

UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO HENRÍQUEZ UREÑA

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Escuela de Ingeniería Industrial

“DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA PLANTA DE PIRÓLISIS PARA LA VALORIZACIÓN DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO MEDIANTE UN ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD EN EL GRAN SANTO DOMINGO, REPÚBLICA DOMINICANA.”



Trabajo de grado presentado por:

Johnny Gregory Cedeño Cedeño

Yatna Paulina Rosario Siri

Para la obtención del grado de:

Ingeniería Industrial

Santo Domingo, DN.

2024

ÍNDICE

ÍNDICE	2
ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	6
ÍNDICE DE ECUACIONES	6
AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA	7
INTRODUCCIÓN	10
PRIMERA PARTE	12
CAPÍTULO I: MARCO GENERAL	13
1.1 Descripción del Estudio	13
1.2 Planteamiento del problema	13
1.3 Alcance y Limitaciones	16
1.3.1 Alcance	16
1.3.2 Limitaciones	16
1.4 Justificación	16
1.5 Motivación	17
1.6 Objetivos	18
1.6.1 Objetivo General	18
1.6.2 Objetivos Específicos	18
1.7 Antecedentes del problema	18
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	21
2.1 Neumático	21
2.1.1 Composición del neumático	21
2.1.2 Partes de un neumático	23
2.1.3 Neumáticos Fuera de Uso (NFU)	25
2.2 Neumáticos Fuera de Uso. Legislación y gestión.	25
2.2.1 Legislación	25
2.2.2 Gestión	27
2.3 Alternativas: reutilización y valorización	28
2.3.1 Reutilización	28
2.3.2 Valorización	30

2.4	Pirólisis	30
2.4.1	Tipos de pirólisis	33
2.4.2	Tipos de reactores	34
2.4.3	Parámetros de operación	36
2.4.4	Materiales que pueden ser tratados por pirólisis	38
2.4.5	Productos finales de la pirólisis	39
<i>CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO</i>		41
3.1	Metodología	41
3.2	Nivel de investigación	42
3.3	Tipo de investigación	42
3.4	Diseño de investigación	42
3.5	Población y Muestra	43
3.6	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	43
<i>SEGUNDA PARTE</i>		45
<i>CAPÍTULO IV: ESTUDIO TÉCNICO</i>		46
4.1	Pirólisis de NFU	46
4.2	Productos de pirólisis de neumáticos fuera de uso	47
4.2.1	Aceite de pirólisis	47
4.2.2	Gases no condensables	48
4.2.3	Negro de Carbón	48
4.2.4	Acero	49
4.3	Negocio de pirólisis de NFU	49
4.4	Materia Prima: NFU	50
4.4.1	Disponibilidad materia prima en el Gran Santo Domingo	52
4.4.2	Neumáticos Fuera de Uso a estar disponibles en el Gran Santo Domingo	54
4.5	Necesidad de energía	56
4.6	Proceso de producción de pirólisis de NFU	57
4.7	Planta convencional	58
4.8	Elementos de la planta convencional	58
4.8.1	Reactor rotatorio	58
4.8.2	Condensador	59
4.8.3	Tanque de lavado de gases (Scrubber)	60
4.8.4	Quemador de gases (fackel)	60
4.8.5	Sistema de evacuación de gases de combustión por chimenea	60
4.8.6	Cortador de neumáticos	61
4.8.7	Compactador	61

4.9	Planta mejorada	61
4.10	Elementos de la planta mejorada	62
4.10.1	Sistema de alimentación al reactor	62
4.10.2	Sistema de manejo de negro de carbón	62
4.10.3	Destilador	63
4.10.4	Tanque de almacenamiento productos destilados	63
4.10.5	Compresor	63
4.10.6	Triturador de neumáticos móvil	64
4.11	Parámetros de diseño	64
4.11.1	Tipo de pirólisis	64
4.11.2	Tipo de reactor	65
4.11.3	Caracterización de la materia prima	65
4.12	Antes y después de aplicación de mejoras a la planta convencional	66
4.12.1	Pretratamiento y alimentación	66
4.12.2	Pirólisis	66
4.12.3	Descarga	67
4.12.4	Desempolvar	67
4.13	Flujo del proceso planta convencional	68
4.14	Flujo del proceso planta mejorada	69
4.15	Análisis FODA	70
4.15.1	Fortalezas	70
4.15.2	Oportunidades	70
4.15.3	Debilidades	71
4.15.4	Amenazas	71
4.16	Propuesta de valor	72
4.17	Oportunidades	73
4.18	Flaquer Ship Services	74
4.19	Permisos ambientales	75
4.20	Requerimientos para la obtención de los permisos sobre la industria de pirólisis	76
4.21	Ventajas	77
4.21.1	Ventajas ambientales	79
4.21.2	Ventajas económicas	80
4.21.3	Ventajas técnicas	81
4.22	Estudio de factibilidad económica	82
4.23	Estudio financiero	82
4.23.1	Egresos	82
4.23.2	Ingresos	94

4.24	Evaluación financiera	97
4.24.1	Flujo de caja neto	97
4.24.2	Indicadores de rentabilidad	101
<i>CAPÍTULO V: CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES</i>		<i>104</i>
5.1	Conclusión	104
5.2	Recomendaciones	105
<i>BIBLIOGRAFÍA</i>		<i>107</i>
<i>ANEXOS</i>		<i>110</i>

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Composición media de un neumático en peso (SIGNUS, 2020)	21
Tabla 2.	Reacción química que sucede en la pirólisis en cada temperatura (Parra, 2016)	31
Tabla 3.	Productos finales del proceso de pirólisis en % (Beston, 2023)	46
Tabla 4.	Aplicaciones de los productos (Beston, 2023)	49
Tabla 5.	Cantidad y tipos de vehículos a nivel nacional 2022-2023	51
Tabla 6.	Cantidad y tipos de vehículos en el Gran Santo Domingo 2022-2023	51
Tabla 7.	Vehículos en circulación en el Gran Santo Domingo	52
Tabla 8.	Neumáticos en circulación en el Gran Santo Domingo	53
Tabla 9.	NFU estimado en toneladas en el Gran Santo Domingo	55
Tabla 10.	Peso promedio de los neumáticos al final de su vida útil	55
Tabla 11.	Costo total de inversión planta de pirólisis convencional	83
Tabla 12.	Costo total de inversión planta de pirólisis mejorada	84
Tabla 13.	Costo total de inversión planta de pirólisis existente mejorada	85
Tabla 14.	Costos variables anuales planta de pirólisis convencional	87
Tabla 15.	Costos variables anuales planta de pirólisis mejorada y planta de pirólisis existente mejorada	87
Tabla 16.	Costos fijos anuales por salario planta de pirólisis convencional	89
Tabla 17.	Costos fijos anuales planta de pirólisis convencional	89
Tabla 18.	Costos fijos anuales por salarios planta de pirólisis mejorada y planta de pirólisis existente mejorada	90
Tabla 19.	Costos fijos anuales planta de pirólisis mejorada y planta de pirólisis existente mejorada	91
Tabla 20.	Gastos anuales planta de pirólisis convencional	91
Tabla 21.	Gastos anuales planta de pirólisis mejorada y planta de pirólisis existente mejorada	91
Tabla 22.	Egresos desembolsables anuales de la planta de pirólisis convencional	92
Tabla 23.	Egresos desembolsables anuales planta de pirólisis mejorada y planta de pirólisis existente mejorada	92
Tabla 24.	Egresos no desembolsables anuales planta de pirólisis convencional	93
Tabla 25.	Egresos no desembolsables anuales planta de pirólisis mejorada	93
Tabla 26.	Egresos no desembolsables anuales planta de pirólisis existente mejorada	94
Tabla 27.	Ingresos por ventas anuales planta de pirólisis convencional	95
Tabla 28.	Ingresos por ventas anuales planta de pirólisis mejorada y planta de pirólisis existente mejorada	95
Tabla 29.	Ingreso por valor de desecho planta de pirólisis convencional	96

Tabla 30. Ingreso por valor de desecho planta de pirólisis mejorada	96
Tabla 31. Ingreso por valor de desecho planta de pirólisis existente mejorada	96
Tabla 32. Flujo de caja neto planta de pirólisis convencional	98
Tabla 33. Flujo de caja neto planta de pirólisis mejorada	99
Tabla 34. Flujo de caja neto planta de pirólisis existente mejorada	100
Tabla 35. Relación entre el VAN y TIR	101
Tabla 36. Indicadores de rentabilidad y el tiempo de recuperación de la inversión de la planta de pirólisis convencional	101
Tabla 37. Indicadores de rentabilidad y el tiempo de recuperación de la inversión de la planta de pirólisis mejorada	102
Tabla 38. Indicadores de rentabilidad y el tiempo de recuperación de la inversión de la planta de pirólisis existente mejorada	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de pirólisis	28
Figura 2. Total de vehículos en circulación en el Gran Santo Domingo	50
Figura 3. Total de neumáticos en circulación en el Gran Santo Domingo	51
Figura 4. Total estimado de NFU en toneladas en el Gran Santo Domingo	52
Figura 5. Flujo del proceso convencional	65
Figura 6. Flujo del proceso mejorada	66

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Neumáticos acumulados.	14
Ilustración 2. Estructura del neumático radial (SIGNUS, 2020)	24
Ilustración 3. Proporción de producto final (Beston, 2023)	46
Ilustración 4. Reactor rotatorio (Beston, 2023)	58
Ilustración 5. Condensador y torre de enfriamiento (Beston, 2023)	59
Ilustración 6. Tanque de lavado de gases (Beston, 2023)	60
Ilustración 7. Sistema de evacuación de gases de combustión (Beston, 2023)	60
Ilustración 8. Cortador de neumáticos (Beston, 2023)	61
Ilustración 9. Sistema de alimentación al reactor (Beston, 2023)	62
Ilustración 10. Sistema de manejo de negro de carbón (Beston, 2023)	62
Ilustración 11. Destilador (Beston, 2023)	63
Ilustración 12. Compresor (DeWALT, 2023)	63
Ilustración 13. Triturador de neumáticos móvil (BCA, 2023)	64

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación química de la reacción que sucede en la pirólisis (Parra, 2016)	29
---	----

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Johnny Margarito y Vera Valentinovna quienes me han brindado su apoyo incondicional siempre, enseñándome con el ejemplo que todo esfuerzo trae su recompensa. Gracias por haber confiado en mí y haber estado junto a mí en los momentos más difíciles, sin su apoyo no hubiese llegado hasta aquí.

A mi tía Gilma y tío Isidro por sus consejos y gran apoyo que al igual que el de mis padres fue incondicional. Gracias por ayudarme y comprenderme a lo largo de esta etapa. A mi tía Margarita por sus consejos y apoyo a la distancia.

Finalmente, a la UNPHU y al cuerpo académico de la Escuela de Ingeniería Industrial. Gracias por acompañarnos a lo largo de la carrera, brindándonos los conocimientos y las herramientas competentes para seguir adelante en nuestra vida profesional. A nuestro asesor por su paciencia y por brindarnos los conocimientos pertinentes para salir adelante con este proyecto.

Johnny Gregory Cedeño

Doy gracias a Dios, que después de un difícil y largo camino de mi desarrollo como profesional puedo ver como él ha estado grande conmigo y me ha podido acompañar en esta gran etapa, por haberme dado el entendimiento y sabiduría para llevar a cabo uno de mis proyectos de vida.

A mis padres (Ercira Siri y Rafael Rosario) que sin importar las circunstancias me han apoyado inmensamente y han sido el motor que ha impulsado cada uno de mis sueños y esperanzas. Con esto concluyo esta etapa y les dedico este logro, gracias por estar siempre y por creer en mí en todo momento.

Gracias a mis hermanos, amigos y compañeros de clases por su apoyo incondicional.

Agradezco a mis tías (Angela Rosario, Clara Rosario, Asia Siri y Yanet Siri), gracias por todo su apoyo y cada uno de los consejos dados durante esta etapa, forman parte fundamental de este proyecto.

Finalmente, agradezco al cuerpo académico de la Escuela de Ingeniería Industrial, en especial a nuestro asesor que, sin importar el momento y la hora, siempre estuvieron presente para dirigimos por el buen camino, que con sus experiencias e inteligencia permitieron que esto sea posible.

Yatna Rosario

DEDICATORIA

A mis padres, en especial a mi madre, por siempre estar a mi lado. A mis abuelas Mama Gisela y Olga Georgievna, siempre estarán en mis recuerdos.

Johnny Gregory Cedeño

A Dios, por haberme permitido llegar hasta este punto y por darme la vida y salud para poder desarrollarme como profesional, permitiendo responder de manera positiva, cada uno de los obstáculos que ocurrieron durante esta etapa de mi vida.

A toda mi familia, en especial a mis padres, porque me enseñaron a priorizar mis estudios sobre cualquier circunstancia y a tener siempre una convicción de vida.

A mis compañeros de clase, maestros y nuestro asesor, por siempre responder de manera positiva ante cualquier situación mostrada, resaltando siempre la dedicación y el apoyo incondicional.

Yatna Rosario

INTRODUCCIÓN

El rápido crecimiento de la industria del neumático condujo a un problema creciente de neumáticos fuera de uso, con millones de neumáticos desechados cada año, lo que representa un riesgo significativo para el medio ambiente y la salud. La acumulación de neumáticos fuera de uso en los vertederos, a lo largo de las carreteras y en otros lugares no controlados creó criaderos de mosquitos y otras plagas, así como posibles riesgos de incendio y compromisos ambientales.

En respuesta al creciente problema de neumáticos fuera de uso, los gobiernos y la industria comenzaron a desarrollar e implementar políticas y programas destinados a gestionar estos desechos de manera sostenible y responsable. Esto ha llevado al desarrollo de una variedad de estrategias de gestión de neumáticos, que incluyen el reciclaje de llantas, la pirólisis y otras tecnologías y enfoques innovadores destinados a reducir los desechos y crear valor a partir de los neumáticos fuera de uso.

La gestión de NFU en la República Dominicana es un desafío importante, ya que el país genera aproximadamente 19 millones de neumáticos cada año, y en el Gran Santo Domingo aproximadamente se genera 8 millones cada año, de diversas fuentes incluidos los sectores del transporte, la construcción y la industria. La disposición inadecuada de los NFU genera problemas ambientales y de salud.

Hoy en día, la industria de gestión de neumáticos fuera de uso continúa evolucionando, con un enfoque creciente en enfoques sostenibles y ambientalmente responsables para la gestión de neumáticos fuera de uso y sus subproductos. El desarrollo y la implementación de tecnologías y procesos innovadores, como la pirólisis, están ayudando a transformar los neumáticos fuera de uso en recursos valiosos, al mismo tiempo que reducen su impacto en el medio ambiente y promueven la sustentabilidad.

PRIMERA PARTE

CAPÍTULO I: MARCO GENERAL

1.1 Descripción del Estudio

El objeto de estudio de este trabajo está basado en el análisis de la experiencia de la empresa Flaquer Ship Services de siete meses de trabajo de una planta convencional, planteando una mejora a un caso concreto, a través del estudio de la experiencia. Enfocado en determinar la factibilidad técnica-operativa, incluyendo un análisis de competitividad y de costos e ingresos, de una planta de manejo de neumáticos a través del proceso de pirólisis, el cual consiste en lograr la descomposición química del neumático fuera de uso (en adelante NFU). Siendo este uno de los procedimientos actuales más sostenibles para convertir los neumáticos en fuentes de energía por la transformación procesada y obtener: combustibles, gases y sólidos de gran poder calorífico y energético.

