$$M = 0.8746 N \cdot m$$

- **Cálculo de fuerza debida a la flexión:**

$$f_b = \frac{M}{S_w}$$

Ecuación (38)

Donde:

f_b – Fuerza debida a la flexión del punto más crítico ($N \cdot m$)

$$f_b = \frac{0.8746 N \cdot m}{6.2072 \times 10^{-3} m^2}$$
$$f_b = 140.901 N/m$$

- **Cálculo de fuerza cortante vertical:**

$$f_s = \frac{P}{A_w} \quad \text{Ecuación (39)}$$

Donde:

f_s – Fuerza debida a cortante vertical ($N \cdot m$)

P – Carga aplicada del tapón (N)

$$f_s = \frac{(0.92 kg * 9.8 m/s)}{0.2793 m}$$
$$f_s = 32.2807 N/m$$

- **Cálculo de fuerza resultante:** Se calcula la fuerza resultante ejercida por la fuerza a flexión y la carga por cortante vertical.

$$f_R = \sqrt{f_b^2 + f_s^2} \quad \text{Ecuación (40)}$$

$$f_R = \sqrt{(140.901 N/m)^2 + (32.2807 N/m)^2}$$
$$f_R = 144.5510 N/m$$

- **Longitud necesaria del hilo (W):** Para calcular la longitud del hilo que corresponde a los catetos del chaflán que requiere la soldadura, se verifica la Fuerza admisible por pulgada de lado para el Electrodo E60 utilizado según se observa en la Tabla 17.

Tabla 17.

Esfuerzos cortantes y fuerzas admisibles sobre soldaduras

Electrodo	Esfuerzo cortante admisible	Fuerza admisible por pulgada de lado
E60	13 600 psi	9600 lb/pulg
E70	15 800 psi	11 200 lb/pulg
E60	12 400 psi	8800 lb/pulg
E70	14 700 psi	10 400 lb/pulg

Nota. Valores admisibles según capacidad de resistencia por tipo de electrodo de soldadura. Tomado de: R. Mott, Diseño De Elementos De Maquinas. Cuarta edición, México: Pearson, 2009.

Al comparar la fuerza resultante con la fuerza admisible para 1 pulgada de cordón, se obtiene:

$$W = \frac{f_R}{\text{fuerza admisible por longitud de lado}} \quad \text{Ecuación (41)}$$

$$W = \frac{144.5510 \text{ N/m}}{9600 \text{ lbf/pulg} \cdot \text{pulg lado} * \left(\frac{4.4882 \text{ N}}{1 \text{ lbf}} * \frac{1550 \text{ pulg}^2}{1 \text{ m}^2} \right)}$$

$$W = 2.1645 \times 10^{-6} \text{ m} = 0.0022 \text{ mm}$$

En chaflán requerido de soldadura para resistir el conjunto de la tapa y el niple de 3” es bastante pequeño (0.0022 mm), por lo cual se puede realizar una soldadura de 3.175 mm (1/8”), la cual cumple ampliamente la capacidad de sostener la compuerta de alimentación de los NFU.

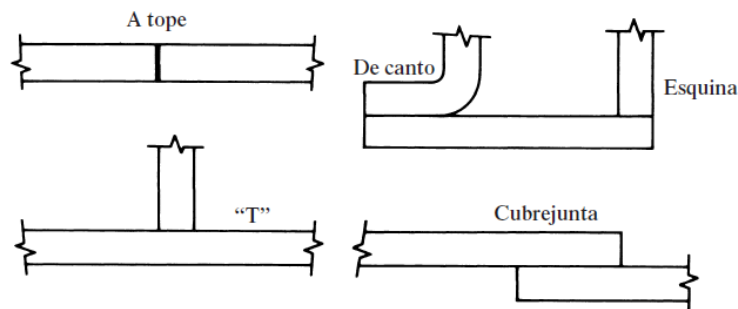
3.2.2. Análisis de soldadura Estructura-Bastidor

Para unir los perfiles en L de acero de la estructura, se requiere utilizar soldadura por arco en las cuatro esquinas del marco propuesto en el Anexo D, utilizando electrodo revestido E6013. Este tipo de unión forma un ángulo de 45°, que se realiza a “Tope”, según se indica en la Figura 48, lo cual señala que de realizarse correctamente la unión tendrá el mismo espesor nominal que las

partes a unir (1/4" de espesor), resistiendo las cargas a tensión acorde a la denominación del acero utilizado (ASTM A36), es decir teniendo en cuenta la resistencia a la tracción del material 58 ksi (400 MPa) de acuerdo con la Tabla 15, sin la necesidad de realizar un análisis especial de la unión [57]. Es decir, las características de resistencia de la unión corresponden a las mismas propiedades del material unido.

Figura 48.

Tipos de uniones de soldadura.



Nota. Diagrama de explicación para posiciones de soldadura según el tipo de unión de las piezas. Tomado de: R. Mott, Diseño De Elementos De Maquinas. Cuarta edición, México: Pearson, 2009.

4. CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE PIRÓLISIS

Acorde a lo contemplado en la literatura del Título 1 sobre los Tipos de Equipos de Pirólisis y sus características que se adaptan para el procesamiento de NFU y de acuerdo a las características de diseño nombradas en los Títulos 2 y 3, se contempla la construcción del Equipo Piloto para realizar las respectivas pruebas del proceso pirolítico y obtener los resultados experimentales, teniendo en cuenta que la mayoría de estos materiales de construcción provienen de materiales reutilizables y/o reciclables.

Para lo anterior, se realiza la construcción del Equipo de la siguiente manera:

4.1. Construcción del Sistema Reactor Pirolítico

Para la construcción y adaptación del Reactor Pirolítico, se realizan las modificaciones a la estructura existente del Cilindro de Refrigerante R134a como se planteó en el diseño del Título 2.3.1, teniendo en cuenta la compuerta de alimentación, la adaptación del sistema de escape de los gases pirolíticos y la adaptación de sensores para el monitoreo de parámetros como se describe a continuación:

4.1.1. Compuerta de alimentación

Para la construcción del sistema de compuerta de alimentación conforme al diseño propuesto, se hace uso de un Niple Galvanizado de las siguientes dimensiones: diámetro interno: 76,2 mm (3”), diámetro externo: 88,9 mm (3,5”), longitud: 97 mm, según medidas comerciales consignadas en la Tabla 8 (Título 2.3.1). Se adapta como compuerta de alimentación al cuerpo del cilindro de refrigerante como se observa en la Figura 49, para ello se perfora el cuerpo de este con una sierra copa de diámetro 76,2 mm (3”), y mediante soldadura de arco utilizando electrodo revestido titanio potasio E6013 se junta al cuerpo del cilindro. De esta forma, el ducto interno del niple galvanizado se usa para alimentar el reactor con la materia prima a procesar (NFU); para asegurar el sello hermético del interior del cilindro con el ambiente exterior, se usa el extremo del niple roscado y se tapa (Tapa en Acero Galvanizado de Diámetro Nominal 3”), como se observa en la imagen de la Figura 50, asegurando la hermeticidad con “Gastop” como sellante de alta temperatura para

conexiones roscadas, para evitar fugas durante su operación.

Figura 49.

Compuerta de alimentación sin soldadura



Nota. Fotografía anterior a las modificaciones.

Figura 50.

Sistema de compuerta de alimentación soldada con tapa final



Nota. Fotografía posterior a soldadura de niple de 3”.

4.1.2. Sistema de escape de gases pirolíticos

Inicialmente, se retira la válvula del Cilindro de Refrigerante R134a debido a que su vástago se compone de plástico que no resiste las temperaturas de funcionamiento del Equipo de Pirólisis. Mediante soldadura de arco utilizando electrodo revestido titanio potasio E6013, se suelda una sección de niple galvanizado de: diámetro nominal: 6.35 mm ($\frac{1}{4}$ "), largo: 20 mm, rosca: $\frac{1}{4}$ " – 18 NPT; para convertir la nueva conexión a un valor de tubería comercial, teniendo como resultado lo observado en la imagen de la Figura 51.

Figura 51.

Acople de salida de gas de diámetro nominal $\frac{1}{4}$ " soldado al cuerpo del reactor



Nota. Fotografía posterior a soldadura de niple de $\frac{1}{4}$ ".

Continuando el ensamble propuesto del sistema de escape de gases pirolíticos, y acorde a los resultados en experimentación previa con el uso de manguera de nylon, la cual no resiste altas temperaturas del proceso de pirólisis debido a la transferencia de calor, se requiere de accesorios adicionales en acero galvanizado para cubrir el recorrido de 885 mm desde el reactor hasta el Intercambiador de Calor, logrando la resistencia de temperaturas de salida de gas de pirólisis (entre 150 – 220 °C), hasta reducir la temperatura lo necesario luego de pasar por el Intercambiador de Calor, instalando así los accesorios roscados numerados en la Tabla 18, según se propuso en el Título 2.3.1, como se muestra en la Figura 52.

Figura 52.

Ducto de salida de gases pirolíticos instalado



Nota. Fotografía de ducto de salida de gases pirolíticos de reactor hacia el intercambiador de calor.

Tabla 18.

Dimensiones de accesorios comerciales en acero galvanizado utilizado para el Sistema de Gases Pirolíticos

NÚMERO DE ACCESORIO	TIPO DE ACCESORIO	DIÁMETRO NOMINAL (pulg) x LONGITUD (mm)	SCHEDULE
1	Niple	¼" x 20 mm	80
2	Codo Hembra-Hembra	¼"	80
3	Niple	¼" x 20 mm	80
4	Conector Hembra-Hembra	(¼" a 3/8") x 20 mm	80
5	Niple	3/8" x 300 mm	80
6	Bushing Macho-Hembra	(3/8" a ½")	80
7	Codo Hembra-Hembra	½"	80
8	Niple	½" x 200 mm	80
9	Te	½"	80
10	Niple	½" x 40 mm	80
11	Te	½"	80
12	Niple	½" x 550 mm	80
13	Codo Hembra-Hembra	½"	80
14	Niple	½" x 60mm	80

Nota. Tabla de accesorios de medida comercial en acero galvanizado utilizados en la construcción del Sistema de Gases de Escape desde el Reactor hasta el Intercambiador de Calor.

4.1.3. Instalación de sensores

- **Instalación de Termómetro Bimetálico:** Para tal propósito, en la construcción se adapta al cuerpo del reactor un Termómetro Bimetálico (Especificaciones: Conexión: trasera - rosca UNC de 5/16", Rango de temperatura: 0 – 550 °C Diámetro de dial: 52 mm, Medidas: espesor: 10,4 mm y fondo: 52.7 mm; Material: acero inoxidable y vidrio templado), como se observa en la imagen de la Figura 53, perforando un agujero pasante sobre la superficie cilíndrica del reactor con broca de 7.93 mm (5/16"). Adicionalmente, sobre el agujero pasante se suelda una Tuerca Hexagonal en acero galvanizado de 7.93 mm (5/16") rosca UNC, asegurando un cordón de soldadura electrodo revestido titanio potasio E6013 uniforme entre la tuerca y la lámina metálica del cilindro.

Figura 53.

Termómetro bimetalico de acero inoxidable y vidrio templado



Nota. Termómetro bimetalico adquirido con rango de lectura de temperatura de 0 a 500 °C para medición de parámetros del reactor. Tomado de: [En Línea]. Disponible: <https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-595373246-termometro-analogo-cocina-bbq-acero-inoxidable-50c-a-500c-JM?quantity=1> [Acceso: octubre 28, 2022].

Finalmente, se asegura el Termómetro Bimetálico sobre el Reactor como se observa en la Figura 54, utilizando la rosca de 7.93 mm ($\frac{5}{16}$ " UNC) y se asegura la hermeticidad sobre la rosca con pegante "Gastop".

Figura 54.

Termómetro bimetálico instalado



a)

b)

Nota. a) Fotografía de perfil frontal. b) Fotografía de perfil superior de instalación de Termómetro Bimetálico en Reactor pirolítico.

- **Instalación de Manómetro de Presión:** La instalación del Manómetro de Presión de glicerina (Especificaciones: Conexión: vertical inferior – rosca NPT de $\frac{1}{4}$ ", Rango de presión: 0 - 30 psi, Caratula: 63 mm, Material: acero inoxidable y bronce) se realiza en la línea de salida de los gases pirolíticos como se puede observar en el ensamble de la imagen de la Figura 55, según se especifica su ubicación en el Título 4.1.2., en la zona del Sistema de Escape de Gases Pirolíticos, mediante la utilización de accesorios en acero galvanizado y conexión roscada NPT nombrados en la Tabla 19.

Figura 55.

Manómetro de presión de glicerina instalado



Nota. Accesorios instalados (manómetro para lectura de presión y válvula de muestreo) en la línea de salida de gases de pirólisis del reactor.

Tabla 19.

Dimensiones de accesorios comerciales en acero galvanizado utilizados para instalación del manómetro de presión

Número de Accesorio	Tipo de Accesorio	Diámetro Nominal (pulg)	Schedule
15	Manómetro de Presión	1/4	-
16	Bushing macho-hembra	1/2 x 1/4	80
17	Válvula de Bola	1/2	-

Nota. Tabla de accesorios de medida comercial en acero galvanizado utilizados en la instalación del manómetro de presión.

De acuerdo a las modificaciones anteriormente mencionadas, se puede observar en la imagen de la Figura 56., el reactor propuesto construido.

Figura 56.

Sistema de reactor pirolítico construido



Nota. Fotografía del reactor de pirólisis construido con las especificaciones de diseño propuestas.