1.2 Planteamiento del problema

El neumático está diseñado para ser indestructible y esta fortaleza lleva asociada una gran debilidad, pues una vez fuera de uso el neumático es de imposible integración en los ciclos naturales, y por tanto, es un residuo que crea graves problemas ambientales (Ugarte, 2015).

El Reglamento Técnico Ambiental para la Gestión de Neumáticos Fuera de Uso define a los NFU como aquellos neumáticos que han perdido su utilidad por uso, daño o defecto y que es inapropiado para su uso original. El destino de estos siempre son vertederos o depósitos al aire libre, que con el paso del tiempo producen una degradación química que contamina el suelo y por tanto, los problemas ambientales asociados a esa forma de gestión son terribles (Ugarte, 2015).



Ilustración 1. Neumáticos acumulados.

Fuente: Periódico Hoy (Hoy, 2022)

Los NFU permiten la acumulación en su interior de agua de lluvia y son reservorio de larvas e insectos que propagan enfermedades y afectan la salud pública, enfermedades como el dengue, el virus del chikungunya, entre otras y propician los criaderos de ratas, desencadenando consecuencias insalubres. Los incendios de los depósitos de neumáticos fuera de uso suelen ser frecuentes, para disminuir el espacio que ocupan en vertederos, o accidentalmente como ya ha ocurrido en el pasado. Esto provoca problemas aún más graves para el medio ambiente y nuestra salud, ya que en un incendio de neumáticos se liberan sustancias tóxicas a la atmósfera y son de difícil extinción dado el alto poder calorífico de ese residuo (Ugarte, 2015).

En la República Dominicana la gestión de NFU es un desafío importante, y muy en particular en la provincia del Gran Santo Domingo donde hemos llevado a cabo estas investigaciones de NFU, ya que el país genera aproximadamente 19 millones de neumáticos cada año, y en el Gran Santo Domingo aproximadamente se genera 8 millones cada año, de diversas

fuentes incluidos los sectores del transporte, la construcción y la industria. La disposición inadecuada de los NFU genera problemas ambientales y de salud.

Para enfrentar este desafío, la República Dominicana ha implementado una serie de iniciativas y regulaciones destinadas a mejorar la gestión de NFU como la Ley General de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Ley 64-00), el Reglamento Técnico número 005-2015 sobre la Gestión de Neumáticos Fuera de Uso, la Ley 225-20 sobre Gestión Integral y Coprocesamiento de Residuos Sólidos y su reglamento de aplicación la Norma para la Gestión Ambiental de Residuos Sólidos No Peligrosos (NA-RS-001-03). Estos incluyen la promoción del reciclaje, así como la implementación de regulaciones para prohibir el vertido ilegal de estos.

Sin embargo, a pesar de estos esfuerzos, el manejo de NFU continúa siendo un problema para la República Dominicana, y queda mucho trabajo por hacer para mejorar su manejo y mitigar impactos negativos en el medio ambiente y la salud pública.

En base a las diferentes tecnologías que se utilizan en los países que manejan los NFU, se ha observado que la pirólisis es una de las más apropiadas para el manejo de los NFU para el país.

En este sentido, la planta de pirólisis de NFU que se propone en esta tesis, para la República Dominicana, muy en especial en la provincia del Gran Santo Domingo que es donde se han levantado las investigaciones para la elaboración de esta tesis, sería una de las tantas formas que hay para abordar el problema de la acumulación de NFU y mejorar la gestión de su manejo y disposición final.

1.3 Alcance y Limitaciones

1.3.1 Alcance

El alcance de esta investigación estará enfocado en la propuesta de diseño y de mejora de una planta de pirólisis convencional para la valorización de neumáticos fuera de uso en base a la experiencia de la empresa Flaquer Ship Services. Dichas mejoras serán propuestas para la parte operativa de la planta, obteniendo así una planta de pirólisis más eficiente que la presentada como convencional. Este estudio está contenido bajo el alcance teórico y de diagnóstico, por lo tanto, la implementación de esta propuesta estará fuera del alcance de la misma.

1.3.2 Limitaciones

El trabajo se ve limitado, primeramente, por la escasez local de conocimiento específico del proceso de pirólisis como sistema de tratamiento de neumáticos fuera de uso en la República Dominicana, por ende, las informaciones relevantes son provenientes del internet.

1.4 Justificación

En la República Dominicana, en especial en la provincia del Gran Santo Domingo, hay muy poca conciencia de los riesgos para el medio ambiente y la salud pública que ocasionan la acumulación de los NFU, incluidas las propias autoridades públicas. Un volumen importante de neumáticos simplemente se tira al costado de la carretera o se abandona en los vertederos. Este es un problema particularmente importante cuando el sistema de gestión de NFU, a pesar de los esfuerzos, no funciona, lo que lleva a la acumulación de estos en lugares inadecuados.

Una planta de pirólisis de neumáticos fuera de uso estaría contribuyendo a lograr trabajo decente y crecimiento económico (ODS 8) mejorando progresivamente la producción y el consumo eficientes de los recursos mundiales y procurando desvincular el crecimiento económico de la degradación del medio ambiente; y producción y consumo responsable (ODS 12) ya que promueve la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales, contribuye de manera significativa a la gestión ecológicamente racional de los productos químicos y de todos los desechos a lo largo de su ciclo de vida, y reduce significativamente su liberación a la atmósfera, el agua y el suelo a fin de minimizar los efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente.

En nuestro país y en especial en la provincia del Gran Santo Domingo, la tecnología de pirólisis para procesar desechos no es muy utilizada y en casos concretos ha fracasado comercialmente, por eso la oportunidad de presentar mejoras en esa tecnología a nivel local es un proyecto atractivo tanto, por el hecho de tratar de resolver en parte el problema ambiental que representa la acumulación de NFU, como por la parte de valorizar estos como recurso energético.

1.5 Motivación

En el Gran Santo Domingo, grandes cantidades de neumáticos fuera de uso terminan en vertederos, lo que plantea un problema importante para el reciclaje y la eliminación final respetuosa con el medio ambiente. Las alternativas que existen actualmente van desde la acumulación a orillas de vías públicas, terrenos baldíos y vertederos, los cuales ocupan grandes volúmenes físicos y los NFU están expuestos a un largo deterioro natural y contaminan el suelo, el aire y el medio ambiente.

El desarrollo de este trabajo surge debido a la necesidad de una propuesta de mejora para la planta de pirólisis presentada, con el fin de optimizar todos los recursos pertinentes dentro de la misma, encontrando así nuevas estrategias que permitan obtener una mayor factibilidad y de esta misma forma generando valor comercial a través del proceso de pirólisis.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General

Diseñar y evaluar una planta de pirólisis para la valorización de neumáticos fuera de uso mediante un análisis de factibilidad en el Gran Santo Domingo, República Dominicana.

1.6.2 Objetivos Específicos

- Minimizar el impacto ambiental de los neumáticos fuera de uso.
- Recuperar el potencial energético de los neumáticos fuera de uso (NFU), mediante el proceso de pirólisis.
- Generar valor comercial con los productos de la pirólisis.

1.7 Antecedentes del problema

La historia de los neumáticos fuera de uso se remonta a su invención a fines del siglo XIX. El uso generalizado de automóviles y otros vehículos equipados con neumáticos llevó a una creciente demanda de neumáticos y, a mediados del siglo XX, la producción y el uso de neumáticos se convirtió en una industria importante en todo el mundo.

El rápido crecimiento de la industria de neumáticos condujo a un problema creciente de neumáticos fuera de uso, donde a nivel mundial, se estima que mil millones de neumáticos llegan

al final de su vida útil cada año, lo que representa un riesgo significativo para el medio ambiente y la salud.

El gobierno dominicano tomó la iniciativa de estudiar el manejo de residuos sólidos, expresado en el Informe final de la “Situación Actual de Gestión de Residuos en República Dominicana”, Los residuos son utilizados en cierto nivel de reciclaje y aprovechamiento energético a nivel nacional. El mismo presenta conclusiones y recomendaciones sobre el estado de la gestión de residuos en la República Dominicana con vista a una GI RS en el marco de la economía circular y considerando también la mitigación de GEI. (Wolf, Judit,2018)

Tirar neumáticos en vertederos siempre ha sido un problema de sostenibilidad. En las últimas dos décadas, la UE ha hecho enormes progresos para resolver el problema general de los residuos de los vertederos. Desde 1999, el envío de NFU a vertederos está legalmente prohibido por la Unión Europea, en virtud de la Directiva 1999/31/EC (UE. 1999). (Circular, 2022)

Según la Asociación Europea de Fabricantes de Neumáticos y Caucho (ETRMA, por sus siglas en inglés), cada año en Europa, las empresas recogen y tratan más de 3 millones de toneladas de NFU a través de procesos de reciclaje y recuperación. Y según su Informe de NFU 2015 (ETRMA, 2015), durante los últimos 20 años, las tendencias de recolección de neumáticos y gestión de NFU han sido positivas. Pasando del 8 % de reciclaje, 14 % de recuperación de energía y 78 % desconocido/existencias en 1994 a 52 % de reciclaje, 40 % de recuperación de energía, 3 % de ingeniería civil y 5 % desconocido/existencias en 2019, con una recolección general del 95 % de NFU en Europa. (WBCSD, 2021)

En 2019 China generó más de 12,8 millones de toneladas de NFU. La tasa de reciclaje general aún no ha alcanzado el 70 % y la generación de NFU sigue creciendo a una tasa anual del 8 % al 10 %. Entre 2016 y 2020, las empresas procesaron un total de 34 millones de toneladas de NFU, mientras que recauchutan alrededor de 32 millones de neumáticos. Las rutas de recuperación de NFU más comunes en China son el caucho recuperado, el polvo de caucho y la pirólisis. (WBCSD, 2021)

El neumático está diseñado para ser indestructible y se estima en centenares de años el tiempo de su degradación natural. Esa fortaleza lleva asociada una gran debilidad, pues una vez fuera de uso el neumático es de imposible integración en los ciclos naturales.

Es cierto que en principio los neumáticos usados no generan ningún peligro inmediato, pero su disposición de manera inapropiada puede contaminar gravemente el medioambiente y ocasionar problemas de salud pública.

En ese sentido, la presente Tesis de grado se centra en el proceso de pirólisis como técnica para la recuperación del potencial energético de los neumáticos fuera de uso (NFU).

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Neumático

Un neumático es una pieza toroidal de caucho y un producto de seguridad complejo, de alta tecnología que representa un siglo de innovación en la fabricación, que aún continúa. El neumático se compone de muchos materiales, los mejores que pueden producir las industrias metalúrgica, textil y química. No hay lugar para el más mínimo defecto y el proceso de desarrollo y fabricación del producto es extremadamente complejo (ETRMA, End of life tyres: A valuable resource with growing potential, 2011).

2.1.1 Composición del neumático

Los neumáticos son productos mixtos fabricados esencialmente de caucho, acero y fibras textiles. En la formulación del caucho, previa a la vulcanización, intervienen distintos elementos que dan a la mezcla las características adecuadas, destacando el negro de carbono (constituye la carga de refuerzo y está formado de partículas muy pequeñas de carbono), plastificantes y otros agentes químicos (entre otros, azufre, óxido de zinc, antioxidantes y acelerantes, etc.) (SIGNUS, 2020).

Aunque la composición de los neumáticos varía en función del tipo de neumático (automóviles, motocicletas, jeep, carga, etc.) en la Tabla 1 se presenta una composición media del neumático en peso.

Tabla 1. Composición media de un neumático en peso (SIGNUS, 2020)

Composición media de un neumático en peso	
Componente	% en peso
Caucho	42-43%
Negro de Carbono	24-28%
Acero	13-25%
Otros	2,9-3,5%
Aceites	1,6-7%
Óxidos de Zinc	2%
Azufre	1%
Textil	0-5%

Según la Asociación Estadounidense de Fabricantes de Neumáticos (USTMA, por sus siglas en inglés), estos se definen de la siguiente manera (USTMA, What's in a tire, n.d.):

- **Caucho natural:** El caucho natural proporciona características específicas de rendimiento a los neumáticos. Es especialmente bueno para la resistencia al desgarro y a las fisuras por fatiga.
- **Polímeros sintéticos:** Los dos polímeros de caucho sintético principales que se utilizan en la fabricación de neumáticos son el caucho de butadieno y el caucho de estireno butadieno. Estos polímeros de caucho se usan en combinación con caucho natural. Las propiedades físicas y químicas de estos polímeros de caucho determinan el desempeño de cada componente del neumático, así como el desempeño general del neumático (resistencia a la rodadura, desgaste y tracción).

Otro caucho sintético importante es el caucho de poliisobutileno halogenado (XIIR), comúnmente conocido como caucho de halobutilo. Este material hace que el revestimiento interior sea impermeable, lo que ayuda a mantener el neumático inflado.

- **Acero:** El alambre de acero se utiliza en los cinturones y talones de los neumáticos, y en las lonas de los neumáticos de camiones. Los cinturones debajo de la banda de rodadura sirven para endurecer la carcasa del neumático y mejorar el rendimiento frente al desgaste y el manejo del neumático. El alambre del talón ancla el neumático y la fija a la rueda.
- **Textil:** Los textiles de los neumáticos son varios tipos de cuerdas de tela que refuerzan el neumático. Las cuerdas de tela para neumáticos brindan estabilidad dimensional y ayudan a soportar el peso del vehículo.
- **Rellenos (negro de carbono, sílice):** Tanto el negro de carbono como la sílice son rellenos que refuerzan el caucho, es decir, mejoran propiedades como el desgaste, la fuerza de tensión y la abrasión. Esto da como resultado una mejor tracción y rendimiento frente al desgaste. El uso de sílice mejora la resistencia al rodamiento.
- **Antioxidantes:** Los antioxidantes ayudan a evitar que el caucho se descompona debido al efecto de la temperatura y la exposición al oxígeno.
- **Antioxidantes:** Los antioxidantes se utilizan para impedir los efectos de la exposición al ozono en la superficie del neumático.
- **Sistemas de curado (azufre, óxido de zinc):** El azufre y el óxido de zinc son ingredientes fundamentales para transformar el caucho en un artículo sólido durante la vulcanización o el curado de neumáticos. Los sistemas de curado acortan el tiempo de

vulcanización e impactan la longitud y el número de enlaces cruzados en la matriz de caucho que se forman durante el curado o vulcanización del neumático.

2.1.2 Partes de un neumático

El neumático está formado por diferentes piezas, unidas entre sí a través del proceso de vulcanización. Cada una de ellas tiene una composición y características bien diferenciadas del resto, marcadas por las exigencias del conjunto, además de por la funcionalidad de cada parte dentro del neumático (SIGNUS, 2020).