4.2.Construcción del Sistema de Conservación de Calor – Hogar

Acorde a los requerimientos de diseño en los que se contempla lograr almacenar el calor producido por el quemador para minimizar las pérdidas de calor, se realiza la construcción de un “Hogar” que alberga en su parte superior el reactor Pirolítico, que consiste en la construcción de un cajón que soporte al reactor y canalice la flama del quemador en su parte interior, según se observa en las imágenes de la Figura 57.

Durante la construcción del diseño planteado, se hace uso de tres unidades de Ladrillo comercialmente conocido como “Bloquelón” de las siguientes medidas: Largo: 800 mm, Ancho: 230 mm, Alto: 80 mm; compuestos de arcilla cocida, los cuales se unen en forma de “U” mediante mortero de pega (mezcla de cemento con arena), utilizando estructuras de alambre en los extremos entre cada bloque para prevenir que se despeguen las uniones de estos producto de la temperatura, las cuales se cubren con cemento para generar mayor rigidez. Se adicionan bloques de ladrillo de arcilla cocida de medidas: 210 mm x 65 mm x 110 mm, con el fin de dar la altura suficiente para generar la llama bajo el reactor.

Para permitir y controlar la correcta oxigenación de la flama, se utiliza un ladrillo tipo rejilla, el cual confina el calor generado, permitiendo el flujo de la corriente de aire a través del cajón del “Hogar” como se observa en la Figura 57, numeral a).

Figura 57.
Estructura de Conservación del Calor – Hogar Construida



Nota. a) Vista Frontal b) Vista Trasera c) y d) Vistas Isométricas del Sistema de Conservación de Calor-Hogar.

4.3. Construcción del Sistema Estructura - Bastidor

Para realizar la construcción de un sistema de soporte y fijación, donde se instala el reactor de

pirólisis y todos sus demás componentes periféricos, se dimensiona cada uno de estos, según se menciona en el Título 2.3.4, para agrupar todos los componentes, los cuales cumplen el criterio de utilización de materiales reciclados y reutilizables, en una estructura que sostiene y permita su fácil movilización sobre el suelo. Por tanto, se divide la construcción del Sistema de Estructura - Bastidor en los siguientes tres ítems: Estiba de madera, Marco de estructura – soporte y Ruedas de soporte.

4.3.1. Estiba de madera

Dentro de los materiales disponibles de desecho de las obras de adecuación de la Universidad de América, se encuentra una estiba de madera de construcción desechada, la cual se recoge, se limpia y se adapta, cortando una sección de ella para adecuarla a las siguientes dimensiones: Largo: 1330 mm y Ancho: 720 mm; para soportar en la parte superior el Sistema de Conservación de Calor– Hogar, el Reactor, y el Quemador de diésel, tal como se observa en la Figura 58 numeral a). Para prevenir el daño y deterioro de la madera producto de la intervención del agua del sistema de enfriamiento y el calor generado en el proceso, se recubre de “Pintura Epóxica Base Solvente”, además de mejorar la apariencia estética como se observa en la Figura 58, numeral b).

Figura 58.

Estiba de madera para el soporte de componentes del reactor



a)

b)

Nota. a) Fotografía de estiba de madera recogida de los desechos. b) Fotografía de estiba de madera adaptada para su uso como soporte del reactor.

4.3.2. Marco Estructura – Soporte

La estructura que contiene todos los componentes del Equipo, se construye utilizando los perfiles en L nombrados en la sección 2.3.4, de las siguientes especificaciones: Longitud de ala 31.7 mm (1 ¼"), espesor de 6.35 mm (¼"). La estructura tipo marco, contiene la Estiba de madera de dimensiones (Largo: 1330 mm y Ancho: 720 mm), ya que esta funciona como plataforma de los componentes del reactor, considerando un espacio adicional para contener el Intercambiador de Calor.

Acorde al estudio del análisis de cargas de la estructura del Título 3.1.2, se considera utilizar los perfiles en L disponibles, ya que además de tener las dimensiones necesarias en la construcción requerida (Longitud: 2000 mm por Ancho: 730 mm), el comportamiento del perfil en L ante las cargas aplicadas por los componentes según describe el literal, cumple los requisitos de diseño y utilización.

Se realizan cortes de los perfiles en L así: dos secciones de 2000 mm para los laterales y 2 secciones de 730 mm para los frontales, siguiendo la imagen de la Figura 59.. Estos cortes se realizan en ambos extremos de cada esquina en ángulo de 45°, sin la necesidad de realizar bisel sobre el acero, para su soldadura. Se suelda utilizando electrodo revestido titanio potasio E6013 en toda la sección en L del perfil, para lograr un marco de dimensiones: Largo 2000 mm, Ancho: 730 mm, Área: 1,46 m².

Figura 59.

Corte y disposición de perfiles en L para el marco de la estructura



Nota. Fotografía donde se aprecia el trabajo de corte y soldadura para la construcción del marco para la estructura de soporte.

4.3.3. Ruedas de soporte

Finalmente, como parte de la construcción del sistema de soporte, se tuvo en cuenta facilitar el movimiento del equipo como conjunto ensamblado sin tener que organizar sus componentes cada vez que se requiera realizar transporte o cambio de posición, por tanto, se adapta al marco de estructura – soporte 4 ruedas en los extremos de las siguientes características: Referencia comercial MPG4 080TXT4, Diámetro de Ruedas: 80mm, Material: plástico, Rotación: Balinera de giro, como las de la Figura 60. Para su instalación, se realizan 3 perforaciones en cada una de las esquinas de la estructura con broca de acero rápido de diámetro 7.93 mm ($\frac{5}{16}$ ”), para fijar las ruedas a la estructura por medio de 12 tornillos galvanizados de cabeza redonda de: 4.76 mm de diámetro nominal y 25.4 mm de longitud ($\frac{3}{16}$ ” – 13 UNC x $\frac{1}{2}$ ”); arandelas de $\frac{3}{16}$ ” y tuerca hexagonal de: diámetro 4.76 mm ($\frac{5}{16}$ ” – 13 UNC), como se puede apreciar en la Figura 61.

Figura 60.

*Ruedas de soporte con giro Referencia
MPG4 080 TXT4*



Nota. Fotografía de rueda de soporte seleccionada para movilidad del equipo. Tomado de: SanDoRobotics, [En Línea].

Disponible:

<https://sandorobotics.com/producto/sd-r13/>

[Acceso: noviembre 10, 2022].

Figura 61.

Instalación de ruedas al marco de la estructura de soporte



Nota. Fotografía de fijación de ruedas a la estructura inferior del marco.

4.4.Ensamble del Equipo de Pirólisis

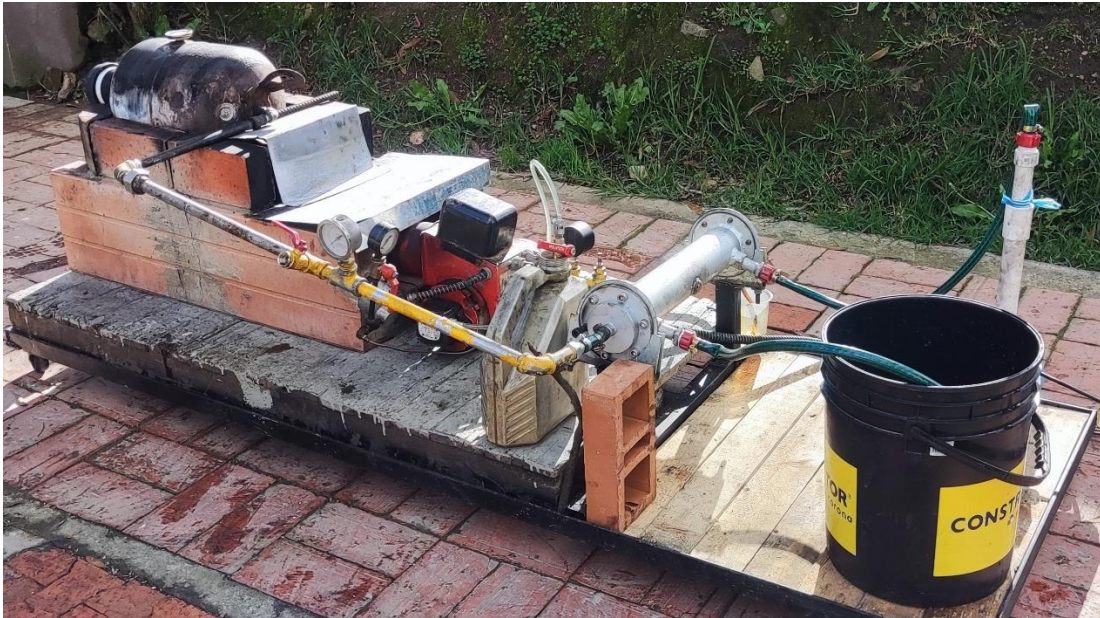
Para consolidar la construcción del conjunto de componentes que conforman el Reactor Piloto de

Pirólisis, una vez diseñados y construidos cada uno de los elementos que componen el equipo, se realiza el ensamble final, de forma que cumpla lo propuesto en el diagrama de procesos descrito en el Título 2.1, agrupando y posicionando los componentes en el lugar designado sobre la estructura – bastidor, acoplando los componentes entre sí, mediante las respectivas conexiones entre estos, siendo así el resultado final, un equipo que cumple con la función de degradar térmicamente los neumáticos fuera de uso bajo las condiciones de operación propuestas.

De acuerdo a lo descrito anteriormente, a continuación, se muestra en las imágenes de la Figura 62 el ensamble final del Equipo propuesto incluyendo los sistemas que intervienen en el proceso.

Figura 62.

Equipo reactor de pirólisis de NFU ensamblado



Nota. Fotografía de Equipo Reactor de Pirólisis ensamblado en estructura con todos sus componentes.

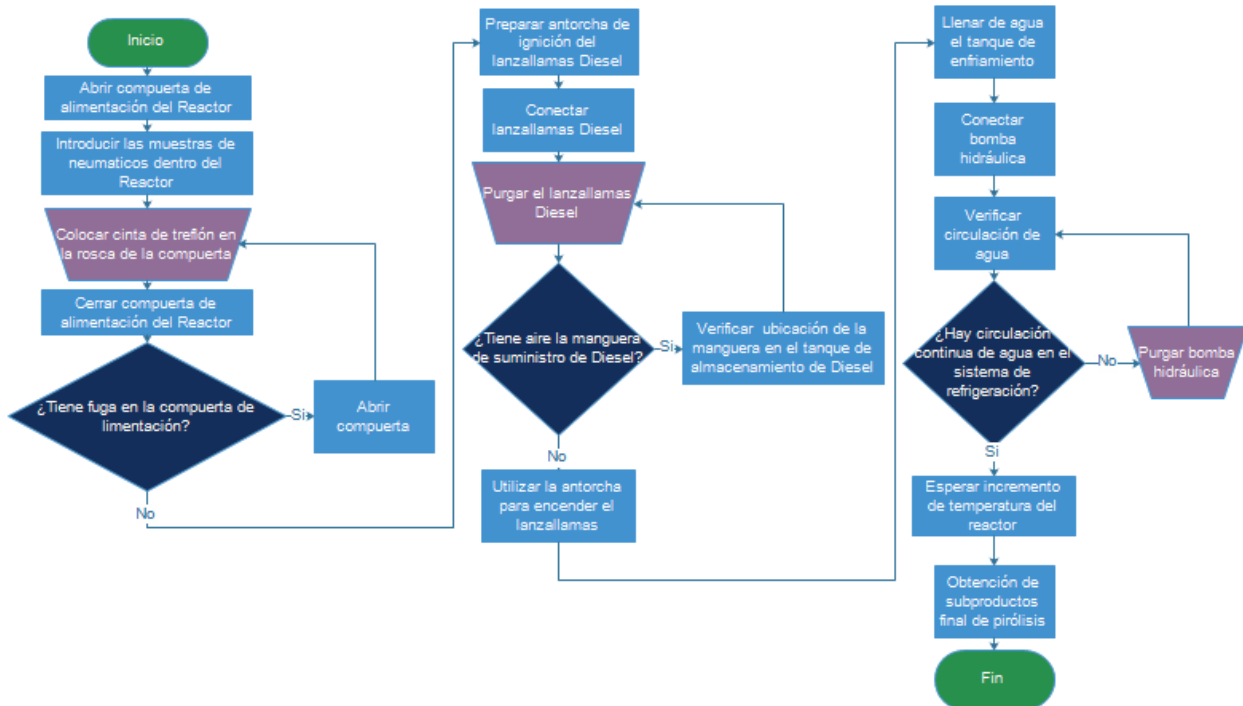
5. FUNCIONAMIENTO Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1. Diagrama de Procesos

El diagrama de la Figura 63, describe el proceso de puesta en marcha del Equipo Piloto de Pirólisis siguiendo la siguiente secuencia de pasos:

Figura 63.

Diagrama de proceso de funcionamiento del equipo de pirólisis



Nota. Proceso de puesta en marcha y funcionamiento del Reactor Pirolítico construido para procesar NFU.

5.2. Pruebas piloto y resultados

Para iniciar con las pruebas piloto del Equipo de Pirólisis, inicialmente se deben verificar las condiciones iniciales para la puesta en marcha del proceso, como la cantidad de materia prima que se procesará en cada prueba, comprobar el cierre hermético de la compuerta de alimentación para garantizar la ausencia de oxígeno al interior del reactor, determinar el correcto funcionamiento de los equipos periféricos del sistema, verificar el nivel de combustible de al menos un galón de diésel, conectar la bomba periférica para iniciar la circulación del sistema de enfriamiento del

Intercambiador de Calor.