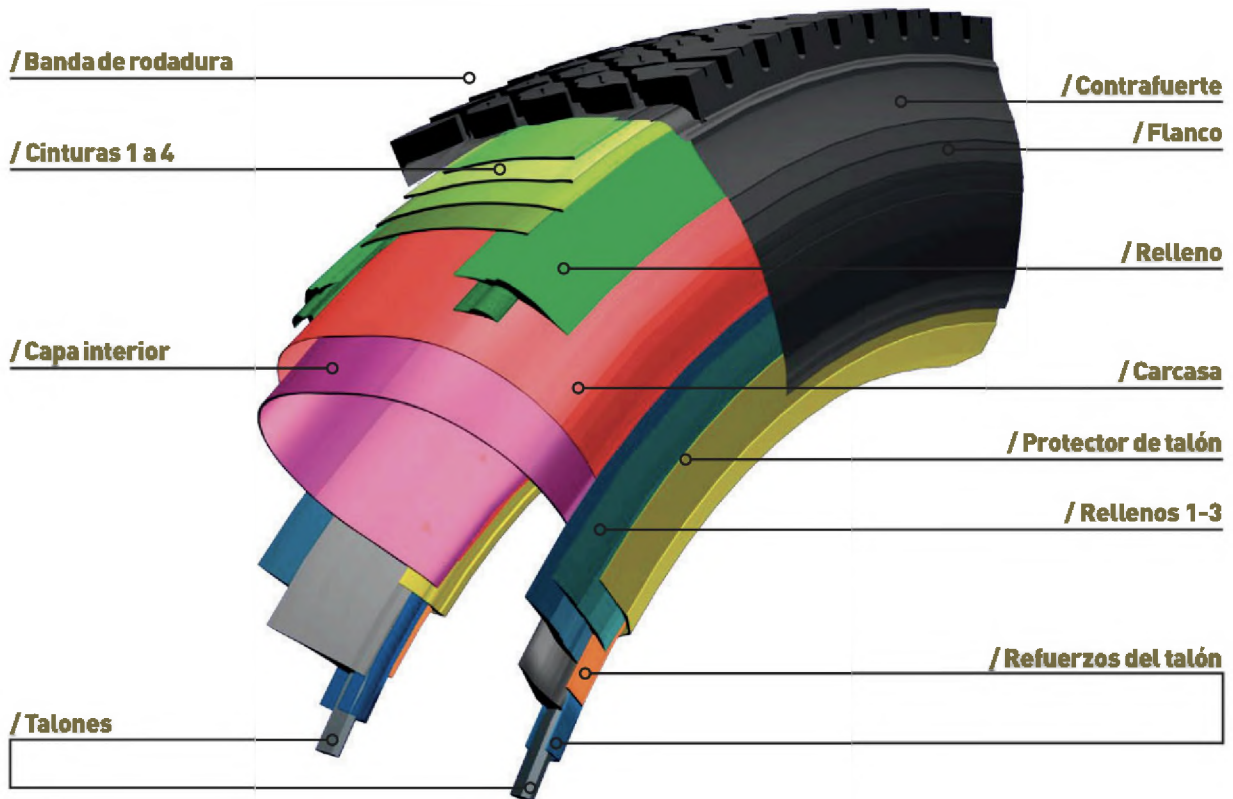


Ilustración 2. Estructura del neumático radial (SIGNUS, 2020)

SIGNUS Ecovalor, en su reporte de 10 años de Prevención de la Generación de Neumáticos Fuera de Uso (SIGNUS, 2020) establece que en términos generales se distinguen 5

partes constituidas igualmente por piezas diferentes: interior, carcasa, talones, flancos y banda de rodadura, como se puede apreciar en la Ilustración 2, y sus características y exigencias son las siguientes:

- **Interior:** parte más interna del neumático, recubriendo la cavidad interior del mismo de talón a talón. Su función principal es retener el aire y mantener el máximo tiempo posible la presión correcta de inflado.
- **Carcasa:** parte que conforma la estructura física del neumático, sobre la que van montadas el resto de las partes. La estructura está compuesta por diferentes capas de goma y tejido metálico y textil dispuestas de forma concreta para conferir las características esenciales del neumático.
- **Talones:** partes del neumático que entran en contacto con la rueda metálica. Su función principal es la unión con la misma y la inmovilización del neumático para cumplir su funcionalidad. Se trata de un anillo de acero, recubierto por una mezcla de goma de una alta función de cierre para evitar tanto la pérdida de aire, como el desplazamiento de la cubierta sobre la rueda.
- **Flancos:** capas que se sitúan en la parte exterior del neumático a ambos lados del mismo, entre la banda de rodadura y los talones. La función principal es la protección lateral de la carcasa.
- **Banda de rodadura:** parte más externa. Es uno de los elementos de seguridad más importante pues es la parte del neumático en contacto con la carretera, tanto en el momento de la conducción, como durante la frenada.

2.1.3 Neumáticos Fuera de Uso (NFU)

El Reglamento Técnico Ambiental para la Gestión de Neumáticos Fuera de Uso (Ambiente, 2015) define a los NFU como un neumático que ha perdido su utilidad por uso, daño o defecto y que es inapropiado para su propósito original.

2.2 Neumáticos Fuera de Uso. Legislación y gestión.

2.2.1 Legislación

La Constitución de la República de República Dominicana (Congreso, 2015), en su Artículo 194 sobre Plan de ordenamiento territorial establece que es prioridad del Estado la formulación y ejecución, mediante ley, de un plan de ordenamiento territorial que asegure el uso eficiente y sostenible de los recursos naturales de la Nación, acorde con la necesidad de adaptación al cambio climático.

En el año 2000, se crea el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales por medio de la **Ley 64-00** Ley General de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Congreso, 2000) que tiene por objeto establecer las normas para la conservación, protección, mejoramiento y restauración del medio ambiente y los recursos naturales asegurando su uso sostenible (Art.1). Donde en su Artículo 18 una de las funciones que se le confiere al Ministerio es estimular procesos de reconversión industrial, ligados a la implantación de tecnologías limpias y a la realización de actividades de descontaminación, de reciclaje y de reutilización de residuos.

En el año 2003, se aprobó la Norma para la Gestión Ambiental de Residuos Sólidos No Peligrosos **NA-RS-001-03** (Ambiente M. , 2003) tiene el objetivo de proteger la salud humana y la calidad de vida de la población, así como promover la preservación y protección del ambiente,

estableciendo los lineamientos para la gestión de los residuos sólidos municipales no peligrosos. Especifica los requisitos sanitarios que se cumplirán en el almacenamiento, recolección, transporte y disposición final, así como las disposiciones generales para la reducción, reaprovechamiento y reciclaje.

En el año 2015 el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales aprobó el **Reglamento Técnico No. 005-2015** sobre la Gestión de Neumáticos Fuera de Uso (Ambiente, 2015), con el objetivo de establecer los requisitos y especificaciones ambientales para regular las actividades de gestión de neumáticos fuera de uso, a fin de prevenir, mitigar y controlar los impactos ocasionados por estos residuos al medio ambiente y a la salud.

En el año 2020, se aprobó la **Ley 225-20** sobre Gestión Integral y Coprocesamiento de Residuos Sólidos (Congreso, 2020), que tiene por objeto prevenir la generación de residuos, además de establecer el régimen jurídico de su gestión integral para fomentar la reducción, reutilización, reciclaje, aprovechamiento y valorización, así como regular los sistemas de recolección, transporte y barrido; los sitios de disposición final, estaciones de transferencia, centros de acopio y plantas de valorización; con la finalidad de garantizar el derecho de toda persona a habitar en un medio ambiente sano, proteger la salud de la población, así como disminuir la generación de gases de efecto invernadero, emitidos por los residuos.

2.2.2 Gestión

La gestión de NFU es el conjunto de actividades (recolección, transporte, almacenamiento, aprovechamiento, y/o disposición final), que permite un manejo adecuado de manera que no ponga en peligro la salud humana ni afecte al ambiente ni a los recursos naturales. (Ambiente, 2015)

El Reglamento de Gestión de NFU establece que toda persona que realiza actividades de recolección y transporte de NFU debe cumplir con llevar el registro de la cantidad de neumáticos recolectados y transportados, transportar los NFU en un vehículo cerrado o protegido por lona y que deben rotular el vehículo identificando la actividad que se está realizando. Al momento de almacenar los NFU el lugar tiene que ser techado e impermeable, tener un plan de contingencia, mantener registro de los NFU y cumplir con todos los requerimientos del Cuerpo de Bomberos.

La Ley 225-20 cataloga a los NFU como residuos especiales. En su artículo 62, estos son sometidos al régimen de la responsabilidad extendida, es decir, que los productores, importadores y comercializadores serán los responsables de la organización y financiamiento de los residuos, durante la fase de producción, post industrial y post consumo, pero la ley indica, además, que la responsabilidad extendida de los productores, importadores y comercializadores solo es aplicable a la gestión de los residuos listados en el artículo 62 y no así al manejo inadecuado llevado a cabo por terceros.

2.3 Alternativas: reutilización y valorización

2.3.1 Reutilización

- **Recauchutado:** es un proceso mediante el cual se vuelve a reutilizar un neumático usado, sustituyendo la banda de rodadura y duplicando su vida útil. Hay dos técnicas diferentes de producción de un neumático renovado: en caliente y en frío. Ambas se asemejan al proceso de fabricación de un neumático nuevo, ya que consisten en “pegar” una banda de rodadura nueva aplicando calor y presión durante un tiempo predeterminado. (TNU, 2021)

- **Neumáticos enteros utilizados en aplicaciones de ingeniería civil:** esas aplicaciones varían desde protección costera, barreras contra la erosión, arrecifes artificiales, rompeolas, refugios contra avalanchas, estabilización de laderas, terraplenes de carreteras y operaciones de construcción de vertederos, barreras acústicas, aislamiento. Este mercado está por el momento confinado a proyectos individuales y, por lo tanto, a una escala bastante pequeña. (ETRMA, End of life tyres: A valuable resource with growing potential, 2011)
- **Neumáticos triturados:** los neumáticos enteros se cortan mecánicamente en pedazos que varían en tamaño de 25 a 300 mm. El agregado derivado de neumáticos se utiliza como base para carreteras y vías férreas, como material de drenaje que reemplaza a la arena y la grava, en la construcción de rellenos sanitarios, rellenos de subrasante y terraplenes; relleno para muros y puentes y aislamiento de subrasante para carreteras. El agregado derivado de neumáticos es un 30-50% más liviano; drena 10 veces mejor que un suelo bien graduado y proporciona un aislamiento 8 veces mejor que la grava. (ETRMA, End of life tyres: A valuable resource with growing potential, 2011)
- **Caucho granulado y en polvo:** después de retirar los componentes de acero y tela, el caucho restante se reduce a caucho granular.

Las aplicaciones incluyen productos de caucho moldeado como ruedas para caddies, cubos de basura, carretillas y cortadoras de césped, mobiliario urbano y postes de señalización.

El caucho granulado y en polvo también se utiliza como suelo para parques infantiles y estadios deportivos, como alfombras amortiguadoras para escuelas y establos, como adoquines o baldosas para patios y alrededores de piscinas, así como materiales para

techos. El caucho granulado también se usa ampliamente en la construcción de césped artificial, por ejemplo, en campos de fútbol. (ETRMA, End of life tyres: A valuable resource with growing potential, 2011)

- **Asfalto modificado con caucho:** aprovecha las características de elasticidad y absorción de ruido del caucho. Aunque esto aumenta la vida útil de la superficie de la carretera, reduce la contaminación acústica y aumenta la seguridad en condiciones de carretera mojada, todavía está relativamente infrutilizado a pesar de sus muchas ventajas. (ETRMA, End of life tyres: A valuable resource with growing potential, 2011)

2.3.2 Valorización

Conjunto de acciones asociadas cuyo objetivo es el aprovechamiento de los recursos, sean materiales o energéticos, contenidos en los residuos, que representen un beneficio económico, sin poner en peligro la salud humana y sin utilizar métodos que puedan causar perjuicio al medio ambiente. (Congreso, 2020)

- **Hornos de cemento:** el sector del cemento es la principal aplicación para la recuperación de energía y los nuevos hornos están cada vez más equipados para utilizar NFU como combustible complementario. Los NFU ofrecen un valor calorífico neto alto comparable al del coque de petróleo e incluso superior al del carbón. Las industrias que consumen mucha energía utilizan NFU para reducir sus gastos de combustible y cumplir con las normas de control de la contaminación y la calidad del aire. (ETRMA, End of life tyres: A valuable resource with growing potential, 2011)

2.4 Pirólisis

La palabra "pirólisis" se deriva de dos palabras del griego antiguo piro (πυρο) que significa fuego y lisis (λύσις) que significa separación (o solución), por lo que pirólisis significa separación por fuego o calor (Ibrahim, 2020, pp. 1-12).

La pirólisis es un proceso de tratamiento termoquímico irreversible de materiales sólidos o líquidos a temperaturas elevadas en una atmósfera libre de oxígeno. Durante la pirólisis, las moléculas se someten a temperaturas muy altas, lo que genera vibraciones moleculares muy elevadas, en las que las moléculas se estiran y se agitan hasta tal punto que comienzan a descomponerse en moléculas más pequeñas (Ibrahim, 2020, pp. 1-12).

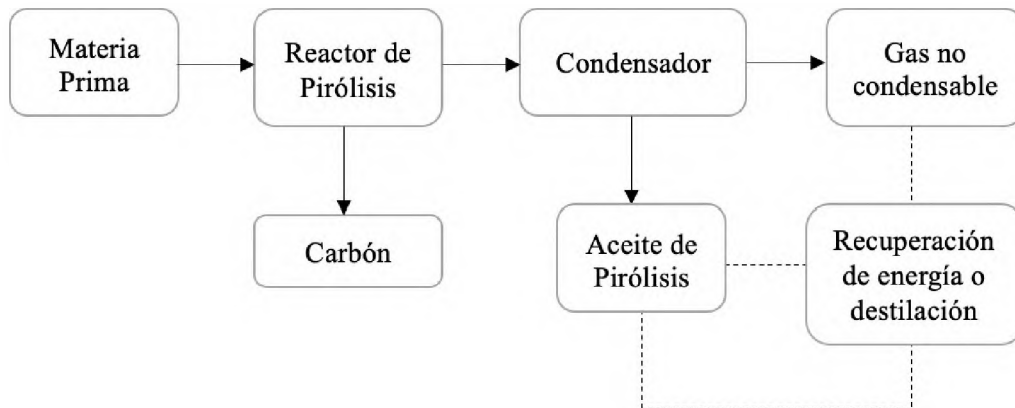
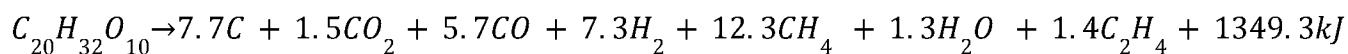


Figura 1. Proceso de pirólisis

Las reacciones de pirólisis ocurren a temperaturas entre 400 y 800 °C. A medida que cambia la temperatura, la distribución del producto puede verse alterada. Las temperaturas de pirólisis más bajas suelen producir más productos líquidos y sólidos, mientras que las temperaturas más altas favorecen la producción de más gases como resultado de reacciones de craqueo térmico más potentes. La temperatura de pirólisis también tiene un efecto significativo

sobre las propiedades de los productos de pirólisis. El valor calorífico del aceite pirolítico, por ejemplo, aumenta principalmente al aumentar la temperatura.