Se pone en marcha el Equipo Piloto de Pirólisis, encendiendo el quemador de diésel para que se realice el aporte de calor al reactor durante la pirólisis, teniendo en cuenta las condiciones de seguridad del personal alrededor y evitando cualquier riesgo para quienes están encargados de acompañar la operación del equipo. Se verifica el incremento de temperatura al interior del reactor, ya que se debe superar la temperatura de 300 °C donde inician las reacciones de descomposición del proceso hasta la temperatura de trabajo de entre 400 a 450 °C y se procede con el registro de datos.

Durante las pruebas realizadas del funcionamiento del Equipo Piloto, se registran los resultados de forma satisfactoria. Las dos pruebas exitosamente completadas son registradas obteniendo la siguiente información:

5.2.1. Prueba Piloto No. 1

Para la primera prueba, se registraron los parámetros iniciales mostrados en la Tabla 20, obteniendo los resultados del post procesamiento mostrados en la Tabla 21.

Tabla 20.

Parámetros y datos iniciales de la prueba piloto No. 1

PARÁMETROS INICIALES:	VALOR	UNIDADES
Masa inicial de NFU sin secar	1104.74	g
Masa inicial de NFU después de secar	1084	g
Tiempo de secado en horno a 104°C	20	min
Humedad de las muestras de NFU	1.88	%
Tamaño inicial de NFU	30-50	mm
Temperatura ambiente	18	°C
Volumen inicial de combustible diésel	3.6	l

Nota. Datos iniciales tomados previamente a la puesta en marcha del proceso de pirólisis.

NOTA: Durante la primera prueba, no se registraron parámetros de entrada y salida del

Intercambiador de Calor, debido a dificultades que se tuvieron con el Sistema de Escape de Gases Pírolíticos, dificultades que fueron solucionadas para la segunda prueba.

Tabla 21.

Parámetros y resultados prueba piloto No. 1

TIEMPO DE LA PRUEBA	PARÁMETROS REACTOR		VOLUMEN LÍQUIDO CONDENSADO PRODUCIDO	INTENSIDAD DE FLAMA DEL GAS RECIRCULADO
	TEMPERATURA DE PRUEBA	PRESIÓN		
(min)	(°C)	(psi)	(ml)	
0	22	0	0	-
3	170	0	0	-
6	250	0	2	Humo
9	260	0	25	Leve
12	340	0	50	Alta
15	370	0.2	75	Alta
18	370	0.3	90	Alta
21	400	0.2	135	Alta
24	410	0.2	140	Alta
27	420	0.2	150	Alta
30	420	0.1	160	Alta
33	400	0.1	185	Alta
36	420	0.2	215	Alta
39	400	0.2	220	Media
42	400	0	235	Media
45	410	0	260	Baja
VOLUMEN TOTAL LÍQUIDO CONDENSADO			260 ml	

Nota. Datos registrados durante la prueba piloto del proceso de pirólisis.

A continuación, en la Tabla 22. se registran los resultados finales de la prueba No. 1:

Tabla 22.*Parámetros y resultados finales de prueba piloto No. 1*

PARÁMETROS FINALES:	VALOR	UNIDADES
Masa final fracción sólida (Negro de Humo)	459.1	g
Porcentaje en masa fracción sólida (Negro de Humo)	42.35	%
Volumen final fracción líquida (Aceite de Pirólisis)	260	ml
Densidad del aceite de pirólisis [58]	0.91	g/ml
Masa final fracción líquida (Aceite de Pirólisis)	236.6	g
Porcentaje en masa fracción líquida (Aceite de Pirólisis)	21.83	%
Porcentaje en masa fracción gaseosa (Gas de Pirólisis)	30.82	%
Porcentaje de volumen no recuperado, fugas, entre otros	5	%
Tempo total de la prueba	45	min
Volumen final de combustible diésel	1.3	l
Consumo de combustible	2.3	l

Nota. Datos finales posteriores a la prueba piloto del proceso de pirólisis.

5.2.2. Prueba Piloto No. 2

Para la segunda prueba, se registran los datos iniciales observados en la Tabla 23. Los resultados de parámetros y resultados de funcionamiento se registran en la Tabla 24.

Tabla 23.*Parámetros y datos iniciales de la prueba piloto No. 2*

PARÁMETROS INICIALES:	VALOR	UNIDADES
Masa inicial de NFU sin secar	1891.93	g
Masa inicial de NFU después de secar	1872.68	g
Tiempo de secado en horno a 104°C	30	min
Humedad de las muestras de NFU	1,017	%
Tamaño inicial de NFU	50-60	mm
Temperatura ambiente	15	°C
Volumen inicial de combustible diésel	3.8	l

Nota. Datos iniciales tomados previamente a la puesta en marcha del proceso de pirólisis.

Tabla 24.*Parámetros y resultado de la prueba piloto No. 2*

TIEMPO DE LA PRUEBA	PARÁMETROS REACTOR		VOLUMEN LÍQUIDO CONDENSADO PRODUCIDO	INTENSIDAD DE FLAMA DEL GAS RECIRCULADO	INTERCAMBIADOR DE CALOR		
	TEMPERATURA DE PRUEBA	PRESIÓN			TEMPERATURA DE ENTRADA CONDENSADO	TEMPERATURA DE SALIDA CONDENSADO	TEMPERATURA DE AGUA DE ENFRIAMIENTO
(min)	(°C)	(psi)	(ml)		(°C)	(°C)	(°C)
0	24	0	0	-	15	15	
3	270	0	0	-	15	28	
6	340	0	30	Humo	42	20	
9	310	0	80	Humo	58	25	
12	350	0	105	Baja	190	22	
15	395	0	190	Alta	195	27	28
18	385	0	265	Alta	138	27	24
21	360	0	295	Alta	138	25	24
24	389	0	320	Alta	160	27	
27	400	0,3	370	Alta	192	27	29
30	400	0,5	520	Alta	186	25	32
33	420	0,2	580	Alta	194	23	32
36	400	0,5	600	Alta	86	25	36
39	380	0,4	608	Media	64	23	33
42	380	0,2	615	Media	64	23	33
45	395	0,2	615	Baja	53	29	34
48	400	0	618	Baja	53	37	34
51	400	0	620	Muy Baja	52	35	34
VOLUMEN TOTAL LÍQUIDO CONDENSADO			620 ml				

Nota. Datos registrados durante la prueba piloto del proceso de pirólisis.

Finalmente, en la Tabla 25, se registran los datos de los parámetros y resultados finales obtenidos durante la prueba piloto No. 2 del funcionamiento del equipo.

Tabla 25.

Parámetros y resultados finales de la prueba piloto No. 2

PARÁMETROS FINALES:	VALOR	UNIDADES
Masa final fracción solida (Negro de Humo)	757.69	g
Porcentaje en masa fracción Solida (Negro de Humo)	40.46	%
Volumen final fracción liquida (Aceite de Pirólisis)	620	ml
Densidad del aceite de pirólisis [58]	0.91	g/ml
Masa final fracción liquida (Aceite de Pirólisis)	564.2	g
Porcentaje en masa fracción liquida (Aceite de Pirólisis)	30.13	%
Porcentaje en masa fracción gaseosa (Gas de Pirólisis)	29.41	%
Tiempo total de la prueba	51	min
Volumen final de combustible diésel	1.4	l
Consumo de combustible	2.4	l

Nota. Datos finales posteriores a la prueba piloto del proceso de pirólisis.

5.3. Análisis de resultados

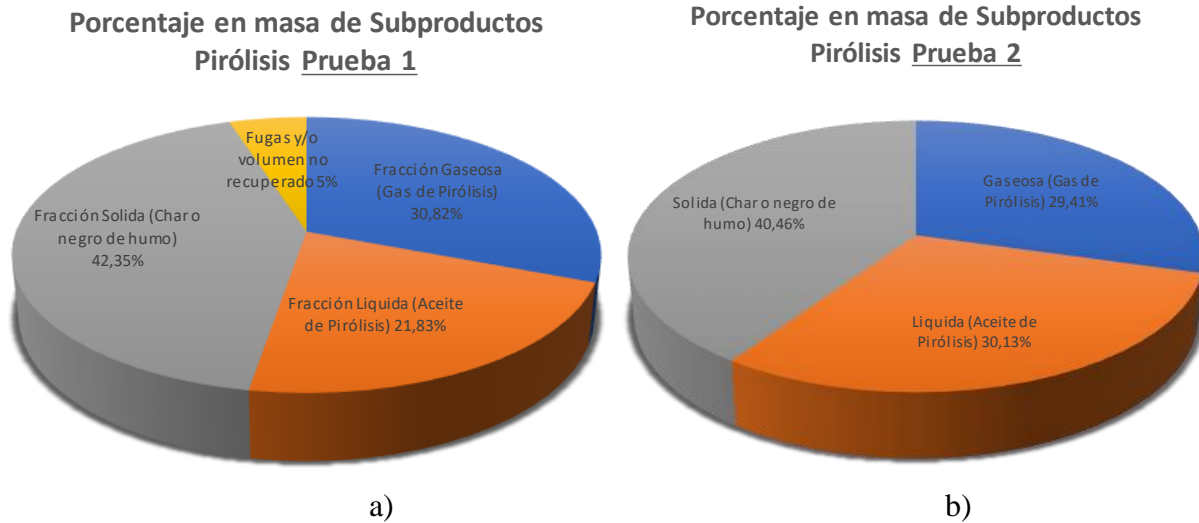
Como se puede observar en los resultados finales, referentes al proceso de pirólisis para las pruebas piloto, se obtienen los siguientes rendimientos para cada una de las fracciones correspondientes en sus subproductos, según se observa en la

Figura 64, donde podemos concluir que la pirolisis de los NFU, presenta un rendimiento promedio con respecto a los rendimientos reportados en el Título 1.2.4, confirmando la capacidad de transformación de los NFU mediante el proceso pirolítico del equipo.

Se observa una diferencia pronunciada entre los resultados obtenidos de la fracción líquida (aceite de pirólisis) entre la prueba 1 y la prueba 2, debida principalmente a las adecuaciones realizadas en el Sistema de Escape de Gases Pirolíticos. Por otro lado, las fracciones sólidas (negro de humo), presentan resultados similares entre las dos pruebas al comparar sus masas, dado que estas no se vieron afectadas por las adecuaciones.

Figura 64.

Gráficos de resultados de subproductos de pruebas piloto No 1 y 2



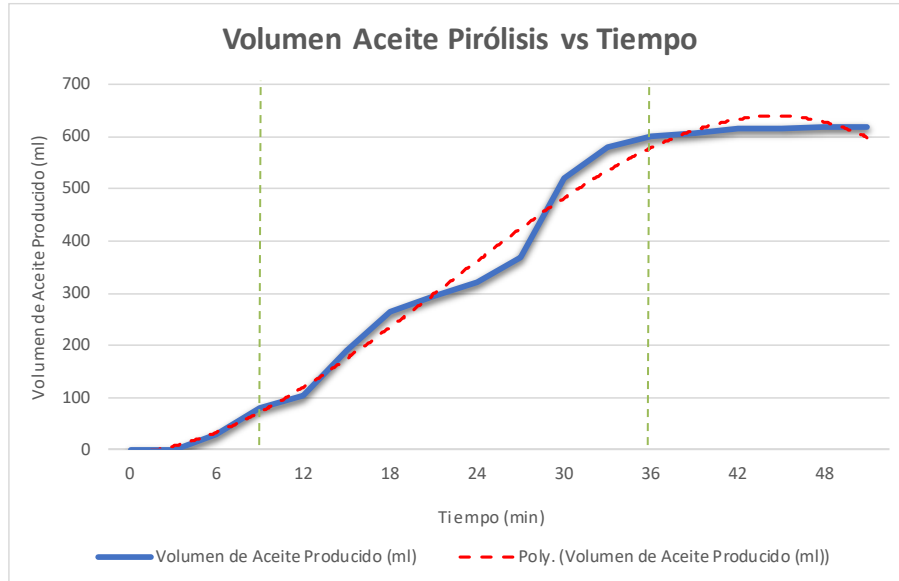
Nota. Diagrama de cantidad porcentual de subproductos del proceso de pirólisis para las pruebas piloto realizadas.

La Figura 65 muestra el volumen producido de aceite de pirólisis contra el tiempo de procesamiento. En ella se puede denotar como a los 4 minutos comienza a producir el aceite pirolítico, luego de la generación de los primeros gases del proceso que se daban a los 2.5 minutos.

El volumen máximo de aceite pirolítico producido es de 620 ml, con su mayor intervalo de producción entre los 12 a 33 minutos. Posteriormente, la señal que indica la finalización del proceso de pirólisis, se da a los 36 minutos, donde podemos observar una tendencia en la disminución de la producción, ya que solamente se produjo un 0,8% luego de los 42 minutos de la prueba, evidenciando el procesamiento casi total de la muestra de NFU inicialmente introducida.

Figura 65.