Ecuación 1. Ecuación química de la reacción que sucede en la pirólisis (Parra, 2016)

Tabla 2. Reacción química que sucede en la pirólisis en cada temperatura (Parra, 2016)

Temperatura (rango °C)	<u>Reacción Química</u>
100-120	<u>Deshidratación</u>
250	<u>Deshidratación y desulfuración.</u> Disociación molecular de agua y dióxido de carbono. Comienza la liberación de sulfuro de hidrógeno.
340	<u>Rotura de enlaces en compuestos alifáticos.</u> Comienza la liberación de metano y otros compuestos alifáticos ligeros.
380	<u>Fase de carbonización.</u> Concentración de carbón en los residuos.
400	<u>Rotura de enlaces C-O y C-N.</u>
400-600	<u>Descomposición de los materiales bituminosos.</u> Generación de aceites y alquitranes. Carbonización de baja temperatura.
600	<u>Cracking de los materiales bituminosos.</u> Generación de hidrocarburos gaseosos de cadena corta e hidrocarburos aromáticos (derivados del benceno).
>600	Reacción de etileno a ciclohexano; generación de compuestos aromáticos volátiles.

Según Hassan Al-Haj Ibrahim en el libro Avances Recientes en la Pirólisis (Introductory Chapter: Pyrolysis, 2020, pp. 1-12) la pirólisis puede llevarse a cabo a presión atmosférica o

superior o en vacío donde se evita la combustión incontrolada. En la práctica, sin embargo, la pirólisis se lleva a cabo principalmente a presión atmosférica, ya que la creación de vacío o alta presión aumenta drásticamente el costo del equipo de proceso.

La pirólisis es básicamente un proceso de descomposición térmica en el que una materia prima de alto peso molecular se descompone o craquea para producir compuestos volátiles primarios. Las reacciones primarias de descomposición térmica y deshidrogenación van acompañadas en general de reacciones secundarias de polimerización e isomerización de los compuestos volátiles primarios. El alcance de las reacciones secundarias depende de las condiciones de pirólisis, así como del tipo de reactor de pirólisis utilizado. Las reacciones secundarias generalmente se ven favorecidas por tiempos de residencia elevados y temperaturas elevadas. Como es prácticamente imposible lograr una atmósfera completamente libre de oxígeno, también se producirán una pequeña cantidad de reacciones de oxidación. Los rendimientos de los productos de pirólisis se deben tanto a las reacciones de descomposición primaria de la materia prima como a las reacciones secundarias subsiguientes de los compuestos volátiles primarios. (Ibrahim, 2020)

2.4.1 Tipos de pirólisis

Santiago A. Mejía y Sergio A. Upegui en *“La Pirólisis y otros métodos para el aprovechamiento de residuos de neumáticos como fuente de energía para la industria”* (2021) dicen que, de acuerdo con los parámetros operativos, la pirólisis se puede clasificar como pirólisis lenta, rápida y flash.

- **Pirólisis lenta**

La pirólisis lenta ocurre a una temperatura de proceso más baja, una velocidad de calentamiento más baja y tiempos de residencia más largos, lo que favorece la producción de carbón.

- **Pirólisis rápida**

La pirólisis rápida favorece la formación de bioaceite y se produce a una temperatura moderada, un tiempo de residencia corto del vapor y alta velocidad de calentamiento.

- **Pirólisis flash**

La pirólisis instantánea por flash es el proceso en el que el tiempo de reacción es de solo varios segundos, o incluso menos, y la velocidad de calentamiento es muy alta; debido al rápido calentamiento, el tamaño de las partículas debe ser pequeño.

2.4.2 Tipos de reactores

La etapa de reacción, en la que se realiza el proceso de pirólisis, se puede llevar a cabo usando diferentes tecnologías que dependen de la naturaleza del lecho del reactor y de aspectos prácticos de su operación. (Mejia & Upegui, 2021)

- **Reactor de lecho fluidizado**

Es el reactor más estudiado y desarrollado por su amplia aplicabilidad en la industria petrolera para reacciones de cracking catalítico, tiene una configuración vertical y en procesos de pirólisis la materia prima es alimentada por la parte superior del reactor para que al llegar al fondo entre en contacto con el medio fluidizado de transferencia de calor, el cual, por lo general, es arena u otro sólido inerte. El medio fluidizado cumple la función de mejorar la transferencia

de calor o actuar como catalizador del proceso, además, su calentamiento puede ser directo, o de forma indirecta por medio del gas de fluidización, que es de carácter inerte con respecto a la materia prima o el sustrato que se va a descomponer térmicamente. Los reactores de lecho fluidizado operan en condiciones de pirólisis rápida, lo que mejora el rendimiento del aceite de pirólisis. Además, esta tecnología facilita el funcionamiento continuo, lo que es de gran relevancia para la ampliación del proceso. Sin embargo, estos reactores son de diseño y operación complejos y, además, requieren una mayor inversión que otras tecnologías, lo que dificulta su utilización. (Mejia & Upegui, 2021)

- **Reactor de cono rotatorio**

Consta de un recipiente de reacción vertical en el que in lecho o cama de materia prima está en contacto directo con un lecho de calentamiento de arena u otro sólido inerte, donde se mezcla mecánicamente aprovechando el momento angular del cono, lo cual reduce el consumo de gas de fluidización y mejora la transferencia de calor, su calentamiento también puede ser directo e indirecto. (Mejia & Upegui, 2021)

- **Reactor de tornillo sinfín**

Su funcionamiento es análogo al esquema de funcionamiento para un reactor de cono rotatorio, en donde la materia prima entra en contacto directo con el lecho de calentamiento y se mezcla el conjunto en un recipiente horizontal por medio de un tornillo sinfín. Este reactor no usa gas de fluidización y su calentamiento es de tipo indirecto por medio de una chaqueta de calentamiento con gases de combustión. (Mejia & Upegui, 2021)

- **Reactor de lecho fijo**

A diferencia de un reactor de lecho fluidizado, son recipientes verticales en los que se calienta únicamente el fondo del reactor, lo que genera un perfil térmico a lo largo de sus paredes, su calentamiento es, la mayoría de los casos, indirecto para evitar fluidización en el lecho fijo, aunque en algunos casos emplea una corriente de gas inerte de arrastre para extraer la fracción volátil generada y evitar fenómenos de reflujo de condensados y reacciones de craqueo secundarias indeseadas. (Mejia & Upegui, 2021)

- **Reactores de horno rotatorio**

Es el tipo de reactor más usado industrialmente por su gran similitud con los hornos rotatorios de la industria cementera, aunque en procesos de pirólisis su calentamiento se da de manera indirecta con gases de combustión para prevenir fluidización de la materia prima y operaciones de separación de material sólido suspendido en la fracción volátil. La configuración del reactor es totalmente horizontal u horizontal con una leve inclinación, lo cual permite operar el proceso de manera discontinua o continua respectivamente. (Mejia & Upegui, 2021)

2.4.3 Parámetros de operación

Entre los parámetros más influyentes en los procesos de pirólisis se destacan los que tienen mayor efecto en el producto del aprovechamiento.

Los parámetros del proceso afectan fuertemente el rendimiento y la composición de los productos de pirólisis, debidos a las diversas reacciones químicas que se favorecen en cada condición. Los principales parámetros son: tamaño de la partícula, velocidad de calentamiento,

temperatura de pirólisis, velocidad de flujo de gas, velocidad de alimentación, tiempo de retención y composición de biomasa. (Mejia & Upegui, 2021)

- **Temperatura**

Esta es la principal variable a tener en cuenta dentro del proceso de pirólisis, por ser la que más afecta. La temperatura óptima (a presión ambiente) para la conversión total del neumático son los 500 °C.

La producción de aceite pirolítico oscila entre los 425 y los 720 °C, y los rendimientos máximos varían entre los 38 y 60 %, lo cual se relaciona estrechamente con la velocidad del flujo másico del neumático y el tamaño de las partículas, el tipo de reactor y el tiempo de residencia, ya que en algunos casos estos parámetros pueden ocasionar reacciones secundarias que convierten compuestos líquidos en gaseosos o gaseosos en fase sólida. (Mejia & Upegui, 2021)

- **Velocidad de calentamiento**

La velocidad de calentamiento y la temperatura final son variables independientes y se pueden parametrizar de forma separada. Sin embargo, las velocidades de calentamiento más rápidas conducen a temperaturas más altas, lo que puede llevar a más reacciones secundarias que pueden producir más productos en fase gaseosa. La velocidad de calentamiento está relacionada con el tipo de reactor, y algunos de ellos producen velocidades más altas de calentamiento. (Mejia & Upegui, 2021)

- **Tamaño de partículas**

A partículas más pequeñas se tienen temperaturas uniformes durante el proceso de pirólisis, aunque existe la probabilidad de pasar fácilmente de fase líquida a una fase gaseosa, mientras que tamaños de partículas más grandes tienen un calentamiento menos uniforme, debido a una afectación en la transferencia de calor y por tanto la pirólisis ocurre a una temperatura más baja.

Partículas pequeñas generan un mayor producto en fase líquida (50% en peso), mientras que partículas de mayor tamaño generan un 40% en peso.

La transferencia de calor durante la pirólisis presenta dificultades porque la biomasa es un mal conductor de calor. Por lo tanto, el tamaño de las partículas influye en el rendimiento del bio aceite producido y es fundamental para minimizar los problemas de transferencia de calor en el proceso. (Mejia & Upegui, 2021)

- **Composición de la materia prima**

Este parámetro tiene una gran influencia en las variaciones del rendimiento del líquido y el contenido de azufre dentro del producto final. (Mejia & Upegui, 2021)

- **Tiempo de pirólisis**

El tiempo de pirólisis está relacionado con la velocidad de calentamiento: velocidades de calentamiento más bajas que requieren tiempos de pirólisis más largos. Los tiempos de residencia más largos requieren un reactor más grande, con mayores costos de capital. (Mejia & Upegui, 2021)

2.4.4 Materiales que pueden ser tratados por pirólisis

Los materiales que pueden ser tratados por la tecnología de la pirólisis son el caucho de neumáticos usados, plásticos, biomasa e hidrocarburos (sludge, lodo de fondo de tanque y desechos oleosos).

- **Pirólisis de neumáticos**

La pirólisis descompone mediante reacción química la goma del neumático usado en energía y materia prima reutilizable: sólidos (negro carbón), líquidos (aceite pirolítico) y gases (hidrocarburo empleado como fuente de energía alternativa).

- **Pirólisis de plástico**

La pirólisis del plástico es un procedimiento de destilación que permite transformar residuos plásticos en carburante. Los residuos son calentados y se transforman en gas. Se obtienen diferentes tipos de carburantes: gasóleo (diesel), gasolina y gas residual incondensable.

- **Pirólisis de biomasa**

La pirólisis de biomasa involucra la descomposición térmica de material vegetal residual, siendo los principales productos de la reacción biogás o gas de síntesis, productos líquidos como bioaceites y alquitrán, y biocarbón como residuo sólido.

- **Pirólisis de lodo de aceite (sludge)**

La pirólisis de lodo aceite convierte el lodo de aceite en aceite, agua y arena para su reutilización.

2.4.5 Productos finales de la pirólisis

Los productos finales de la pirólisis incluyen productos sólidos, gases no condensables y residuos líquidos, gases condensables, que se convierten en aceite de pirólisis. El tipo y el rendimiento de los productos de pirólisis dependen en su mayor parte del tipo de material tratado. Los productos finales de la pirólisis también se pueden controlar optimizando los parámetros de la pirólisis, como la temperatura, la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia, la presión, el tamaño de las partículas de alimentación y el tipo de reactor. (Miteco, 2023)

- **Gas**

Gas, cuyos componentes básicos son CO, CO₂, H₂, CH₄ y compuestos más volátiles procedentes del cracking de las moléculas orgánicas, conjuntamente con los ya existentes en los residuos. Este gas es muy similar al gas de síntesis obtenido en la gasificación, pero hay una mayor presencia de alquitranes, ceras, etc. en detrimento de gases, debido a que la pirólisis trabaja a temperaturas inferiores a la gasificación. (Miteco, 2023)

- **Residuo Líquido**

Residuo líquido, compuesto básicamente por hidrocarburos de cadenas largas como alquitranes, aceites, fenoles, ceras formadas al condensar a temperatura ambiente. (Miteco, 2023)

- **Residuo sólido**

Residuo sólido, compuesto por todos aquellos materiales no combustibles, los cuales o bien no han sido transformados o proceden de una condensación molecular con un alto contenido en carbón, metales pesados y otros componentes inertes de los residuos. (Miteco, 2023)

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1 Metodología

La metodología de investigación es un marco sistemático que se utiliza para resolver el problema de investigación mediante el uso de los mejores y más factibles métodos para llevar a cabo la investigación, al tiempo que se alinea con la finalidad y los objetivos de su investigación. La metodología de investigación incluye responder al qué, al por qué y al cómo de su investigación. (Pamplona, 2022)

Metodología utilizada:

Este trabajo está basado en la experiencia de siete meses de trabajo de una planta de pirólisis convencional. Se estudió la experiencia y se realizaron propuestas de mejora de la planta, consultando a los que la construyeron, consultando a los comerciantes del producto y a los consumidores del producto.

- Visitas al terreno
- Levantamiento de datos.
- Consulta de la literatura existente.

Se vio en principio cual es la abundancia de la materia prima, cuáles son las nuevas tecnologías, cuál es la disponibilidad de los vendedores, cuál es la disposición de los consumidores para el producto.

3.2 Nivel de investigación

Para el desarrollo de este proyecto, se utilizó el nivel de investigación exploratoria y descriptiva, una investigación exploratoria, es cuando se quiere probar la viabilidad de realizar un estudio más extenso, de esta misma forma, la investigación descriptiva permite describir de manera específica el propósito de la investigación y definir las estrategias necesarias para el desarrollo de cualquier proyecto. (DeCarlo, 2011)

3.3 Tipo de investigación

El tipo de investigación es según:

- La finalidad: Aplicada, debido a que el enfoque principal del proyecto consiste en la transformación de condiciones específicas para aumentar la efectividad y calidad de esta.
- El alcance: Según el alcance es exploratorio y descriptivo, debido al enfoque del proyecto, mediante la investigación exploratoria observamos todos lo relacionado a la situación actual acerca de un tema poco conocido por la sociedad, de esta misma forma se apoya de la investigación descriptiva, tomando en cuenta todos los distintivos y diferenciadores entre el actual y la propuesta a presentar.
- Orientación: Enfocada a la aplicación, con el fin de lograr la factibilidad del proyecto tomando en consideración la toma de decisiones para ejecución del proyecto.

3.4 Diseño de investigación

En la presente investigación se utilizó una metodología no experimental, donde durante el estudio realizado, no se manipulo o altero la información presentada, sino que se basa en la interpretación y observación para llegar a un análisis de resultado, se planteó darle respuesta al

planteamiento del problema y mejora del mismo, el cual está orientado a diseñar y evaluar una planta de pirólisis para la valorización de neumáticos fuera de uso mediante un análisis de factibilidad en el Gran Santo Domingo, República Dominicana, por tanto en este tipo de metodología no se basará en encuestas ya que no se puede demostrar una relación de causa y efecto.

3.5 Población y Muestra

Debido al enfoque del proyecto, se sitúa en el Sector de Santo Domingo Norte, correspondiente a una planta de pirólisis para neumáticos fuera de uso, de modo que esta producirá el gas necesario para el abastecimiento y comercialización del producto final de la planta.