Volumen de aceite de pirólisis producido contra tiempo para la prueba No. 2



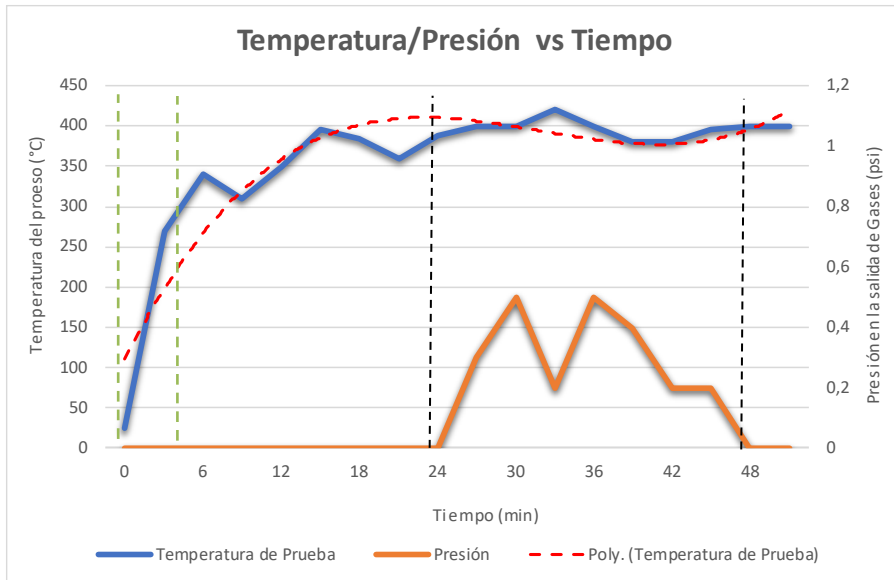
Nota. Gráfica de producción de aceite pirólitico con respecto al tiempo durante la prueba piloto No. 2.

Acorde a lo propuesto en el diseño conceptual de la Figura 66., se evidencia la velocidad de calentamiento de la prueba número 2 con respecto al tiempo. El marcado incremento en la temperatura desde el inicio del proceso hasta donde se estabiliza la temperatura de trabajo, nos indica la tasa de calentamiento que genera el quemador. La tasa de incremento hasta los 6 minutos de transcurrido el proceso se puede calcular en $0.903\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, lo cual corresponde a una tasa de calentamiento que se enmarca dentro del proceso de *Pirólisis Convencional* propuesto. De igual manera, se puede observar que el equipo alcanza una temperatura de trabajo entre los 380 y $420\text{ }^{\circ}\text{C}$ para realizar el proceso.

Por otro lado, se puede observar en los resultados que la presión del sistema se mantuvo a condiciones de presión de trabajo atmosféricas, con muy ligeros incrementos inferiores a 0.3 psi , lo cual está dentro del rango de trabajo contemplado para la ejecución del proceso.

Figura 66.

Incremento de temperatura y presión contra tiempo de procesamiento para la prueba No. 2



Nota. Gráfica de comportamiento de la temperatura y presión del Reactor de Pirólisis durante la prueba piloto No. 2.

6. ANALISIS FINANCIERO

6.1. Costos de fabricación

Para el diseño y fabricación del Reactor Piloto de Pirólisis, se ejecutó un total de \$5.462.422 pesos, divididos entre los costos de fabricación, los costos por mano de obra y los costos por operación de las pruebas piloto realizadas, como se muestra en la Tabla 26. Algunos de los costos ejecutados se consideran nulos, debido a que provienen de materiales reutilizables y/o reciclables, por lo cual en la Tabla 27 se describe su costo comercial, a pesar de no haber sido causados dentro del presupuesto final.

Tabla 26.

Costos totales por fabricación de reactor piloto de pirólisis

ITEM	Costo total ITEM
Gastos de materiales y fabricación (sin incluir los materiales no causados por ser de reutilización o reciclaje)	\$ 1.395.520
Mano de Obra - Talento Humano	\$ 4.020.000
Funcionamiento – Experimentación y Pruebas	\$ 46.902
Total	\$ 5.462.422

Nota. Valores por concepto de costo de fabricación del reactor teniendo en cuenta material reciclado, mano de obra e insumos para la realización de pruebas piloto.

Los costos de realización del proyecto tienen como fin la demostración del potencial del proceso de pirólisis aplicado a los neumáticos fuera de uso como alternativa de revalorización de residuos en la ciudad de Bogotá. Es importante aclarar que los costos ejecutados del proyecto se justifican bajo el marco experimental, con el fin de crear alternativas de diseños futuros y su ejecución, buscando la optimización del proceso. Adicionalmente, demuestra que los ciclos de reutilización y reciclaje, pueden beneficiar y mejorar la viabilidad de los proyectos en cuanto a la reducción de costos por materiales de fabricación.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, a continuación, se presenta el detalle de los costos aquí totalizados:

6.1.1. Costo de materiales

En la Tabla 27 se presenta el costo comercial de los diferentes ítems de materiales necesarios para la realización del Reactor Piloto de Pirólisis.

Tabla 27.

Costos por concepto de diseño y fabricación de reactor piloto de pirólisis

ITEMS	UNIDADES	\$ / UNIDAD	CANTIDAD	TOTAL (\$)
Gastos maquinaria y equipo				
Taller de máquinas y herramientas	Horas	\$ 12.000	20	\$ 240.000
Trabajo de soldadura	Horas	\$ 40.000	2	\$ 80.000
Computadora 1	Horas	\$ 500	192	\$ 96.000
Computadora 2	Horas	\$ 500	192	\$ 96.000
Software – Solid Edge	Horas	\$ 2.000	40	\$ 80.000
Total: Maquinaria y Equipo				\$ 592.000
Gastos accesorios y otros				
Internet	Días	\$ 3.300	60	198.000
Impresiones	Hoja	\$ 400	200	80.000
Luz	kW*h	\$ 266	500	132.900
Transporte	Horas	\$ 15.000	10	150.000
Electrodos Soldadura E6013	0,5 kg	\$ 1	12.000	12.000
Mangueras PVC-Nylon	Metro	\$ 4.200	6	25.200
Abrazaderas	Unidad	\$ 1.790	8	14.320
Ladrillo cocido	Unidad	\$ 6	900	5.400
Ladrillo rejilla	Unidad	\$ 1	1.000	1.000
Ladrillo bloquelón	Unidad	\$ 4.900	3	14.700
Mortero	½ bulto	\$ 15.800	1	15.800
Sensor de temperatura	Unidad	\$ 26.600	1	26.600
Tapón Galvanizado 3"	Unidad	\$ 45.000	1	45.000
Niple Galvanizado 3"	Unidad	\$ 24.000	1	24.000
Cople 1/8" x 1/4"	Unidad	\$ 8.000	1	8.000
Tornillos 3/16" UNC	Unidad	\$ 500	12	6.000
Arandelas 3/16"	Unidad	\$ 200	12	2.400
Tuerca Hex 3/16" UNC	Unidad	\$ 300	12	3.600
Ruedas MPG4 080TXT4	Unidad	\$ 8.000	4	32.000
Cinta de Teflón	Unidad	\$ 2.200	3	6.600
Total: Accesorios y otros				\$ 803.520

ITEMS	UNIDADES	\$/ UNIDAD	CANTIDAD	TOTAL (\$)
Gastos accesorios y otros (No causados por ser de reutilización o reciclaje)				
Ladrillo cocido reutilizados	Unidad	\$ 900	20	18.000
Niple 1/4" x 20 mm	Unidad	\$ 4.500	2	9.000
Codo 1/4"	Unidad	\$ 8.000	1	8.000
Conector 1/4" a 3/8"	Unidad	\$ 10.900	1	10.900
Niple 3/8" x 300 mm	Unidad	\$ 16.000	1	16.000
Bushing 3/8" a 1/2"	Unidad	\$ 8.450	1	8.450
Codo 1/2"	Unidad	\$ 5.800	2	11.600
Niple 1/2" 200 mm	Unidad	\$ 6.700	1	6.700
Te 1/2"	Unidad	\$ 7.100	2	14.200
Niple 1/2" x 550mm	Unidad	\$ 19.000	1	19.000
Niple 1/2" x 40mm	Unidad	\$ 2.200	2	4.400
Niple 1/2" x 60mm	Unidad	\$ 2.700	1	2.700
Válvula Bola 1/2"	Unidad	\$ 22.900	1	22.900
Galón combustible	Unidad	\$ 500	1	500
Varilla corrugada 12mm	m	\$ 8.000	3	24.000
Manómetro de Presión 0-30 psi	Unidad	\$ 25.200	1	25.200
Estiba de madera	Unidad	\$ 90.000	1	90.000
Cilindro	Unidad	\$ 100.000	1	100.000
Pintura epóxica	1/8 gal	\$ 23.000	1	23.000
Quemador diésel	Unidad	\$ 200.000	1	200.000
Perfil en ángulo L 1 1/4"x1 1/4"x1/4"	Unidad/6m	\$ 57.150	1	57.150
Broca 5/16"	Unidad	\$ 3.500	1	3.500
Bomba periférica 0,5 HP 110 v	Unidad	\$ 139.000	1	139.000
Balde plástico 5 gal	Unidad	\$ 19.900	1	19.900
Tablas madera	Unidad	\$ 3.000	7	21.000
Total: Accesorios y otros (No causados por ser de reutilización o reciclaje)				\$ 855.100
Total: Gastos de materiales y fabricación				\$ 2.250.620
Total: Gastos de materiales y fabricación (sin incluir los materiales no causados por ser de reutilización o reciclaje)				\$ 1.395.520

Nota. Tabla donde se consignan las cantidades y valores por concepto de gastos relacionados a la construcción del equipo.

6.1.2. Costo de mano de obra

En la Tabla 28 se presenta el costo de los diferentes ítems de mano de obra, necesarios para la

implementación del Reactor Piloto de Pirólisis.

Tabla 28.

Costos por concepto de mano de obra de personal involucrado en el proyecto

ITEMS	UNIDADES	\$ / UNIDAD	CANTIDAD	TOTAL (\$)
Talento Humano				
Investigador 1	Horas	\$ 8.000	180	\$ 1.440.000
Investigador 2	Horas	\$ 8.000	180	\$ 1.440.000
Director	Horas	\$ 50.000	22	\$ 1.100.000
Colaboradores semillero de investigación	Horas	\$ 4.000	10	\$ 40.000
Total: Mano de Obra				\$ 4.020.000

Nota. Tabla donde se consignan los valores causados por mano de obra del equipo durante la construcción del proyecto.

6.1.3. Costos de funcionamiento

En la Tabla 29 se presenta el costo de funcionamiento para la experimentación y pruebas desarrolladas, necesarios durante las pruebas piloto del Reactor de Pirólisis.

Tabla 29.

Costos por concepto de experimentación y pruebas piloto realizadas

ITEMS	UNIDADES	\$ / UNIDAD	CANTIDAD	TOTAL (\$)
Costos de funcionamiento				
Combustible diésel	gal	\$ 10.900	4	\$ 43.600
Neumáticos fuera de uso	kg	\$ -	8,5	\$ -
Electricidad	kW*h	\$ 266	9	\$ 2.392
Agua	m ³	\$ 4.548	0,2	\$ 910
Total: Costos por funcionamiento				\$ 46.902

Nota. Tabla donde se consignan los valores causados por funcionamiento del equipo durante las dos pruebas piloto realizadas.

7. CONCLUSIONES

Se demostró la viabilidad del proceso de pirólisis como una alternativa a los sistemas actuales de disposición de neumáticos fuera de uso, no únicamente como alternativa de reutilización, sino como alternativa de revalorización de estos, a través del reaprovechamiento de sus compuestos.

Se puede considerar la pirólisis, como un proceso factible, ya que, bajo un debido acondicionamiento de los equipos, la fracción gaseosa obtenida del proceso se puede optimizar para ser aprovechada como fuente de aporte de energía al sistema, disminuyendo el uso de combustibles adicionales, es decir como fuente de auto regeneración de calor.

Los 3 subproductos obtenidos a partir del proceso de pirólisis son productos de alta demanda y utilidad tanto a nivel comercial como a nivel industrial, demostrando así la viabilidad de una alternativa de economía circular como proceso de alto aporte a la producción al obtener ganancias de un residuo, no sin antes confirmar que requieren de procesos adicionales o pre tratamientos para su revalorización.

Se logró efectuar una demostración de funcionamiento y resultados de proceso sin tener que incurrir en altos costos, utilizando materiales reciclados y equipos en desuso, con una reducción de costos del 38%.

Las pruebas realizadas demuestran que el mayor rendimiento fue para la fracción sólida obtenida del proceso (40.46%), seguida de la fracción líquida (30,13%), demostrando así que la Pirólisis Convencional, efectivamente favorece el rendimiento de la producción de sólidos sobre los otros dos subproductos, dada su baja velocidad de calentamiento 2 °C/s.

Es importante destacar que la realización de este proyecto trae como consecuencia la creación de una conciencia social orientada al reciclaje y reutilización, sentando bases importantes para la futura investigación y desarrollo de proyectos en la Universidad de América, lo cual permite atacar problemáticas de carácter mundial siguiendo los fundamentos de la Ingeniería.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] MADS, “Nuestra meta será llegar a reciclar el 90% de las llantas usadas en el país”: Minambiente,” 2016. [En línea]. Disponible: <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/noticias-minambiente/2417-nuestra-meta-sera-llegar-a-reciclar-el-90-de-las-llantas-usadas-en-el-pais-minambiente> [Accedido 11-sept-2022].
- [2] Secretaría Distrital de Movilidad, "Movilidad en cifras 2015," Página de la Secretaría de Movilidad, 2017. [En línea]. Disponible: https://www.movilidadbogota.gov.co/web/SIMUR/ARCHIVOS/Movilidad_Cifras_2015_V4_marzo2017.pdf. [Accedido 3-sept-2022].
- [3] Michelin, “¿Necesito llantas nuevas para mi vehículo?,” 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.michelin.com.co/auto/consejos-y-asesoria/consejos-automoviles/cuando-debo-cambiar-mis-llantas#:~:text=Diez%20a%C3%B1os%20es%20el%20lapso,de%20la%20banda%20de%20rodamiento> [Accedido 20-nov-2022].
- [4] Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, “Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de llantas y neumáticos usados generados por el parque automotor de Santa Fe de Bogotá,” Bogotá, D.C., 2008. [En línea]. Disponible: <https://ambientebogota.gov.co/documents/10184/506375/Diagn%C3%B3stico+ambiental+sobre+el+manejo+actual+de+llantas+y+neum%C3%A1ticos+usados+generados+por+el+parque+automotor+de+Santa+Fe+de+Bogot%C3%A1..pdf/cb9ec01a-7724-48ab-b8b4-6744aacfb95>. (Accedido 14-sept-2022).
- [5] R. Finders, “Glosario de Términos - Neumático.” [En línea]. Disponible: <https://rentingfinders.com/> [Accedido 11-nov-2022].
- [6] J. L. Carrión N, "Proceso de fabricación de las llantas de caucho," Industrial Data, vol. 2, (2),

1999. [En línea]. Disponible:
<https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/idata/article/view/6525>. DOI:
<https://DOI.org/10.15381/idata.v2i2.6525>.

[7] P. A. Peñaherrera W, "Aplicación de la herramienta single minute exchange of die (SMED) en el proceso de extrusión de la planta de preparación de la empresa Continental Tire Andina S.A." p. 152, Jul. 2013. [En línea]. Disponible:
<https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/3689/1/tesis.pdf>.

[8] G. Mikell P, Fundamentos de manufactura moderna: Tecnología del procesamiento del caucho (hule). McGraw Hill Interamericana, 2007, pp. 307–310.

[9] G. P. Palma F, "Reciclaje mecano-químico de desechos de látex de caucho natural vulcanizado," Escuela Politécnica Nacional, 2016. [En línea]. Disponible:
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/16694/1/CD-7292.pdf>

[10] Mariano, "Tecnología de los Plásticos," 2014. [En línea]. Disponible:
<https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/>. [Accedido 11-nov-2022].

[11] P. Bolufer, "El centenario del caucho sintético," 2009. [En línea]. Disponible:
<https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/35872-El-centenario-del-caucho-sintetico.html>. [Acceso 8-Ago-2022]

[12] DNP, "Capítulo Petroquímica - Caucho," Bogotá, D.C., Colombia, pp. 328–342, 2003 [En Línea]. Disponible:
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Desarrollo%20Empresarial/Caucho.pdf>. [Acceso: 4-mar-2022]

[13] J. D. Mendevil B, "Simulación del proceso de producción de negro de humo utilizando el programa UNISIM," Universidad de San Buenaventura Seccional Cartagena, 2012 [En línea]. Disponible:

http://bibliotecadigital.usb.edu.co/bitstream/10819/2238/1/Simulaci%C3%B3n%20del%20proceso%20de%20producci%C3%B3n_Jos%C3%A9%20Daniel%20Mendivil%20Blanco_USBCTG_2012.pdf

- [14] TIRES S.p.A., “Neumático Acero Alambre.” [En línea]. Disponible: <http://www.tiresspa.com/es/neumatico-acero-alambre.html>. [Acceso: 11-nov-2022]
- [15] L. D. Beliczky y J. Fajen, “Capítulo 80 - Industria del caucho,” vol. 3, pp. 80.4-80.6 [En línea]. Disponible: <http://bibliotecadigital.iplace.cl/handle/123456789/78700>. [Acceso: 11-abr-2022]
- [16] A. Zarini, “Alternativas de reutilización y reciclaje de neumáticos en desuso,” Instituto Tecnológico de Buenos Aires, 2011.
- [17] P. A. Delarze D, "Reciclaje de neumáticos y su aplicación en la construcción.", Universidad Austral de Chile, 2008.
- [18] Cámara de Comercio de Bogotá, “Guía para el manejo de llantas usadas. Un sector transporte con operación más limpia,” 2006. [En línea]. Disponible: <https://bibliotecadigital.ccb.org.co/handle/11520/14583>. [Acceso: mar-2022].
- [19] Corte Constitucional, Constitución Política de Colombia. 1991 [En línea]. Disponible: http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/constitucion_politica_1991.html.
- [20] MAVDT. Resolución 1457 de 2010. 2010 [En línea]. Disponible: https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Programa_posconsumo_existente/RESOLUCION_1457_de_2010_llantas.pdf
- [21] Alcaldía de Bogotá, "Decreto 442 de 2015," 2015. [En línea]. Disponible: <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=63644&dt=S>

- [22] Sistema Verde, “Posconsumo de Llantas,” 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.sistemaverde.com.co/servicios/posconsumo-de-llantas>. [Acceso 11-Nov-2022]
- [23] Semana, “Para las llantas usadas si hay una vida después de la muerte,” 2017 [En línea]. Disponible: <https://www.semana.com/pais/articulo/reciclaje-de-llantas-usadas-en-colombia/249688/>
- [24] A. Sanchis P, A. Veses, J. D. Martínez, T. García, y R. Murillo, “Hacia la economía circular del negro de carbono por medio de la pirólisis de neumáticos fuera de uso.” Zaragoza, España, 2022 [En línea]. Disponible: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://digital.csic.es/bitstream/10261/282449/1/BoletinGEC_065-art1.pdf
- [25] S. Amar Gil, A. N. Ardila Arias, y R. Barrera Zapata, “Simulación y obtención de combustibles sintéticos a partir de la pirólisis de residuos plásticos,” vol. 37, no. 2, 2019 [En línea]. Disponible: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-34612019000200306
- [26] X. Elias y E. Velo, “Tratamiento y Valorización energética de residuos, La Pirolisis”. España: Diaz de Santos, 2005, pp. 477–538.
- [27] D. Chivata y C. Duarte, “Diseño conceptual de una planta para el aprovechamiento de caucho molido de neumáticos usados a partir de Pirólisis,” Fundación Universidad de América, Bogota, D.C., 2018 [En línea]. Disponible: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6705/1/6131974-2018-1-IQ.pdf>
- [28] S. Mejía y S. Upegui, “La pirólisis y otros métodos para el aprovechamiento de residuos de neumáticos como de energía para la industria,” no. 13, pp. 48–52, 2021 [En línea]. Disponible: <https://ojs.tdea.edu.co/index.php/cuadernoactiva/article/download/728/1361/3672>
- [29] M. Raza et al., “Progress of the Pyrolyzer Reactors and Advanced Technologies for Biomass

- Pyrolysis Processing,” vol. 13, no. 19, p. 11061, Oct. 2021, DOI: 10.3390/su131911061. [En línea]. Disponible: <https://search.proquest.com/docview/2581067432>
- [30] M. E. Davis y R. J. Davis, “Fundamentals of chemical reaction engineering”. Boston: McGraw-Hill, 2003 [En línea]. Disponible: <http://www.loc.gov/catdir/description/mh024/2002025525.html>
- [31] C. J. Ellens, “Design, optimization and evaluation of a free-fall biomass fast pyrolysis reactor and its products,” ProQuest Dissertations Publishing, 2009 [En línea]. Disponible: <https://search.proquest.com/docview/304905744>
- [32] Btg Bioliquids, “Btg Bioliquids B V Files Patent Application for Pyrolysis Reactor,” 13-Sep-2010.
- [33] W. D. Fonseca J, “Evaluación de un reactor de lecho fluidizado en el proceso de pirólisis catalítica usando desecho de caucho de llanta,” Universidad de Los Andes, 2016 [En línea]. Disponible: https://explore.openaire.eu/search/publication?articleId=od_____3056::82f60ba517a595ce4582f6dabd40dfd8
- [34] A. Sanchis, A. Veses, J. D. Martinez, T. Garcia, y R. Murillo, “Hacia una economía circular del carbono por medio de la pirolisis de neumáticos fuera de uso,” vol. 65, pp. 5–12, 2022 [En línea]. Disponible: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8583096>
- [35] S. Arya, A. Sharma, M. Rawat y A. Agrawal, “Tyre pyrolysis oil as an alternative fuel: A review,” vol. 28, pp. 2481–2484, 2020, DOI: 10.1016/j.matpr.2020.04.797. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320334519>
- [36] H. Aydın y C. İlkılıç, “Optimization of fuel production from waste vehicle tires by pyrolysis and resembling to diesel fuel by various desulfurization methods,” vol. 102, pp. 605–612, 2012, DOI: 10.1016/j.fuel.2012.06.067. [En línea]. Disponible:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236112004875>

- [37] M. Islam, M. Joardder, S. Hasan, K. Takai y H. Haniu, “Feasibility study for thermal treatment of solid tire wastes in Bangladesh by using pyrolysis technology,” vol. 31, no. 9, pp. 2142–2149, 2011, DOI: 10.1016/j.wasman.2011.04.017. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X11002157>
- [38] D. Leung y C. Wang, “Kinetic study of scrap tyre pyrolysis and combustion,” vol. 45, no. 2, pp. 153–169, 1998, DOI: 10.1016/S0165-2370(98)00065-5. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237098000655>.
- [39] A. M. Cunliffe y P. T. Williams, “Composition of oils derived from the batch pyrolysis of tyres,” vol. 44, no. 2, pp. 131–152, 1998, DOI: 10.1016/S0165-2370(97)00085-5. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237097000855>.
- [40] C. Roy, A. Chaala y H. Darmstadt, “The vacuum pyrolysis of used tires: End-uses for oil and carbon black products,” vol. 51, no. 1, pp. 201–221, 1999, DOI: 10.1016/S0165-2370(99)00017-0. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237099000170>
- [41] E. Aylón et al, “Valorisation of waste tyre by pyrolysis in a moving bed reactor,” vol. 30, no. 7, pp. 1220–1224, 2010, DOI: 10.1016/j.wasman.2009.10.001. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X09004231>
- [42] P. T. Williams and A. J. Brindle, “Catalytic pyrolysis of tyres: influence of catalyst temperature,” vol. 81, no. 18, pp. 2425–2434, 2002, DOI: 10.1016/S0016-2361(02)00196-5. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236102001965>
- [43] S. Galvagno et al, “Pyrolysis process for the treatment of scrap tyres: preliminary experimental results,” vol. 22, no. 8, pp. 917–923, 2002, DOI: 10.1016/S0956-

- 053X(02)00083-1. [En línea]. Disponible:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X02000831>
- [44] N. Gao et al, “Tire pyrolysis char: Processes, properties, upgrading and applications,” vol. 93, p. 101022, 2022, DOI: 10.1016/j.pecs.2022.101022. [En línea]. Disponible:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128522000314>
- [45] E. L. K. Mui, W. H. Cheung y G. McKay, “Tyre char preparation from waste tyre rubber for dye removal from effluents,” vol. 175, no. 1, pp. 151–158, 2010, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.09.142. [En línea]. Disponible:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389409016033>
- [46] A. Tuta, “Evaluación técnico financiera de la producción de aceite crudo partiendo del aprovechamiento de residuos plásticos post industriales tipo PP (Polipropileno) a través del proceso de pirolisis en la empresa IPSA S.A.S.”, Fundación Universidad de América, Bogotá, D.C., 2020 [En línea]. Disponible:
<https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/8179>. [Acceso: 15-sept-2022]
- [47] A. INTERNACIONAL, “ASTM D3173-03 Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke,” vol. 05.06. 2012 [En línea]. Disponible:
<https://www.astm.org/d3173-03.html>. [Acceso: 2022]
- [48] D. A. Taleb et al, “Insights into pyrolysis of waste tire in fixed bed reactor: Thermal behavior,” vol. 31, pp. 178–186, 2020, DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.569. [En línea]. Disponible:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320306799>
- [49] C. Berrueco et al, “Pyrolysis of waste tyres in an atmospheric static-bed batch reactor: Analysis of the gases obtained,” vol. 74, no. 1, pp. 245–253, 2005, DOI: 10.1016/j.jaap.2004.10.007. [En línea]. Disponible:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237004001068>

- [50] G. Choi et al, "Total utilization of waste tire rubber through pyrolysis to obtain oils and CO₂ activation of pyrolysis char," vol. 123, pp. 57–64, 2014, DOI: 10.1016/j.fuproc.2014.02.007. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037838201400068X>.
- [51] A. Alsaleh y M. L. Sattler, "Waste Tire Pyrolysis: Influential Parameters and Product Properties," vol. 1, no. 4, pp. 129–135, 2014, DOI: 10.1007/s40518-014-0019-0. [En línea]. Disponible: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40518-014-0019-0>
- [52] G. T. Bolivar R y M. P. Cuenca M, "evaluación del proceso de pirólisis como alternativa de valorización para la rebaba de caucho en Croydon Colombia S.A." , Fundación Universidad de América, 2019.
- [53] N. Mejía, "Negro de Humo," 2018. [En línea]. Disponible: <https://alsum.co/handbook/negro-de-humo/>. [Acceso: 2022]
- [54] J. N. Brown, "Development of a lab-scale auger reactor for biomass fast pyrolysis and process optimization using response surface methodology," Iowa State University Digital Repository, 2009 [En línea]. Disponible: <https://lib.dr.iastate.edu/etd/10996>
- [55] X. E. Castells, Tratamiento y valoración energética de residuos. Ediciones Díaz de Santos, S.A., 2005, pp. 477–537.
- [56] S. Secretaría de Energía, "Lista de combustibles y sus poderes caloríficos 2021 que se considerarán para identificar a los usuarios con un patrón de alto consumo, así como los factores para determinar las equivalencias en términos de barriles equivalentes de petróleo," 2021. [En línea]. Disponible: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/619062/Lista_Combustibles_2021_26feb2021.pdf. [Acceso: 2022]
- [57] R. Mott, Diseño de elementos de máquinas. (4ta edición ed.) México: Pearson, 2009.