3.6 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

- **Método para la recolección de datos**

Para el desarrollo de la investigación utilizamos métodos tales como:

-Observación

-Análisis de resultado

-Bibliotecas

- **-Recolección de datos**

Fuentes Primarias: Informaciones obtenidas de forma directa mediante visita al terreno y visitas a las plantas existentes en República Dominicana.

Información recogida de forma directa mediante entrevistas por teléfono y experiencia de la compañía (Consulta con los fabricantes de equipos y consumidores del producto)

Fuentes secundarias: Libros y/o materiales disponibles en bibliotecas, estudios relacionados al proceso de pirólisis, expuestos por institutos privados y públicos especializados en la materia.

- **Técnicas de recolección de datos**

Observación directa, de plantas de pirólisis de neumáticos fuera de uso

Conversaciones informales de manera directa con jefes de planta, dueños de estas, especialistas económicos, medioambientales y técnicos del área.

SEGUNDA PARTE

CAPÍTULO IV: ESTUDIO TÉCNICO

4.1 Pirólisis de NFU

La pirólisis de neumáticos es un método químico para reciclar NFU a alta temperatura en una atmósfera libre de oxígeno. A través de la pirólisis de neumáticos, podemos obtener aceite de pirólisis, alambres de acero, negro de carbón y gas combustible, presentados en la Tabla 3 en proporción. Reduce en gran medida los residuos, que es un problema medioambiental urgente en el país y en otras partes del mundo.



Ilustración 3. Proporción de producto final (Beston, 2023)

Tabla 3. Productos finales del proceso de pirólisis en % (Beston, 2023)

Productos finales	Proporción
Aceite de pirólisis	35-45%
Carbón negro	30-35%
Alambre de acero	8-15%
Gas combustible	8-15%

4.2 Productos de pirólisis de neumáticos fuera de uso

4.2.1 Aceite de pirólisis

El producto producido a partir de la pirólisis de neumáticos fuera de uso es el gas condensable que forma el aceite de pirólisis o el aceite pirolítico. Este aceite es una mezcla compleja de hidrocarburos con una alta concentración de compuestos aromáticos. El uso principal del aceite de pirólisis es como combustible alternativo debido a su favorable composición de hidrocarburos. Su alto poder calorífico determina su valor como combustible alternativo. El poder calorífico del aceite de pirólisis de neumáticos fuera de uso está en el rango de 37,4 a 44 MJ/kg. (Mahapatra, 2014)

En comparación con el diésel disponible comercialmente, los valores caloríficos brutos son similares a los del aceite de pirólisis, que es ligeramente inferior, mientras que el poder calorífico del diésel comercial se mide por encima de 44 MJ/kg.

Estudios utilizando aceite pirolítico como sustituto de combustible en motores de combustión interna no muestran efectos adversos para el motor y resultados favorables en términos de su funcionalidad y emisiones. Específicamente, Murugan, Ramaswamy y Nagarajan (Murugan, Ramaswamy, & Nagarajan, 2008) probaron el rendimiento del aceite de pirólisis de neumáticos fuera de uso desulfurado destilado y mezclas de diésel comercial (20 % y 90 % de relación de aceite pirolítico) como combustibles para la combustión en un motor diésel refrigerado por aire con cilindro de cuatro tiempos sin modificaciones adicionales en el motor. (Mahapatra, 2014)

Se determinó que el motor es capaz de funcionar satisfactoriamente con una mezcla de hasta un 90 % de aceite pirolítico con diésel según Murugan, Ramaswamy y Nagarajan (Murugan, Ramaswamy, Nagarajan, 2008).

La experiencia de FSS, quienes usaron 100% de aceite de pirólisis en el motor de una planta de 35 kW de 2 cilindros y usaron una mezcla 50-50 diesel-aceite pirólisis en el motor de 4 cilindros de una planta de 75 kW, en ambos casos los equipos no dieron señales de daños durante los 7 meses que tuvieron en uso.

4.2.2 Gases no condensables

El producto gaseoso capturado después de la recuperación del aceite pirolítico se denomina gas pirolítico o pirogas que no es condensable en condiciones atmosféricas. Al igual que con el aceite pirolítico, el gas pirolítico depende de factores similares que influyen en su composición y rendimiento. Este gas generalmente se compone de parafinas y olefinas con números de carbono de C_1 a C_5 . La composición bruta de este gas pirolítico generalmente incluye hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano, eteno, etano, propano, propano, metano, butano y una variedad de concentraciones más bajas de compuestos a base de azufre y nitrógeno. Comienza a un nivel de temperatura relativamente bajo (a partir de $500\text{ }^{\circ}\text{C}$) y continúa hasta unos $1.000\text{ }^{\circ}\text{C}$. (Strydom, 2017)

Aunque la pirólisis de neumáticos fuera de uso ocurre en un ambiente inerte, todavía se forman algunos óxidos. Estos óxidos presentes en el gas pirolítico son el resultado de los aditivos requeridos en la producción de neumáticos, tales como óxidos de hierro y óxidos de zinc.

Los valores caloríficos brutos del gas pirolítico se han medido en el rango de $34,6 - 84,0\text{ MJ/m}^3$.

4.2.3 Negro de Carbón

Una vez que se completa la pirólisis de neumáticos fuera de uso, queda un depósito sólido, excluyendo los alambres de acero, que contiene negro de carbón (Strydom, 2017). Este

depósito rico en carbono se llama acertadamente carbonilla de neumáticos o negro de carbón pirolítico. Como se mencionó, el carbón pirolítico contiene negro de carbón, esto se debe al hecho de que el negro de carbón forma parte del material original del neumático. Al ser un material no pirolizable, el negro de carbón permanece como parte del material carbonizado después de que se ha producido la pirólisis de los neumáticos fuera de uso (Strydom, 2017).

4.2.4 Acero

Los neumáticos contienen alambres de acero y la cantidad oscila entre el 8 % y el 15 % del desperdicio total de neumáticos. Todo el acero presente en el neumático se puede separar una vez que se completa el proceso de reciclaje de pirólisis.

4.3 Negocio de pirólisis de NFU

Tabla 4. Aplicaciones de los productos (Beston, 2023)

Productos finales	Aplicaciones
Aceite de pirólisis	<ol style="list-style-type: none"> 1. Utilizado como combustible para calentar el reactor de pirólisis. 2. Se puede utilizar como combustible en industrias pesadas como fábricas de acero, hierro y calderas, cerámica, energía, industrias químicas.
Carbón negro	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se utiliza como material de construcción o combustible de baja calidad, o como relleno en la industria del caucho, pinturas y revestimientos, producción de tintas y otras aplicaciones industriales. 2. Fabricación de ladrillos de carbono mediante equipos de fabricación de briquetas y vendas.
Alambre de acero	<ol style="list-style-type: none"> 1. Vender directamente 2. Hacer florecer el acero mediante prensado hidráulico
Gas combustible	Combustible alternativo para calentar el reactor (proceso de pirólisis autosuficiente)

El aceite producido a partir de la pirólisis de NFU es utilizado por hornos de cemento, fabricantes de papel, combustible en industrias pesadas como fábricas de acero, hierro y calderas, cerámica, energía, industrias químicas. Aunque los precios del petróleo fluctúan mucho, la demanda se mantiene constantemente alta.

El negro de carbón recuperado se usa para producir mangueras de jardín, tinta de impresión, cintas transportadoras y revestimientos para automóviles. También se puede quemar como combustible sin humo.

Uno de los gastos más importantes en la pirólisis de NFU son los altos requisitos de energía necesarios para calentar el reactor a temperaturas relevantes para que tenga lugar la pirólisis. Se utiliza el gas pirolítico in situ con la intención de reducir los costes de gestión de la planta. El alto poder calorífico del gas pirolítico hace que su combustión sea ideal para los requerimientos energéticos de la pirólisis, así como de otros sistemas energéticos. Esto haría que el proceso de pirólisis sea totalmente autosuficiente.

4.4 Materia Prima: NFU

En base a la cantidad y tipo de los vehículos se puede calcular que a nivel nacional en el año 2022 más de 19 millones de neumáticos estaban en uso (629 149 toneladas) como se muestra en la Tabla 5. En la misma línea, se puede calcular que en el Gran Santo Domingo en el año 2022 más de 8 millones de neumáticos estaban en uso (309 227 toneladas) como se muestra en la Tabla 6.

Sin embargo, con este dato aún no se sabe si esta cantidad es la misma que se genera anualmente como residuo en la República Dominicana.

En los países industrializados se generan en promedio 8 – 10 kg de neumáticos usados por habitante al año. (Reschner, 2019) Considerando que la República Dominicana es un país en vía de desarrollo y además la norma relativa a la obligación del cambio de un neumático no se aplica tan estricto como en la mayoría de los países industrializados, uno puede estimar que se generan aproximadamente 4 kg de neumáticos usados por habitante al año. (Skoddow, 2014)

Si tomamos esta hipótesis como base, podríamos estimar que en la República Dominicana se generan aproximadamente 44 480 toneladas de neumáticos anuales y en el Gran Santo Domingo se generan aproximadamente 18 317 toneladas de neumáticos anuales.

Tabla 5. Cantidad y tipos de vehículos a nivel nacional 2022-2023

Tipo	Cantidad* 2022	%	Número de neumáticos por vehículo	Total de neumáticos en uso	Promedio kg/neumático	Peso total en tn
Automóviles	1,085,675	19.9	4	4,342,700	10	43,427
Autobuses	123,344	2.3	6	740,064	75	55,505
Jeep	621,291	11.4	4	2,485,164	13	32,307
Carga	497,352	9.1	12	5,968,224	75	447,617
Motocicletas	3,063,704	56.1	2	6,127,408	5	30,637
Volteo	23,920	0.4	6	143,520	75	10,764
Máquinas pesadas	26,394	0.5	4	105,576	80	8,446
Otros	22,316	0.4	2	44,632	10	446
Total	5,463,996	100.0		19,957,288		629,149

Tabla 6. Cantidad y tipos de vehículos en el Gran Santo Domingo 2022-2023

Tipo	Cantidad* 2022	%	Número de neumáticos por vehículo	Total de neumáticos en uso	Promedio kg/neumático	Peso total en tn
Automóviles	615,916	29.2	4	2,463,664	10	24,637
Autobuses	69,120	3.3	6	414,720	75	31,104
Jeep	292,768	13.9	4	1,171,072	13	15,224
Carga	244,734	11.6	12	2,936,808	75	220,261
Motocicletas	849,874	40.2	2	1,699,748	5	8,499
Volteo	10,404	0.5	6	62,424	75	4,682
Máquinas pesadas	14,156	0.7	4	56,624	80	4,530
Otros	14,547	0.7	2	29,094	10	291
Total	2,111,519	100.0		8,834,154		309,227

4.4.1 Disponibilidad materia prima en el Gran Santo Domingo

En 2022-2023, se registraron en circulación en el Gran Santo Domingo 615 916 automóviles, 292 768 jeepetas y 244 734 camiones, como se muestra en la Tabla 7. De manera similar, el número de varias categorías de vehículos registrados en circulación en el Gran Santo Domingo entre 2018 y 2022 se enumeran en la Tabla 7. Esta información se recopiló del informe de Parque Vehicular de la DGII de los respectivos años. La Figura 2 indica que la cantidad de vehículos en circulación en el Gran Santo Domingo en 2018-2019 fue de 2 041 087, que se incrementó a 2 111 519 en 2022-2023. La cantidad de neumáticos se calculó en función de estos vehículos, que se muestra en la Tabla 8. La Tabla 8 especifica la cantidad de varias categorías de neumáticos que crece por año, como neumáticos para automóviles, neumáticos para jeepetas y neumáticos para camiones en 2018-2019, que fueron 2 164 420, 889 039 y 2 669 427, y aumentó a 2 463 664, 1 171 072 y 2 936 808 en 2022-2023.

Tabla 7. Vehículos en circulación en el Gran Santo Domingo

Tipo	2018-19	2019-20	2020-21	2021-22	2022-23
Automóviles	541,105	562,712	579,677	601,113	615,916
Autobuses	58,060	61,181	63,778	66,676	69,120
Jeep	222,259	239,194	250,702	269,185	292,768
Carga	222,452	227,885	232,134	238,683	244,734
Motocicletas	961,803	985,648	1,013,492	1,069,347	849,874
Volteo	9,564	9,652	9,847	10,070	10,404
Máquinas pesadas	13,693	13,829	13,942	14,342	14,156
Otros	12,151	12,832	13,271	13,961	14,547

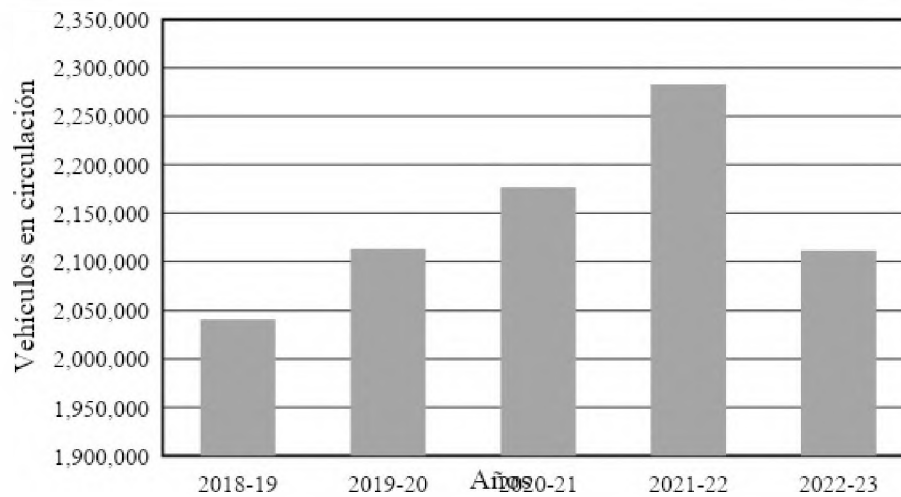


Figura 2. Total de vehículos en circulación en el Gran Santo Domingo

Tabla 8. Neumáticos en circulación en el Gran Santo Domingo

Tipo	2018-19	2019-20	2020-21	2021-22	2022-23
Automóviles	2,164,420	2,250,848	2,318,708	2,404,452	2,463,664
Autobuses	348,360	367,086	382,668	400,056	414,720
Jeep	889,036	956,776	1,002,808	1,076,740	1,171,072
Carga	2,669,424	2,734,620	2,785,608	2,864,196	2,936,808
Motocicletas	1,923,606	1,971,296	2,026,984	2,138,694	1,699,748
Volteo	57,384	57,912	59,082	60,420	62,424
Máquinas pesadas	54,772	55,316	55,768	57,368	56,624
Otros	24,302	25,664	26,542	27,922	29,094

La Figura 3 muestra el número total de neumáticos que usaron los vehículos en circulación desde el año 2018–2023. En 2018-2019, estos neumáticos fueron 8,1 millones que aumentaron a 8,8 millones en 2022-2023. En la Figura 3 se puede observar una disminución de la cantidad de neumáticos en uso en 2022-2023 debido a la disminución de motocicletas y máquinas pesadas en circulación, visto en la Tabla 7. Estos neumáticos aumentan cada año, y la tendencia a aumentar depende del aumento del número de vehículos en circulación. Al aumentar los vehículos en circulación, los neumáticos por año también van a aumentar.