[58] P. T. Williams, “Pyrolysis of waste tyres: A review,” vol. 33, no. 8, pp. 1714–1728, 2013,
DOI: 10.1016/j.wasman.2013.05.003. [En línea]. Disponible:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X13002122>

GLOSARIO

CALANDRADO: proceso utilizado en la fabricación de llantas para unir la capa interna de caucho con la capa de tela en forma de láminas, mediante el aprisionamiento de capas por el paso a través de la calandria, al pasar por diferentes rodillos cilíndricos que reducen el espesor de las láminas.

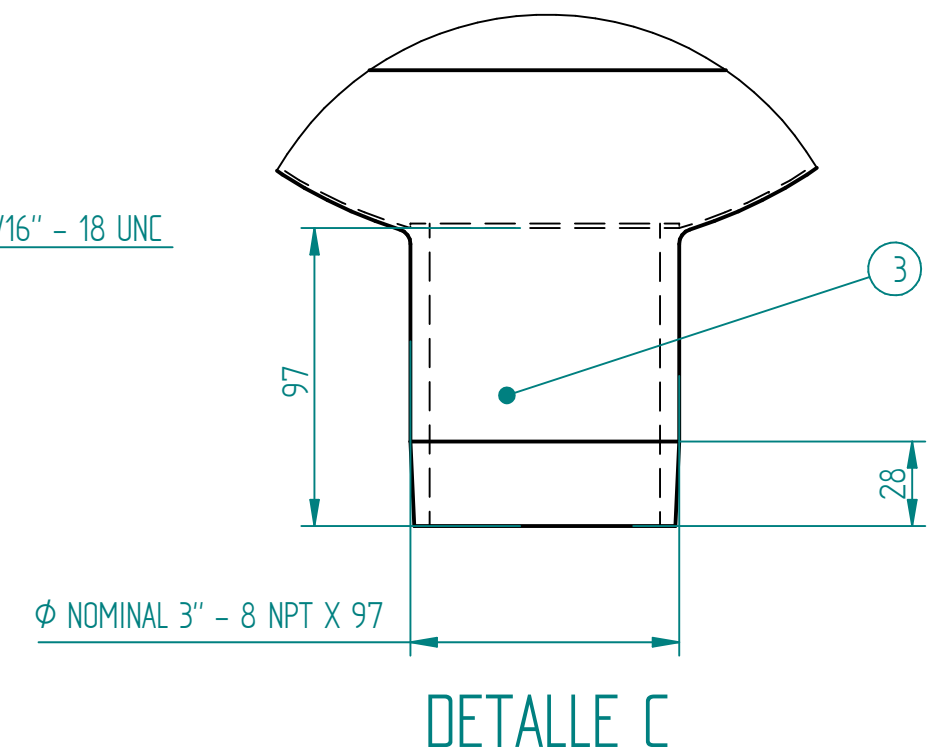
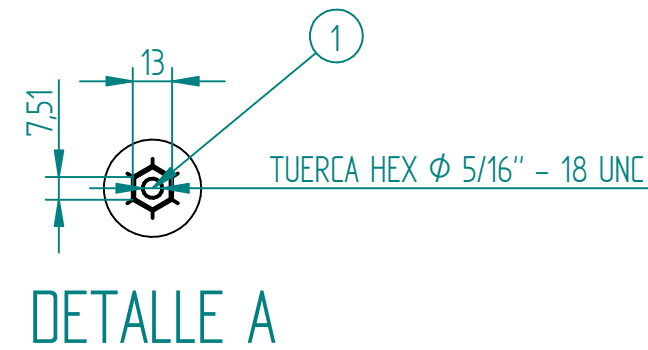
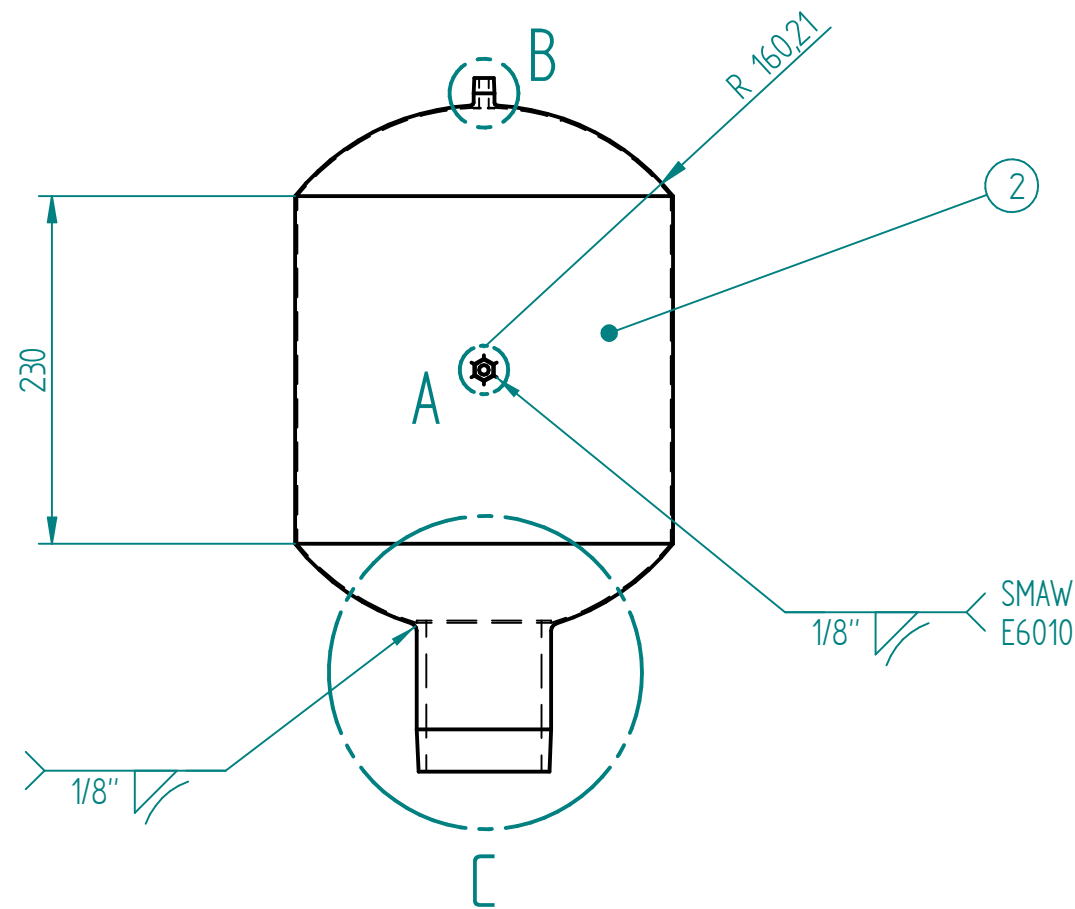
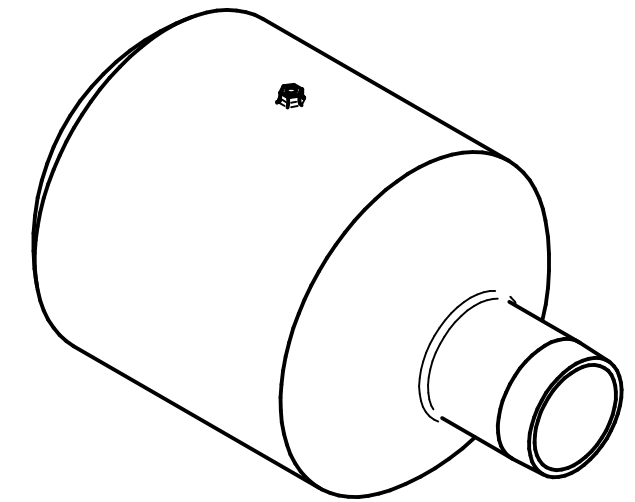
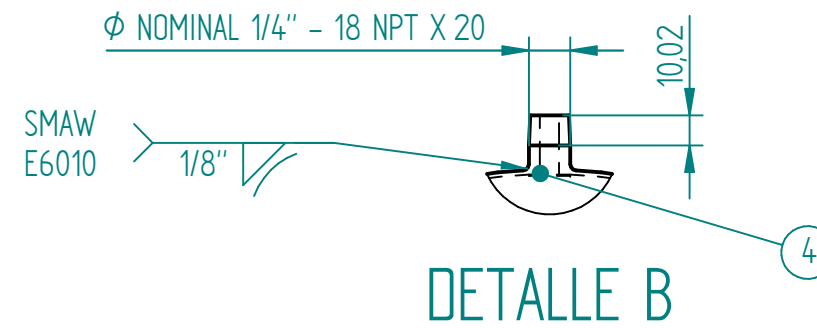
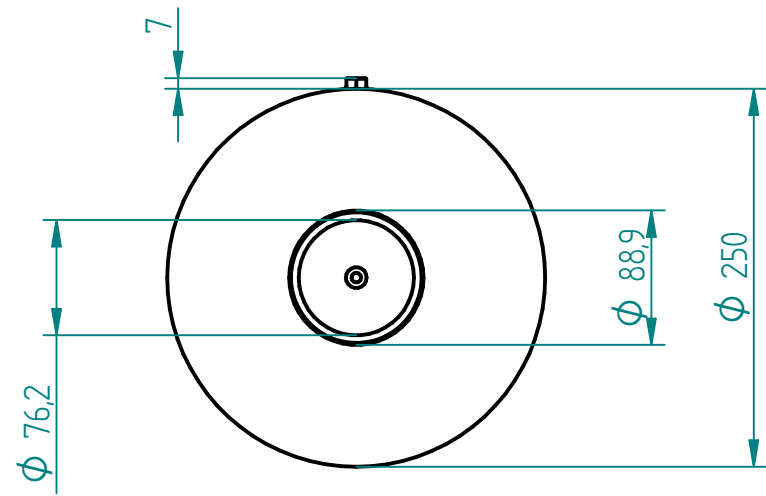
COMBUSTIBLE TDF: combustible derivado de neumáticos de desecho triturados, ampliamente utilizado como fuente de generación de calor para producir energía en hornos de hormigón, plantas de energía o fábricas.

TERMOGRAVIMETRÍA: técnica de evaluación de la degradación térmica de la materia orgánica en función variables como la temperatura y la tasa de calentamiento, teniendo en cuenta los parámetros cinéticos y mecanismos de reacción de descomposición.

VULCANIZACIÓN: corresponde a la formación de entrecruzamientos químicos entre cadenas de polímeros mezclando cantidades pequeñas de azufre y otros productos químicos con el caucho natural que luego se calientan incrementando la resistencia y la rigidez, pero manteniendo la elasticidad.

ANEXOS

ANEXO 1.
PLANO DETALLADO – SISTEMA REACTOR DE PIRÓLISIS

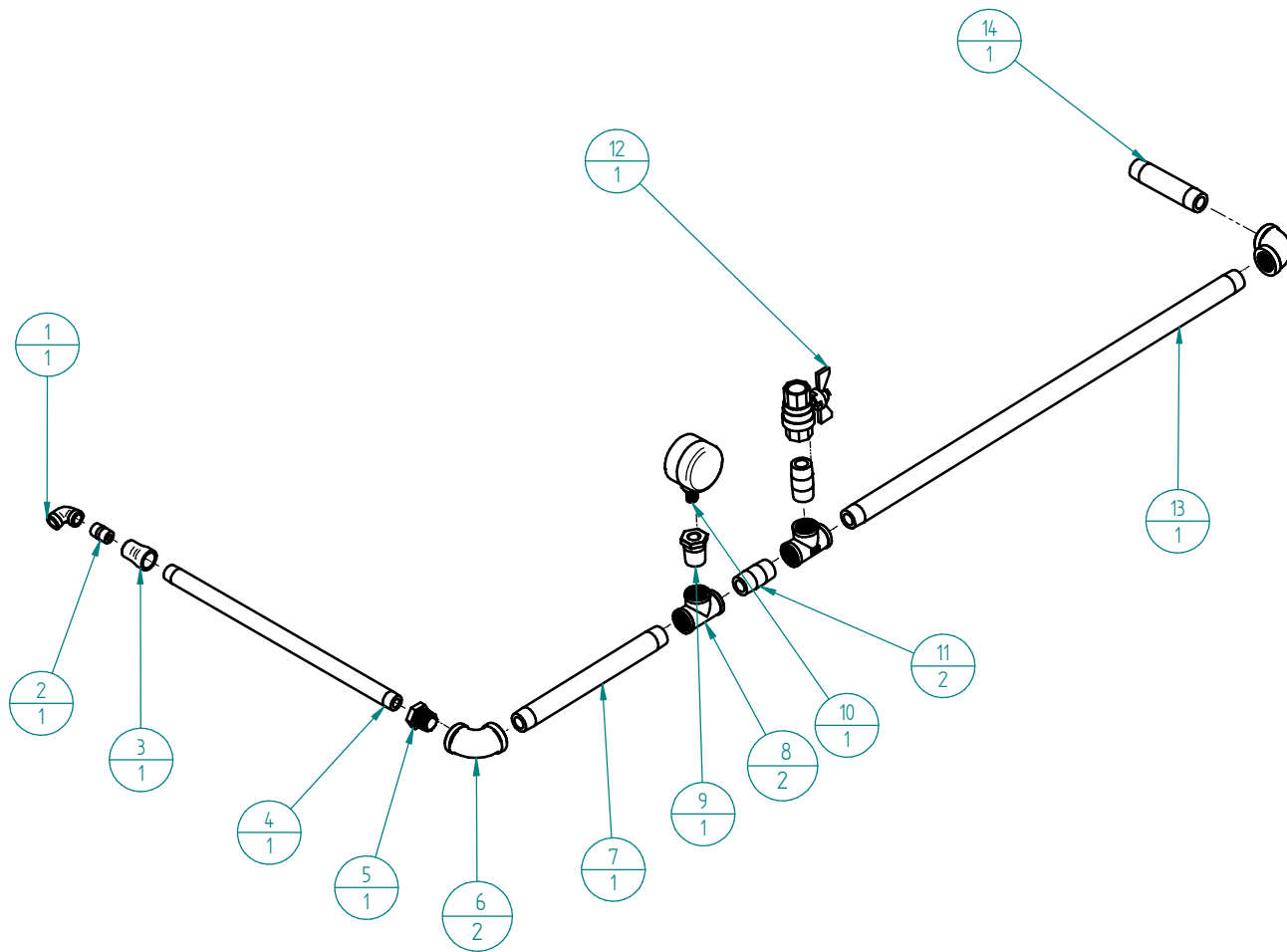


ITEM	NOMBRE	CANT	MAT	DESCRIPCION	PESO UNIT
1	TUERCA HEXAGONAL	1	ASTM A194 GALVANIZADA	5/16"- 18 UNC x 7 mm	0.001 Kg
2	CILINDRO GAS REFRIGERANTE	1	ACERO AL CARBONO,	CILINDRO REF. R134A, ESPESOR DE 1,5mm	2 Kg
3	NIPLE DE ALIMENTACIÓN	1	ACERO GALVANIZADO	NIPLE GALVANIZADO 3" - 8 NPT, SCHD 40	2 Kg
4	NIPLE DE ESCAPE GASES	1	HIERRO GALVANIZADO	NIPLE GALVANIZADO 1/4"-18 NPT, SCH 80	0.1

		NOMBRE	FECHA	Universidad de América	
DIBUJÓ	TUNJACIPA. M	11/26/22	TITULO ANEXO 1. SISTEMA REACTOR DE PIROLISIS		
DIBUJÓ	RODRIGUEZ. J	11/26/22			
REVISADO					
APROBADO					
AL CONTRARIO DE SER ESPECIFICADO LAS DIMENSIONES ESTÁN EN MILÍMETROS			TAMAÑO	DIBUJO NO.	REV
			A3	1	
			NOMBRE DEL ARCHIVO: REACTOR PLANO.DFT		
ESCALA: 1 : 5		PESO: 4.7 Kg	HOJA: 1 DE 5		

ANEXO 2.

PLANO DETALLADO - ENSAMBLE SISTEMA DE ESCAPE DE GASES



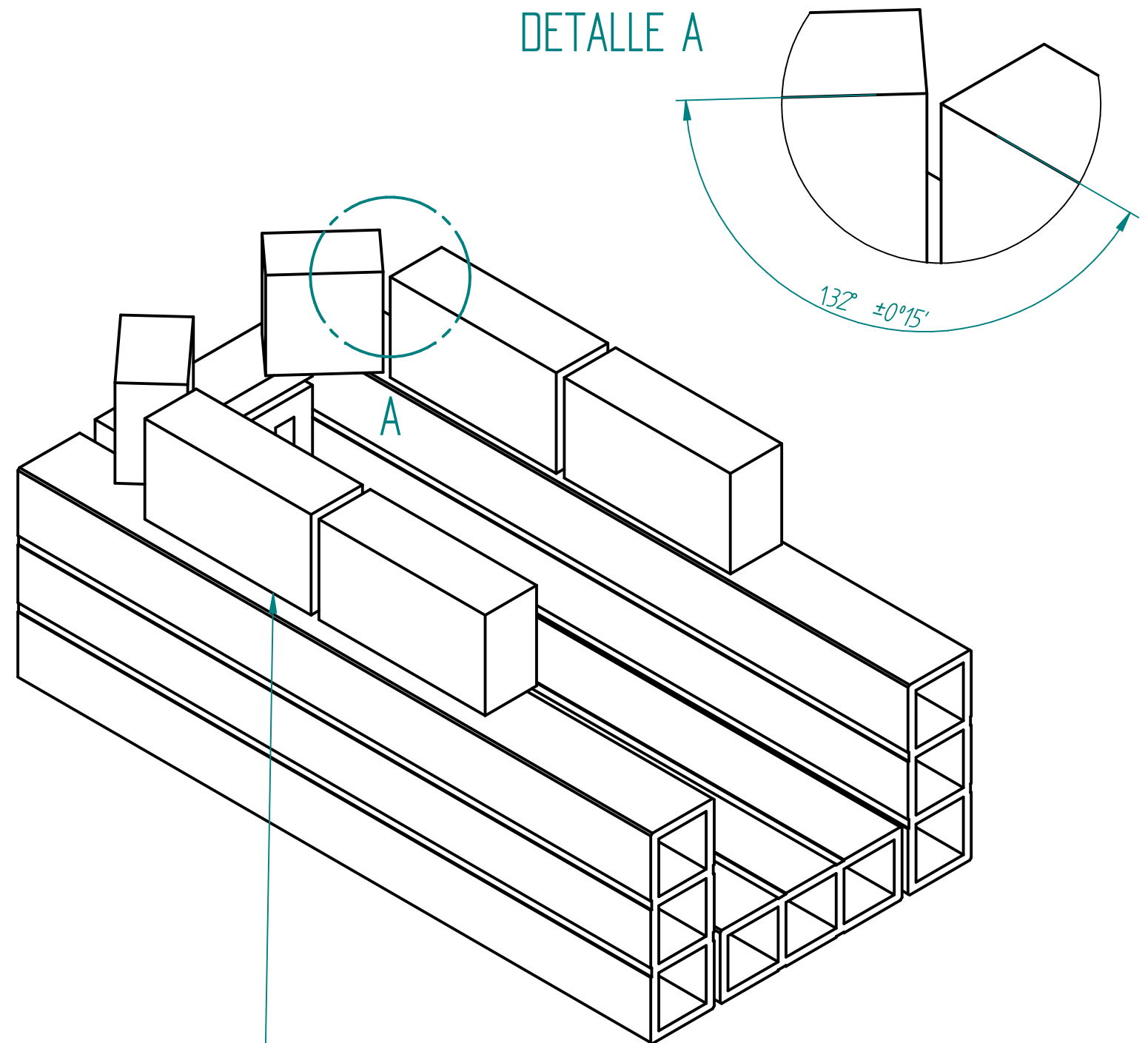
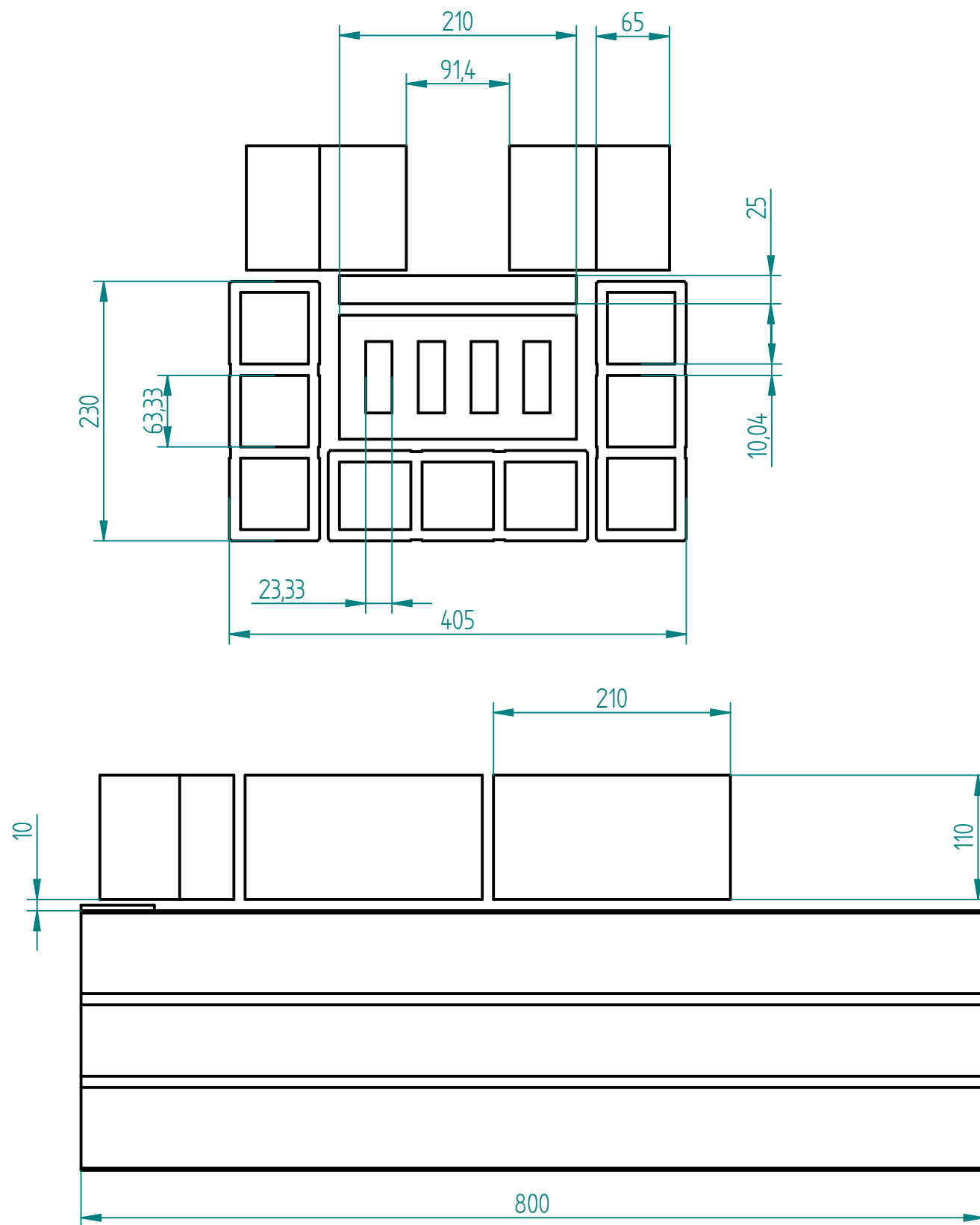
Número de Pieza	Tabla de Accesorios en Medidas Nominales	Cantidad
1	CODO HEMBRA-HEMBRA 1/4" - 18 NPT GALV.	1
2	NIPLE 1/4" - 18 NPT X 20 mm GALV.	1
3	CONECTOR CAMPANA 1/4" A 3/8" GALV.	1
4	NIPLE 3/8" - 18 NPT X 300 mm GALV.	1
5	BUSHING 3/8" NPT X 1/2" NPT GALV.	1
6	CODO HEMBRA-HEMBRA 1/2" - 14 NPT GALV.	2
7	NIPLE 1/2" - 14 NPT X 200 mm GALV.	1
8	TEE 1/2" - 14 NPT GALV.	2
9	BUSHING 1/4" NPT A 1/2" NPT GALV.	1
10	MANÓMETRO DE PRESION (0-30 psi), CARATULA 2.5" 1/4"	1
11	NIPLE 1/2" - 14 NPT X 40 mm GALV.	2
12	VÁLVULA DE BOLA 1/2" NPPT BRONCE.	1
13	NIPLE 1/2" -14 NPT X 550 mm GALV.	1
14	NIPLE 1/2" 14 NPT X 60 mm GALV.	1

NOMBRE		FECHA	Universidad de América	
DIBUJÓ	RODRIGUEZ, J	26/11/22	TÍTULO ANEXO 2. PLANO DE ENSAMBLE SISTEMA DE ESCAPE DE GASES	
DIBUJÓ	TUNJACIPA, M	26/11/22		
REVISADO			TAMANO DIBUJO NO	REV
APROBADO			A3	3
AL CONTRARIO DE SER ESPECIFICADO LAS DIMENSIONES ESTÁN EN MILÍMETROS			NOMBRE DE ARCHIVO: Sistema de Escape Gases.dft	
			ESCALA: 1 : 5	PESO: 4,5 Kg

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

ANEXO 3.