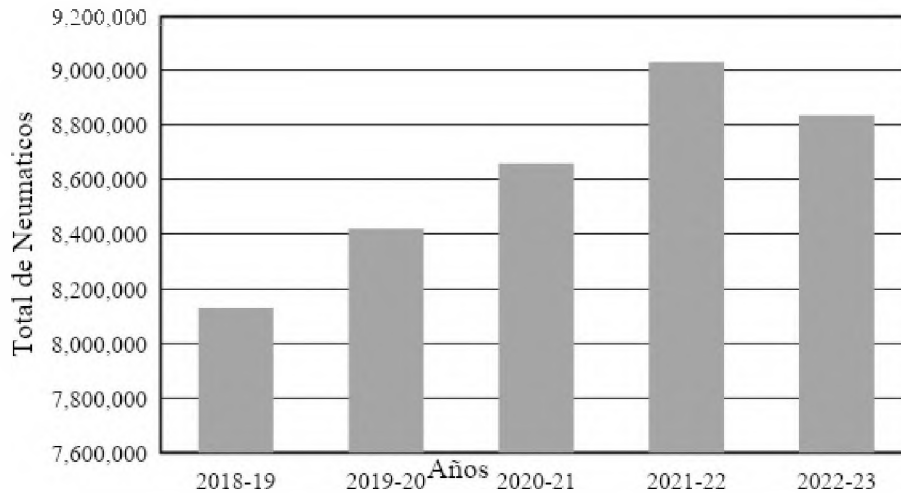


Figura 3. Total de neumáticos en circulación en el Gran Santo Domingo

4.4.2 Neumáticos Fuera de Uso a estar disponibles en el Gran Santo Domingo

La materia prima estimada en Gran Santo Domingo por año para la producción del proyecto se adquiere de 2018 a 2023 y está presente en la Figura 4 con el rango de 194 a 216 mil toneladas. La materia prima disponible en Gran Santo Domingo depende del número de vehículos en circulación. De acuerdo con la Tabla 7 de vehículos en circulación por año, los neumáticos se calculan multiplicando el número de neumáticos por sus respectivos vehículos. El número de neumáticos calculado se muestra en la Tabla 8. Debido al funcionamiento de estos vehículos, sus neumáticos deben desecharse después de 4 a 5 años. Así, los neumáticos montados en los vehículos en circulación en 2018-2019 se consideran que llegaron al final de su vida útil en el año 2022-2023. Se ha calculado el número anual de NFU, que se considera como materia prima disponible y se utiliza para la producción del proyecto. Se estima que el peso de los diferentes neumáticos disponible en la Tabla 6, al llegar al final de su vida útil disminuye en un 30%, disponible en la Tabla 10. Al considerar el peso de los neumáticos y algunos factores de

conversión, en la Tabla 9 se conoce la cantidad de neumáticos convertidas en toneladas. Además, si aumenta el crecimiento de los vehículos en circulación, también aumentaría el potencial de materia prima esperado para los próximos años.

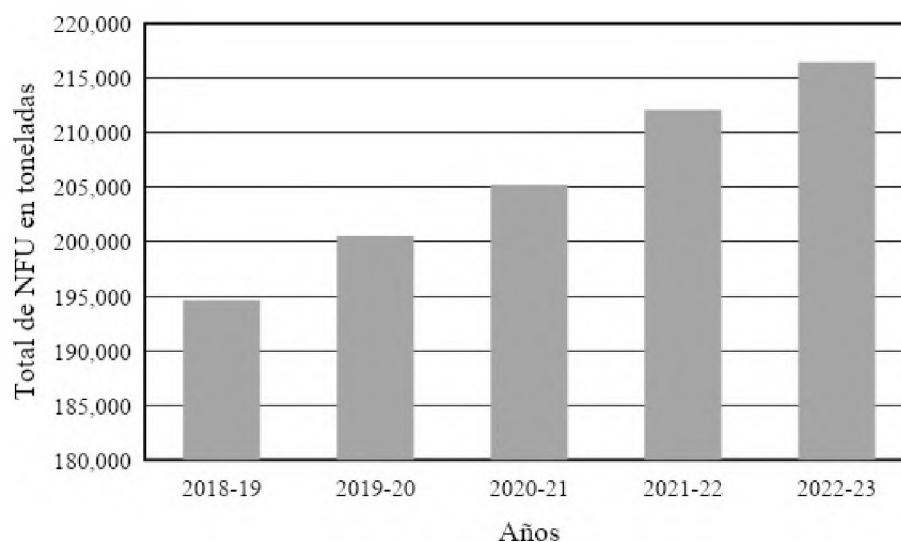


Figura 4. Total estimado de NFU en toneladas en el Gran Santo Domingo

Tabla 9. NFU estimado en toneladas en el Gran Santo Domingo

Tipo	2018-19	2019-20	2020-21	2021-22	2022-23
Automóviles	15,151	15,756	16,231	16,831	17,246
Autobuses	18,289	19,272	20,090	21,003	21,773
Jeep	8,090	8,707	9,126	9,798	10,657
Carga	140,145	143,568	146,244	150,370	154,182
Motocicletas	6,733	6,900	7,094	7,485	5,949
Volteo	3,013	3,040	3,102	3,172	3,277
Máquinas pesadas	3,067	3,098	3,123	3,213	3,171
Otros	170	180	186	195	204

Tabla 10. Peso promedio de los neumáticos al final de su vida útil

Tipo	Promedio kg/neumático	-30% en kg
Automóviles	10	7
Autobuses	75	52.5
Jeep	13	9.1
Carga	75	52.5
Motocicletas	5	3.5
Volteo	75	52.5
Máquinas pesadas	80	56
Otros	10	7

4.5 Necesidad de energía

La capacidad teórica del reactor es de 37 tn, para el caucho de NFU triturados asumimos un 75 % o sea 28 tn, para un rendimiento de 50% de aceite tendríamos 14 tn de aceite o lo que es lo mismo a 3 885 gal de aceite.

Para producir 6.000 galones de aceite de pirólisis se necesitan 2 500 NFU promedio por día (un gal de aceite = 8 lb de donde una tonelada es igual a 275 gal), si la pirólisis de caucho da un rendimiento en líquido de un 50% entonces necesitamos procesar 40 tn de NFU diarios.

Tomando en cuenta lo visto en la Sección 4.4.2 en el Gran Santo Domingo se estima que para el final del 2023 se van a generar 194 657 tn de NFU. Sabiendo que, para producir el potencial de 6.000 galones de aceite máx. A diario, se necesitan 14 400 tn de NFU al año. El proyecto necesitaría el 7,4 % del estimado de generación de NFU en el Gran Santo Domingo para el 2023.

Sabiendo el valor calorífico de:

Gas pirólisis: 34,6 a 84 MJ/m³ o 45 MJ/kg

Aceite de pirólisis: 37,4 a 44 MJ/kg

Diésel comercial: por encima de 44 MJ/kg

Negro de carbón: entre 25 y 34 MJ/kg

Gas pirólisis: entre 42 y 50 MJ/kg

Una carga de 28 tn de caucho produce 2.8 tn de gas de pirólisis, que es el mismo a: 45 MJ/kg X 2 800 kg caucho = 126 800 MJ.

Para el proceso de pirólisis se tiene un gasto de energía de: 30 gal/h de aceite de pirólisis. Si el proceso tarda 8 horas tenemos un gasto de 240 gal, igual a 34 656 MJ (para 6,000 gal serían 35 000 x 1.5 = 52 500 MJ).

La carga eléctrica máxima de la planta es de 50 kW/h. Una planta de 75 kW consume 4 gal/h de diesel, el diesel tiene 163 MJ/gal, es decir la planta consume 653 MJ/h X 24 horas serian 15 681.4 MJ

Para el proceso de destilación de 6 000 gal de aceite de pirólisis se necesitan 88 000 MJ. Entonces tenemos que de 40 tn de caucho recibimos 4 tn de gas de pirólisis que aportarían 180 000 MJ de energía, suficientes para suplir los 52 500 MJ del proceso de pirólisis, los 15 500 MJ para la planta eléctrica y los 88 000 MJ para la destilación de los 6,000 gal de aceite de pirólisis producidos por día.

4.6 Proceso de producción de pirólisis de NFU

La planta es un reactor de pirólisis de tipo rotativo. El reactor gira con la ayuda de motores eléctricos. Inicialmente se enciende con gasoil y luego se usa carbón o gas para mantenerlo encendido. En la planta, los neumáticos triturados se introducen en el reactor. El extremo frontal del reactor tiene una puerta con sujetadores y puede abrirse o cerrarse desbloqueando o bloqueando los sujetadores, respectivamente. El otro extremo del reactor está conectado a un elemento de sellado y una conexión flexible. El vapor volátil que se forma durante la pirólisis pasa por el separador de aceite, donde el aceite pesado se separa por gravedad y se recoge en un tanque de aceite. Se proporciona un amortiguador en la salida del separador de aceite que se conecta a una serie de tuberías enfriadas por agua. Los gases volátiles pasan a través de estos tubos condensadores donde las fracciones ligeras se convierten en líquido. Se utiliza una torre de enfriamiento para acercar la temperatura del refrigerante a la temperatura atmosférica. Toda la instalación y sus accesorios son operados por motores y bombas con la ayuda de un panel de control. La temperatura inicial a la que evoluciona el vapor volátil es 160 °C. Durante el proceso también se generan negro de carbón y alambres de acero.

4.7 Planta convencional

Se conoce también como pirólisis lenta, es el proceso el cual es sometido a temperaturas desde bajas a medias, que no aumentan a los 600 °C, con bajas tasas de calentamiento por lo que tienden a tener amplios tiempos de residencia dentro del reactor. Esto permite obtener productos tanto sólidos, como líquidos y gases. En cualquiera de los casos, los sistemas de calentamiento pueden ser directos e indirectos. En la experiencia de FSS la temperatura nunca subió a más de 450°C.

4.8 Elementos de la planta convencional

4.8.1 Reactor rotatorio

El reactor rotatorio es un tanque cilíndrico dispuesto horizontalmente sobre un horno base, el combustible se quema en el horno base para proporcionar calor al reactor de pirólisis, evitar parte de la pérdida de calor y desempeñar el papel de soporte y fijación del reactor. Los combustibles comúnmente utilizados incluyen carbón, madera, fueloil, gas natural y gas combustible no condensable recuperado durante la producción. El reactor utiliza un modo de rotación horizontal de 360 grados que le permite calentar la materia prima de manera uniforme en el reactor. Su diseño le posibilita procesar diferentes tipos de materia prima (residuos), como el NFU, plástico, madera y sludge.



Ilustración 4. Reactor rotatorio (Beston, 2023)

4.8.2 Condensador

Es un intercambiador de calor de dos tubos enfriado por agua que es proporcionada por la bomba de agua de recirculación desde la pileta de refrigeración. Después de la condensación de gases, el líquido se almacena en un tanque de recepción generalmente ubicado debajo de los condensadores.



Ilustración 5. Condensador y torre de enfriamiento (*Beston, 2023*)

4.8.3 Tanque de lavado de gases (Scrubber)

Se utiliza para prevenir el retroceso y purificar el gas combustible.



Ilustración 6. Tanque de lavado de gases (*Beston, 2023*)

4.8.4 Quemador de gases (fackel)

Manejar el exceso de gas que no se utiliza en los quemadores del horno.

4.8.5 Sistema de evacuación de gases de combustión por chimenea

Se descarga el gas de combustión de aire caliente generado en el horno del reactor, esto sucede por un ventilador de tiro inducido. El gas de combustión entra al filtro de cerámica y agua, donde son retenidas las cenizas y los gases limpios son expulsados por el tubo de la chimenea.



Ilustración 7. Sistema de evacuación de gases de combustión (Beston, 2023)

4.8.6 Cortador de neumáticos

Esta máquina se utiliza principalmente para cortar los neumáticos en piezas pequeñas.

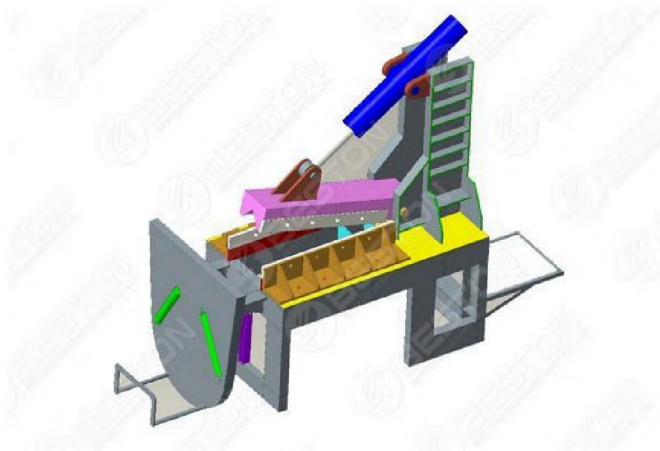


Ilustración 8. Cortador de neumáticos (Beston, 2023)

4.8.7 Compactador

Un compactador de residuos es un equipo potente cuya función principal es compactar los residuos entrantes, haciéndolos más pequeños y permitiendo que entren más residuos. Al hacer esto, se puede lograr una mayor densidad de material en el mismo espacio. La ventaja de este sistema es la capacidad de transportar más residuos en un solo viaje.

4.9 Planta mejorada

La planta mejorada tiene los mismos elementos que se describen en la sección 4.8, algunos van a ser reemplazados, como el cortador de neumáticos, y se adicionan los elementos descritos en la siguiente sección.

4.10 Elementos de la planta mejorada

4.10.1 Sistema de alimentación al reactor

El alimentador de tornillo, también llamado transportador de tornillo es un tipo de maquinaria que utiliza un motor para girar un tornillo sin fin y transportar materiales. Incluye principalmente dispositivo de conducción, eje de tornillo, hoja de tornillo, carcasa de tornillo, etc.

También se utiliza una banda transportadora para alimentar la tolva del tornillo transportador.



Ilustración 9. Sistema de alimentación al reactor
(*Beston, 2023*)

4.10.2 Sistema de manejo de negro de carbón

El sistema de descarga de escoria utiliza el tornillo dentro del dispositivo para descargar el negro de carbón del reactor al exterior del sistema, y se almacena en un contenedor. Realiza una descarga de negro de carbón cerrada, operación simple, completamente automático, limpio, libre de contaminación, que ahorra tiempo y trabajo.



Ilustración 10. Sistema de manejo de negro de carbón (Beston, 2023)

4.10.3 Destilador

El hidrocarburo se descompone de acuerdo a la densidad del producto final. Con la destilación podemos tener un aceite de pirólisis limpio, claro, paralelo en su valor comercial al diesel estándar.



Ilustración 11. Destilador (Beston, 2023)

4.10.4 Tanque de almacenamiento productos destilados

Un tanque cilíndrico de 10 000 galones para almacenar el producto de la destilación del aceite de pirólisis. Puede estar dispuesto horizontalmente, pero para economizar espacio se coloca verticalmente.

4.10.5 Compresor

Para comprimir y almacenar el gas no condensable producto del proceso.