PLANO DETALLADO - SISTEMA DE CONSERVACIÓN DE CALOR-HOGAR

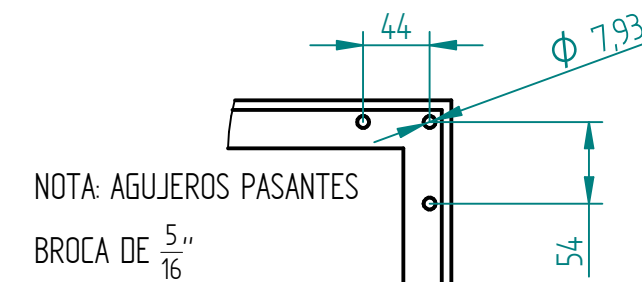
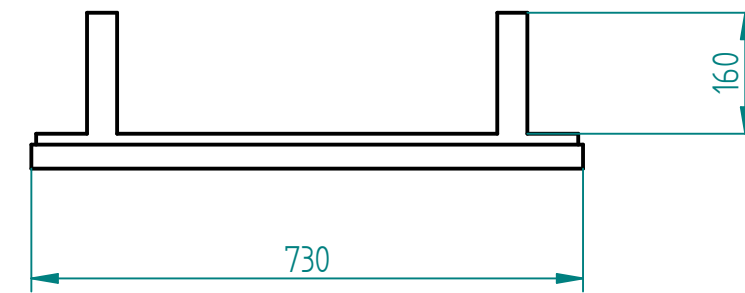
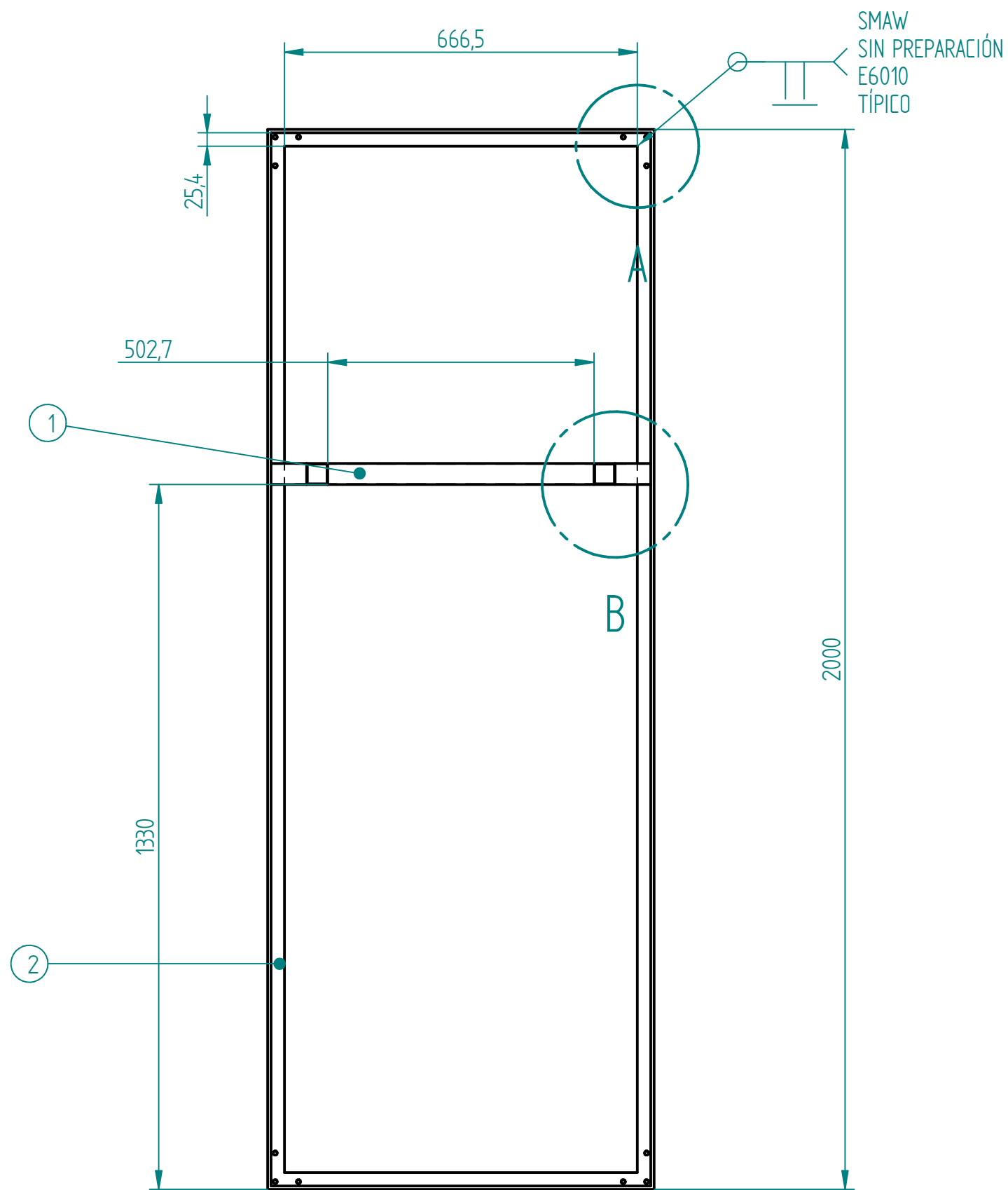


ITEM	NOMBRE	CANTIDAD	DESCRIPCION	PESO UNIT
1	BLOQUELÓN	3	BLOQUELÓN 800 x 230 x 80	9.8 Kg
2	LADRILLO REJILLA	1	LADRILLO REJILLA 24 x 12 x 6	2.5 Kh
3	LADRILLO COCIDO	5	LADRILLO MACIZO 200 x 100 x 60	3 Kg

		NOMBRE	FECHA	Universidad de América	
DIBUJÓ	Mauricio	11/26/22		Título ANEXO 3. SISTEMA DE CONSERVACIÓN DE CALOR-HOGAR	
DIBUJÓ	Mauricio	11/26/22			
REVISADO					
APROBADO				TAMANO DIBUJO NO	REV
AL CONTRARIO DE SER ESPECIFICADO LAS DIMENSIONES ESTÁN EN MILÍMETROS				A3	3
				NOMBRE DE ARCHIVO: Estructura Hogar plano.dft	
ESCALA: 1 : 5		PESO: 73.4 Kg	HOJA 3 DE 5		

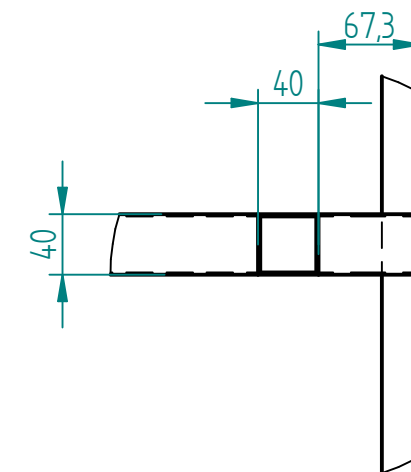
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

ANEXO 4.
PLANO DETALLADO – SOPORTE ESTRUCTURA-BASTIDOR



NOTA: AGUJEROS PASANTES
 BROCA DE $\frac{5}{16}$ "

DETALLE A



DETALLE B

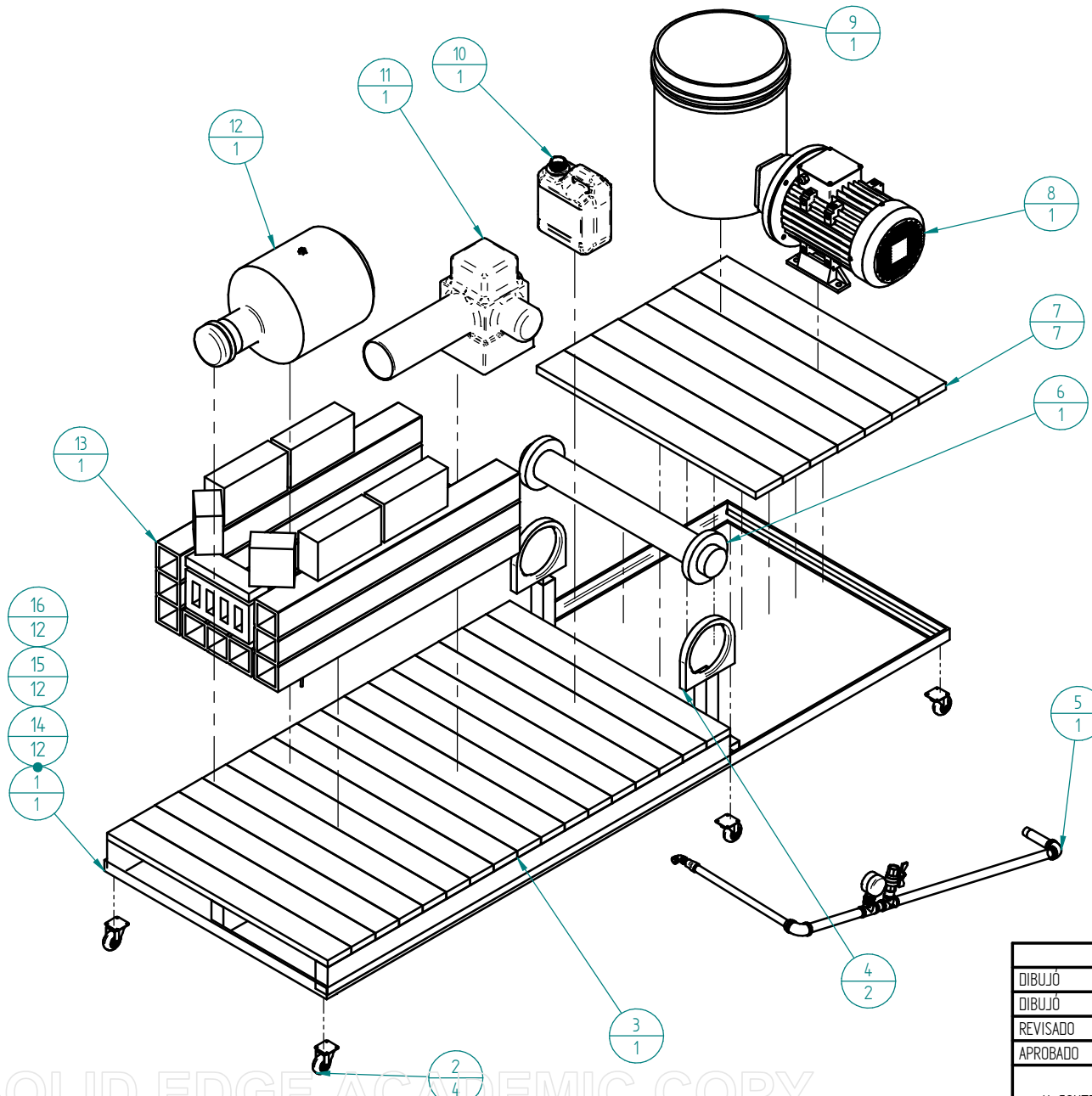
ITEM	NOMBRE	CANT	MAT	DESCRIPCIÓN	PESO UNIT
1	SOPORTE CONDENSADOR	1	SAE J403	TUBO CUADRADO 1.5 mm x 4 mm x 4 mm	1.92 Kg
2	MARCO ESTRUCTURA	1	A-36	PERFIL EN L 6.35 mm x 31.75 mm x 31.75 mm	17.1 Kg

	NOMBRE	FECHA	Universidad de América	
DIBUJÓ	Tunjacipa. M	11/26/22	TÍTULO	
DIBUJÓ	Rodriguez. J	11/26/22		
REVISADO			ANEXO 4. SISTEMA SOPORTE ESTRUCTURA-BASTIDOR	
APROBADO			TAMAÑO	DIBUJO NO.
AL CONTRARIO DE SER ESPECIFICADO LAS DIMENSIONES ESTÁN EN MILIMETROS			A3	4
			NOMBRE DEL ARCHIVO: Soporte estructura Plano.dft	
			ESCALA: 1 : 10	PESO: 19.08 Kg
			HOJA 4 DE 5	

SOLID EDGE ACADEMICO

ANEXO 5.

PLANO DETALLADO - ENSAMBLE DEL EQUIPO PILOTO DE PIRÓLISIS



Número de Item	Componente	Cantidad
1	MARCO ESTRUCTURA SOPORTE BASTIDOR ASTM A36	1
2	RUEDAS DE ROTACIÓN REF: MPG4 080 TXT4	4
3	ESTIBA DE MADERA LAR 1330 mm X AN 720 mm	1
4	ANILLOS DE SOPORTE CONDENSADOR	2
5	SISTEMA DE GASES PIROLÍTICOS	1
6	INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBOS Y CORAZA	1
7	TABLAS LARGO 725 mm X 90 mm	7
8	BOMBA PERIFÉRICA DE 0.5 HP 110 VOLTIOS	1
9	BALDE CAP. GALONES - AGUA SIST. ENFRIAMIENTO	1
10	TANQUE COMBUSTIBLE CAP. 1 GAL - DIESEL	1
11	QUEMADOR DIÉSEL 110 VOLTIOS	1
12	REACTOR PIROLÍTICO DE NFU	1
13	SISTEMA DE CONSERVACIÓN DE CALOR-HOGAR	1
14	TORNILLO CAB. RED. 3/16" - 13 UNC X 1/2" GALV.	12
15	ARANDELA 3/16" GALV.	12
16	TUERCA HEX 3/16" - 13 UN GALV.	12

NOMBRE	FECHA	Universidad de América		
DIBUJÓ TUNJACIPA, M	26/11/2022			
DIBUJÓ RODRIGUEZ, J	26/11/2022	TÍTULO		
REVISADO		ANEXO 5. PLANO DE ENSAMBLE DEL EQUIPO PILOTO DE PIROLISIS		
APROBADO		TAMANO DIBUJO NO		
AL CONTRARIO DE SER ESPECIFICADO LAS DIMENSIONES ESTÁN EN MILÍMETROS		A3	5	REV
		NOMBRE DE ARCHIVO: Ensemble Equipo Pirolisis.dft		
		ESCALA: 1 : 5	PESO: 192,95 Kg	HOJA 5 DE 5

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

ANEXO 6.

RECOMENDACIONES

A través de la experimentación realizada durante las pruebas piloto, se sugiere contemplar nuevas ideas en el diseño como la utilización de un sistema tipo soplete con compresor de aire para intensificar la flama de los gases de pirólisis en la auto regeneración y el aporte de energía al proceso, contribuyendo a la disminución del consumo de combustible para mantener las temperaturas de pirólisis y hacer más eficiente el proceso.

Se recomienda agregar un nuevo equipo intercambiador de calor, adicional al instalado en el equipo en la línea de salida de los gases del intercambiador existente, con el fin de disminuir en una mayor proporción la temperatura de los gases de pirólisis y buscar una mayor condensación de los gases pirolíticos del proceso, aumentando la fracción líquida que se puede producir del proceso de pirólisis.

Se recomienda para futuras experimentaciones, plantear el uso de un equipo de trituración para las muestras de neumáticos, ya que un menor tamaño de partícula tiene incidencia directa sobre el aumento en la eficiencia en la transferencia de calor a los NFU durante la pirólisis.

Con el fin de reducir las emisiones contaminantes del combustible diésel, se recomienda utilizar otro tipo de combustible para la generación de calor, que cumpla con los requerimientos de funcionamiento del proceso en cuanto al aporte de calor.