Ilustración 12. Compresor (*DeWALT, 2023*)

4.10.6 Triturador de neumáticos móvil

El material se reprocessa principalmente mediante corte, desgarrado y exprimido para lograr el propósito de reducir el tamaño del material. Las materias primas procesadas se procesan nuevamente para alcanzar el tamaño de materia prima requerido



Ilustración 13. Triturador de neumáticos móvil (*BCA, 2023*)

4.11 Parámetros de diseño

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

4.11.1 Tipo de pirólisis

La elección del tipo de pirólisis depende del producto de interés que se pretenda obtener en mayor proporción de los tres tipos posibles. Siendo la convencional la que permite obtener la gama de los tres productos en comparación a los demás tipos que permiten obtener ya sea sólo productos en fase sólida o en fase líquida. Esta se caracteriza por: ausencia de catalizadores, de tipo lenta con tiempo de residencia del orden de horas, de calentamiento indirecto, a presión atmosférica y obtención de los tres productos en fase sólida, líquida y gas. Se establece el tipo de calentamiento indirecto para llevar a cabo el diseño conceptual de la planta, junto a un reactor de tipo horno rotatorio, debido a su amplia aplicabilidad a escala industrial para este tipo de procesos al momento de permitir un mayor control de la temperatura de operación, junto a la versatilidad al momento de separar los productos de interés desde la unidad de reacción.

4.11.2 Tipo de reactor

El reactor elegido en el diseño de la planta corresponde a un reactor de horno rotatorio, este tipo de reactores reúne algunas ventajas en cuanto a la transferencia de calor, debido a que posee una mayor superficie de calentamiento o transferencia comparada con un reactor de lecho

fijo o vertical estacionario. Por otra parte, el movimiento continuo de los materiales en contacto con la superficie interna de transferencia, mejora enormemente los coeficientes de transferencia de calor.

4.11.3 Caracterización de la materia prima

La materia prima a trabajar consiste en neumático triturado proveniente de los NFU generados por el desecho de los mismos luego de su tiempo de vida útil; este gránulo de caucho será obtenido por medio de la trituración de los NFU al momento de su recogida.

4.12 Antes y después de aplicación de mejoras a la planta convencional

4.12.1 Pretratamiento y alimentación

Convencional: el NFU se alimenta al reactor manualmente, enteros o después de haber cortado el neumático en pedazos. Estar enteros o cortados evita aprovechar el espacio del reactor al máximo y se disminuye la cantidad de producto terminado. Los procesos de pretratamiento (4 horas) y alimentación (2 horas) son largos ya que son manuales. Los neumáticos enteros alargan el tiempo de reacción (2 horas).

Mejorada: la materia prima llega a la planta ya pretratada gracias al triturador de neumáticos móvil. Este pretratamiento aumenta el volumen de llenado del reactor, maximizando la cantidad de producto terminado y reduce el tiempo de reacción. El sistema de alimentación del reactor es un alimentador de tornillo con una banda transportadora que hace que este paso sea mecánico, esto reduce el tiempo a menos de una hora en esta parte del proceso.

4.12.2 Pirólisis

Convencional: el reactor se calienta con madera, gas combustible, carbón vegetal o carbón. El reactor se calienta lentamente y luego alcanza una temperatura de alrededor de 200 °C, el proceso dura 8 horas y produce gas. La mejor temperatura de pirólisis es 300-350 °C. Luego, el gas pasará por un sistema de condensación donde se convierte en aceite líquido. El gas no condensable pasa por un tanque de lavado de gases y el excedente no utilizado después pasa al quemador. En la convencional el gas no condensable resultante se utiliza para el calentamiento del reactor, y la otra parte sin uso pasa al quemador.

Mejorada: el reactor se calienta con gas combustible. El reactor se calienta lentamente y luego alcanza una temperatura de alrededor de 200 ° C, el proceso dura 8 horas y produce gas. La mejor temperatura de pirólisis es 300-350 ° C. Luego, el gas pasará por un sistema de condensación donde se convierte en aceite líquido. Después pasa por el destilador para limpiar el aceite de pirólisis, con esto llevarlo a estándares paralelos con el diesel comercial. El gas no condensable pasa por un tanque de lavado de gases, para después ser recirculado al proceso para calentar el reactor. El excedente no utilizado pasa a ser comprimido para ser almacenado y poder ser utilizado para generación de la energía eléctrica de la planta.

4.12.3 Descarga

Convencional: Después del proceso de pirolisis, dentro del reactor quedan el acero y el negro de carbón. En esta parte, por seguridad de los trabajadores, estos deben esperar a que la temperatura del reactor descienda por debajo de los 40 C. Después de esto, comienza la descarga

manual del resultado sólido. Esta parte del proceso es largo, ya que el tiempo de espera son 5 horas para que el reactor enfríe y se pueda comenzar el proceso de descarga (2 horas).

Mejorada: Aquí se emplea un sistema de manejo de descarga cerrada, es decir hermético y se almacena en un contenedor cerrado, completamente automático, que evita la contaminación, y que ahorra tiempo y trabajo. Haciendo posible que no se tenga que esperar que el reactor se enfríe para hacer el proceso de descarga, reduciendo así los tiempos de trabajo.

4.12.4 Desempolvar

En ambos casos, hay un sistema de eliminación de cenizas para enfriar y limpiar los gases de combustión, así cumpliendo con los estándares de emisiones establecidos por la ley.

4.13 Flujo del proceso planta convencional

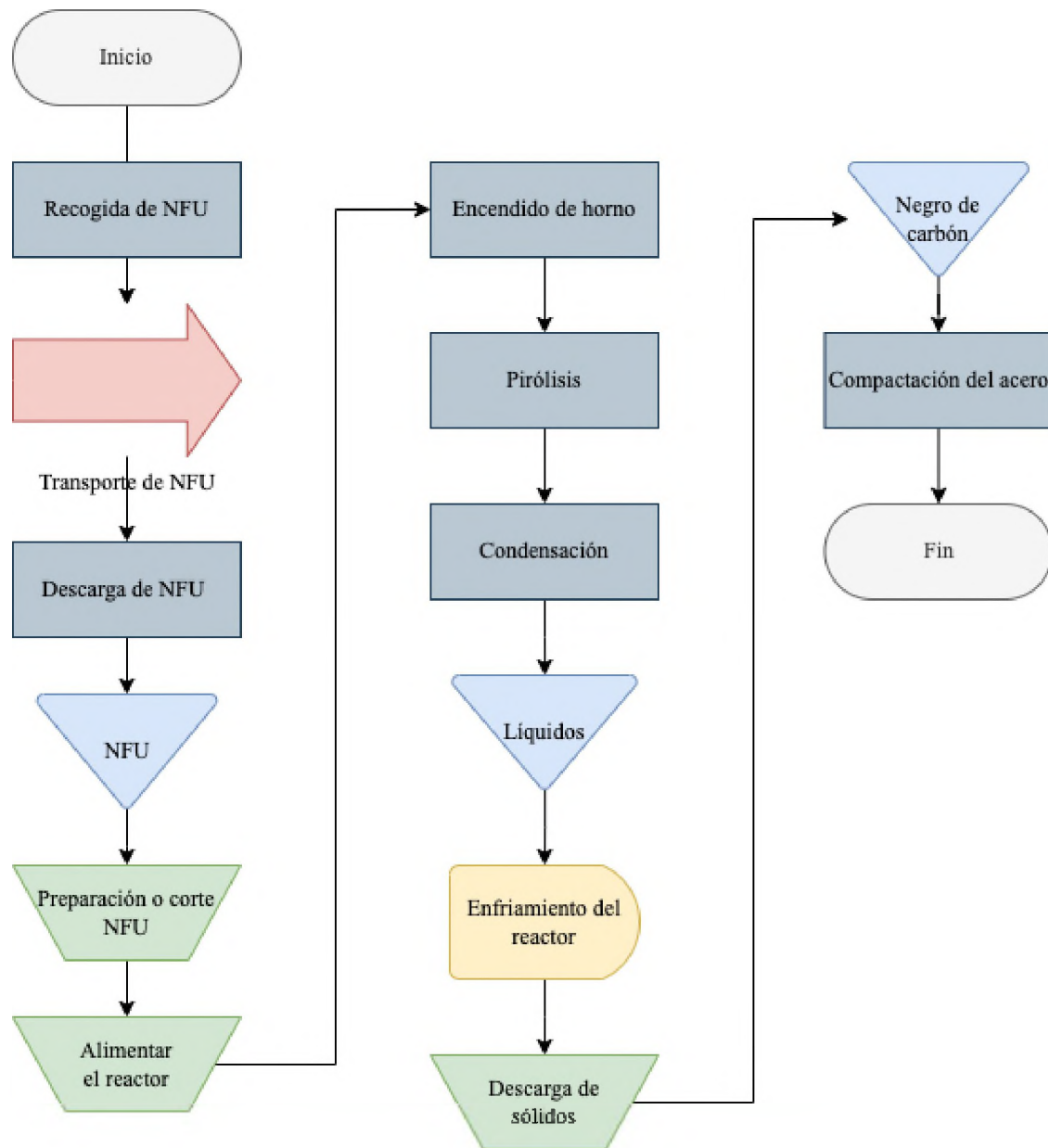


Figura 5. Flujo del proceso convencional (Fuente: Elaboración propia)

4.14 Flujo del proceso planta mejorada

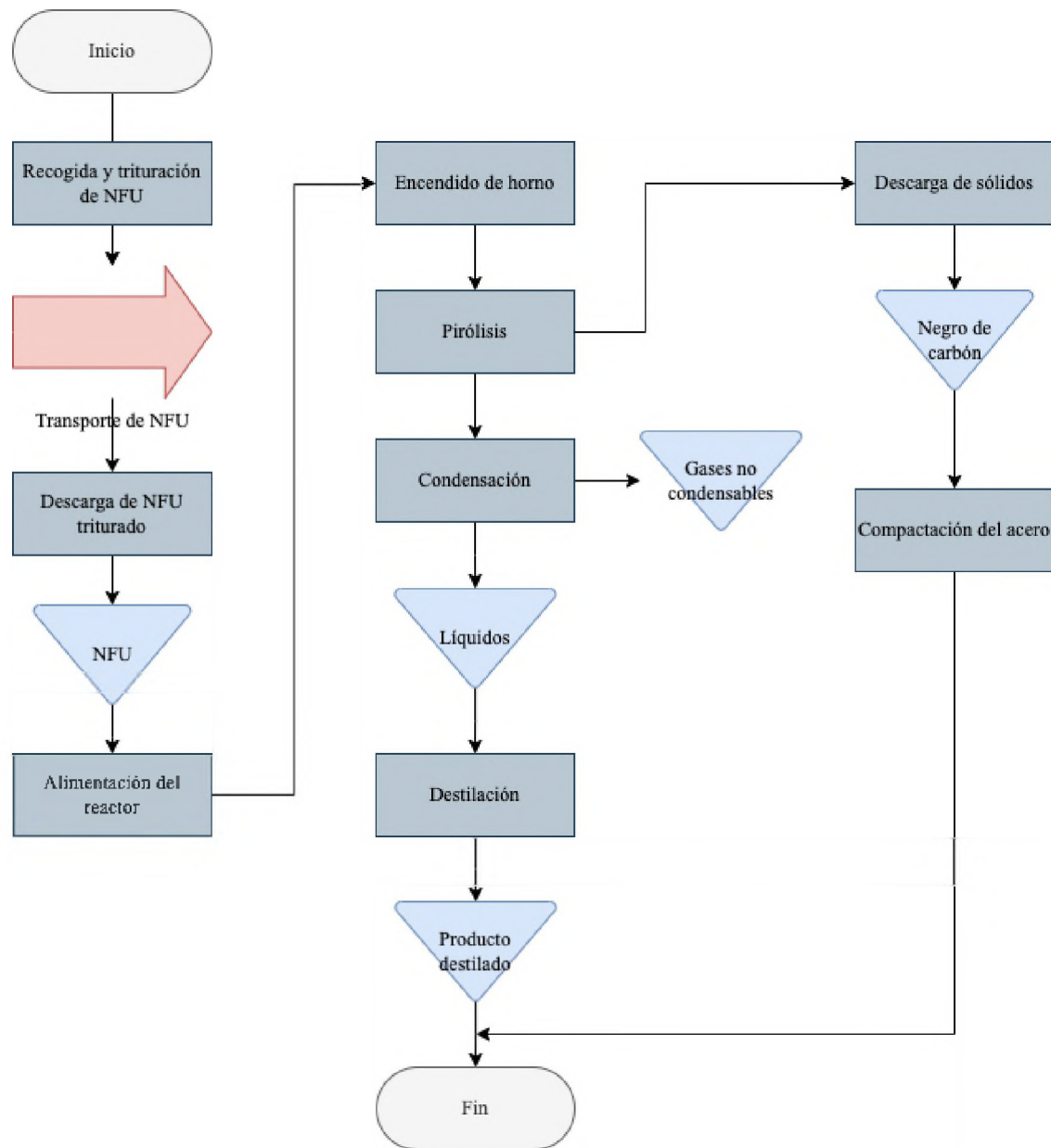


Figura 6. Flujo del proceso mejorada (Fuente: Elaboración propia)

4.15 Análisis FODA

4.15.1 Fortalezas

1. Recuperación de energía: las plantas de pirólisis de NFU pueden recuperar energía de los neumáticos fuera de uso, reduciendo la necesidad de energía de combustibles fósiles y mitigando las emisiones de gases de efecto invernadero.
2. Reducción de desechos: el reciclaje de neumáticos fuera de uso a través de pirólisis ayuda a reducir la cantidad de desechos que se envían a los vertederos, conservando los recursos naturales y reduciendo los impactos ambientales.
3. Conservación de recursos: los componentes reciclados producidos a través de pirólisis pueden usarse para reemplazar materiales vírgenes en la producción de nuevos productos de caucho, conservando los recursos naturales y reduciendo los desechos.
4. Beneficios ambientales: el reciclaje de neumáticos fuera de uso a través de pirólisis puede ayudar a reducir los peligros ambientales asociados con la eliminación de neumáticos fuera de uso, como la liberación de químicos tóxicos y el riesgo de incendios en los vertederos.

4.15.2 Oportunidades

1. Demanda creciente de soluciones sostenibles: La demanda de soluciones sostenibles de gestión de residuos está aumentando, lo que brinda oportunidades de crecimiento y expansión en la industria de pirólisis de neumáticos fuera de uso.
2. Diversificación de ofertas de productos: las plantas de pirólisis de neumáticos fuera de uso pueden producir una variedad de productos, incluidos combustibles, materias primas para la

producción de nuevos productos de caucho y otros materiales, lo que brinda oportunidades para la diversificación y la expansión del mercado.

3. Apoyo gubernamental: Las políticas y regulaciones gubernamentales pueden brindar apoyo para el desarrollo e implementación de plantas de pirólisis de neumáticos fuera de uso, incluidos incentivos financieros y apoyo técnico.

4.15.3 Debilidades

1. Baja capacidad para enfrentar condiciones adversas: Poco conocimiento a nivel local con respecto al tema, lo cual implica a la investigación de manera alterna para el tratado y reciclaje de residuos sólidos.

2. Falta de capacidad económica ante costos del negocio: cabe destacar que el costo de capital es alto, sin embargo a través de un buen análisis de factibilidad se puede obtener una buena tasa de retorno.

3. Desafíos del mercado: el mercado de componentes reciclados de pirólisis de NFU puede ser incierto, lo que requiere una planificación cuidadosa y un análisis de mercado para garantizar la viabilidad de la planta.

4.15.4 Amenazas

1. Nuevos competidores: La industria de pirólisis de NFU es competitiva, ya que hoy en día han decidido implementar procesos para el tratado de residuos, sin embargo el proceso de pirólisis apoya de manera directa el cuidado al medio ambiente, de igual forma, se estima la aparición de nuevas empresas dedicadas a la implantación de plantas de pirólisis.

2. Fluctuaciones del mercado: el mercado de componentes reciclados de pirólisis de NFU puede ser volátil, con fluctuaciones en la demanda y los precios que afectan la viabilidad de la planta.
3. Regulaciones Ambientales: Las regulaciones y normas ambientales pueden ser complejas y desafiantes, y requieren un cuidadoso cumplimiento y monitoreo para garantizar la sustentabilidad ambiental.

Al considerar cuidadosamente estos factores, es posible desarrollar una planta de pirólisis de NFU sostenible y económicamente viable que brinde beneficios ambientales y económicos.

4.16 Propuesta de valor

La propuesta de valor de este trabajo de grado se puede resumir en convertir residuos en recursos bajo el concepto de una economía circular, más específicamente reducir de manera sustentable y eficiente los NFU, reduciendo su impacto ambiental y transformarlos en subproductos con valor agregado usando para ello tecnología ecosostenible basada en pirólisis.

Las materias primas que se utilizan para fabricar los neumáticos comienzan a ser vistas como materiales de gran valor, como para solo utilizarlas en la producción de calor en instalaciones de combustión. En este sentido la pirólisis de NFU puede contribuir positivamente hacia una economía sostenible y circular para este tipo de residuos.

La pirólisis posibilita la recuperación de materiales, energía e incluso productos químicos, ofreciendo importantes beneficios desde la perspectiva de la economía circular.

Se permitiría con la planta de pirólisis de NFU:

1. Abrir la puerta a oportunidades de trabajo.
2. Reducir y mitigar de manera efectiva los impactos ambientales generados por tratamientos deficientes de los NFU.
3. Disminuir emisiones de gases efecto invernadero cuando se sustituyen productos elaborados con materias primas de origen fósil al utilizar los productos de la pirólisis en aplicaciones reales.

Estas condiciones fundamentan la consideración de la pirólisis como estrategia de economía circular para la valorización de residuos complejos y especiales como lo son los NFU.

Con las mejoras propuestas a la planta convencional se espera lo siguiente:

1. Maximización de la producción.
2. Condiciones óptimas de transferencia de calor al pirolizador.
3. Emisiones netas de gases, aceites y partículas carbonosas al ambiente.
4. Producción de materiales de la más alta calidad posible.

4.17 Oportunidades

Los productos del proceso de pirólisis presentan oportunidades cautivadoras para su incorporación en aplicaciones existentes. Por ejemplo, el aceite de pirólisis podría cubrir una demanda importante del petróleo, el cual es la fuente de carbono predominante en la actualidad para la producción de una amplia gama de bienes y productos químicos, a la vez que se implementaría un ejemplo exitoso de economía circular.

Por otra parte, el gas de pirólisis, puede generar no solo la energía demandada por el proceso, sino también energía térmica e incluso potencia eléctrica extra. Al ver los precios y la demanda creciente de electricidad, el gas de pirólisis alentaría a la viabilidad comercial del proceso, a la vez que proporciona otro ejemplo de economía circular a partir de los NFU.

Finalmente, el negro de carbón sería utilizado como combustible en diferentes industrias. Aunque actualmente el negro de carbón presenta desafío de poder ser incorporado como material alternativo al negro de carbón comercial, un mercado altamente atractivo teniendo en cuenta la diversidad de productos hechos con este material (pinturas, pigmentos, neumáticos, plásticos; en general, se sabe que muchos productos de color negro contienen negro de carbón).

De esta manera, el proceso de pirólisis de NFU si es realizado mediante una tecnología que garantice una buena calidad de los productos y una alta eficiencia operativa, con mínimos impactos ambientales, estos productos podrían ser comparados con los que están disponibles comercialmente de su equivalencia.

4.18 Flaquer Ship Services

Este trabajo de grado fue realizado bajo la asesoría de Flaquer Ship Services SRL. (FSS), la cual surgió como empresa de mantenimiento de buques en 1992 dándole servicio a compañías como Mercancía de Noruega y SEALand de EE.UU. En el 1996 diseña y opera una planta de procesamiento de desechos oleosos a raíz del acuerdo internacional MARPOL que obliga a los barcos a descargar los desechos en cada puerto que tocan, acontecimiento que la introduce en los servicios medioambientales.

En el año 2003 hace su primer trabajo de ingeniería en tierra firme para la compañía eléctrica de Santiago LAESA, dándole mantenimiento a los tanques de almacenamiento de combustible de la compañía. A partir de este momento el mercado interno se convierte en su principal objetivo. Compañías como CDE, Falconbridge, ESSO, TEXACO, REFIDOMSA, EGE HAINA, EGE ITABO, AES Dominicana, Shell, Central Romana y muchas otras son clientes habituales de FSS.

En el año 2015 FSS fue contratada para operar una planta (planta de pirólisis del batey Palamara) de procesar NFU. En el 2017 FSS optimizó y dirigió las operaciones de producción de la planta de pirólisis “Batey el Indio” en Santo Domingo Norte, donde logró una mejora en la producción de un 200 % durante 7 meses de operaciones. En la actualidad FSS continúa dándole servicio de ingeniería a sus clientes incluyendo capacitación y formación de cuadros.

4.19 Permisos ambientales

Según lo establecido en el Reglamento Técnico Ambiental para la Gestión de Neumáticos Fuera de Uso:

Toda persona que se dedique a cualquiera de las actividades de gestión de neumáticos fuera de uso entrará al proceso de Evaluación de Impacto Ambiental para obtener su autorización ambiental y cumplirá con los requisitos establecidos para tales fines en el artículo 40 de la Ley 64-00 y el cumplimiento de Reglamentos para Autorizaciones Ambientales de la República Dominicana resolución No. 13-2014.

Se cumplirá con la Norma Ambiental para la Gestión de Residuos Sólidos No Peligrosos (NA-RS-001-03), con la Norma de Calidad del Aire y Control de Emisiones (NA-AI-001-03) y

con la normativas, reglamentos, disposiciones ambientales y convenios internacionales ratificados por el país que le apliquen.

Se cumplirá con el Programa de Manejo y Adecuación Ambiental (PMAA), las disposiciones anexas a la autorización ambiental y con el envío de los Informes de Cumplimiento Ambiental (ICA) de acuerdo a la frecuencia establecida en su autorización ambiental.

El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales en virtud de las atribuciones que le confiere la Ley 64-00, en los artículos 45, 46, 53 y 54, realizará inspecciones y auditorías de manera aleatoria, con o sin previa notificación, a los centros de gestión de NFU, para comprobar el cumplimiento de lo estipulado en el PMAA, en las disposiciones de la autorización ambiental y en el sentido general, el cumplimiento con la legislación ambiental vigente y el presente reglamento.

El incumplimiento del reglamento y de cualquiera de sus disposiciones, así como también de las contenidas en las leyes e instrumentos de regulación ambiental vigentes, será sancionado de acuerdo a lo establecido en la Ley 64-00, el Reglamento para el Control, Vigilancia e Inspección Ambiental y la Aplicación de Sanciones Administrativas, sin perjuicio de las disposiciones que rigen la materia.

4.20 Requerimientos para la obtención de los permisos sobre la industria de pirólisis

1. Llenar el formulario de análisis previo.
2. Depositado en el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales con el pago de un impuesto de RD \$5.000 presentado en un cheque de administración a nombre del ministerio.
3. Realizado el paso 1 y 2, un equipo multidisciplinario del Ministerio de Medio Ambiente visitará el sitio donde se pretende desarrollar la industria.
4. Luego de la visita del equipo multidisciplinario, el Ministerio de Medio Ambiente (Gestión Ambiental) procederá a emitir los términos de referencia (TDR).
5. Con estos TDR, es la guía que el promotor debe seguir para realizar el estudio de impacto ambiental.
6. Este estudio de impacto ambiental realizado por el promotor conlleva a realizar un por mandato de la Ley 64-00 una visita pública donde tiene que invitar a la comunidad para explicar en qué consiste este proyecto.
7. Cuando emiten los términos de referencia al promotor, este debe de hacer un cartel público que contenga el nombre del proyecto y en qué consiste el mismo. Debe tener el código del proyecto asignado por el Ministerio, este cartel debe ser colocado en un sitio visible donde se pretende desarrollar el proyecto.

4.21 Ventajas

La economía circular es un concepto económico que se interrelaciona con la sostenibilidad, y cuyo objetivo es que el valor de los productos, los materiales y los recursos se mantengan en la economía durante el mayor tiempo posible, y que se reduzca al mínimo la generación de residuos. Se trata de implementar una nueva economía, circular -no lineal-, basada en el principio de «cerrar el ciclo de vida» de los productos, los servicios, los residuos, los materiales, el agua y la energía.

Y con esto luchar contra el cambio climático y limitar los impactos medioambientales del uso de los recursos. La economía circular es la intersección de los aspectos ambientales, económicos y sociales.

El sistema lineal de nuestra economía (extracción, fabricación, utilización y eliminación) ha alcanzado sus límites. Por lo tanto, la economía circular propone un nuevo modelo de sociedad que utiliza y optimiza los *stocks* y los flujos de materiales, energía y residuos y su objetivo es la eficiencia del uso de los recursos.

En un contexto de escasez y fluctuación de los costes de las materias primas, esta contribuye a la seguridad del suministro y a la reindustrialización del territorio nacional, y consigue convertir nuestros residuos en materias primas. Finalmente, este sistema es un sistema generador de empleo local y no deslocalizable.

Las plantas de pirólisis de NFU tienen varias ventajas, entre ellas:

1. **Recuperación de energía:** los NFU contienen grandes cantidades de energía que se pueden recuperar a través del proceso de pirólisis y convertirlas en combustibles

utilizables, como el aceite de pirólisis y el gas no condensable, lo que reduce la necesidad de combustibles fósiles y ayuda a promover la independencia energética.

2. **Reducción de desechos:** al convertir los NFU en productos utilizables, las plantas de pirólisis de NFU reducen la necesidad de vertederos y otros métodos de eliminación de desechos, lo que puede ayudar a conservar los recursos naturales y minimizar los impactos ambientales de los desechos.
3. **Conservación de recursos:** los subproductos del proceso de pirólisis de NFU, como el negro de carbón y el alambre de acero, se pueden reutilizar como materia prima en la producción de neumáticos nuevos y otros productos, lo que reduce la necesidad de materiales vírgenes y ayuda a conservar recursos.
4. **Creación de empleo:** las plantas de pirólisis de NFU crean nuevos empleos, incluidos puestos en investigación y desarrollo, operación y mantenimiento de plantas, y ventas y mercadeo de productos, lo que ayuda a estimular las economías locales y promover el desarrollo sostenible.
5. **Cumplimiento de las regulaciones:** las plantas de pirólisis de NFU ayudan a cumplir con las reglamentaciones ambientales al reducir la necesidad de vertederos y mejorar la gestión de los NFU, promoviendo prácticas de gestión de desechos responsables y sostenibles.
6. **Beneficios financieros:** las plantas de pirólisis de NFU pueden generar ingresos a partir de la venta de combustibles utilizables, subproductos y otros productos, lo que ayuda a compensar los costos del proceso de pirólisis y promueve la sostenibilidad financiera.

4.21.1 Ventajas ambientales

- 1 **Reduce las existencias de NFU:** la pirólisis reduce el volumen de NFU al convertirlas en subproductos valiosos, lo que ayuda a reducir el tamaño de las existencias y previene la acumulación de desechos peligrosos.
- 2 **Previene incendios de neumáticos:** Las pilas de NFU son un gran riesgo de incendio, y los incendios de neumáticos pueden liberar contaminantes tóxicos al aire y al agua subterránea. La pirólisis de NFU ayuda a prevenir incendios de llantas al reducir el volumen de neumáticos y convertirlos en subproductos estables e incombustibles.
- 3 **Reduce las emisiones de gases de efecto invernadero:** la pirólisis ayuda a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero al reducir la necesidad de vertederos e incineración, que son las principales fuentes de emisiones de metano. La cantidad de ahorro de CO₂ que se puede lograr al reciclar una tonelada de neumáticos fuera de uso depende de varios factores, incluido el método de reciclaje y el uso final del material reciclado. Según algunas estimaciones, la energía recuperada de una tonelada de neumáticos fuera de uso a través de la pirólisis puede ser equivalente a la energía contenida en aproximadamente 400 litros (106 galones) de combustible. Esta recuperación de energía puede ayudar a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero al reducir la necesidad de energía procedente de combustibles fósiles.
- 4 **Promueve la sustentabilidad:** la pirólisis de NFU crea subproductos valiosos que se pueden usar en una amplia gama de aplicaciones industriales y comerciales, lo que ayuda a promover la sustentabilidad mediante la creación de valor económico a partir de los neumáticos.
- 5 **Minimiza la huella ambiental:** la pirólisis de NFU es un proceso de alta eficiencia energética que reduce la huella ambiental de la gestión de neumáticos al minimizar la

necesidad de fuentes externas de combustible y reducir las emisiones asociadas con el vertido y la incineración.

4.21.2 Ventajas económicas

1. **Crea subproductos valiosos:** la pirólisis de NFU crea subproductos valiosos, incluidos negro de carbón, fuel oil y alambre de acero, que pueden venderse o usarse como insumos en una amplia gama de aplicaciones industriales y comerciales.
2. **Reduce los costos de eliminación de desechos:** la pirólisis de NFU reduce el volumen de NFU, lo que puede reducir los costos de eliminación de desechos y reducir la necesidad de vertederos e incineración.
3. **Promueve la creación de empleo:** la pirólisis de NFU ayuda a crear empleos en los sectores de fabricación, transporte y energía, proporcionando beneficios económicos a las comunidades y apoyando el desarrollo económico local.
4. **Aumenta la competitividad:** la pirólisis de NFU puede ayudar a aumentar la competitividad al proporcionar una alternativa rentable y sostenible a las fuentes de energía tradicionales, reduciendo los costos de energía y mejorando los resultados de las empresas y organizaciones.

4.21.3 Ventajas técnicas

1. **Alta eficiencia energética: la pirólisis** de NFU es un proceso de alta eficiencia energética que utiliza el calor generado por la reacción para mantener la temperatura dentro del reactor, lo que reduce la necesidad de fuentes de combustible externas y aumenta la eficiencia energética general de la operación.

2. **Escalabilidad: la pirólisis** de NFU se puede ampliar o reducir para satisfacer las necesidades específicas de una comunidad o región, lo que la convierte en una solución flexible y adaptable para la gestión de neumáticos.
3. **Operación segura y confiable:** las plantas modernas de pirólisis de llantas de desecho están diseñadas para operar de manera segura y confiable, con sistemas de seguridad avanzados y controles de proceso para minimizar el riesgo de accidentes y garantizar la operación segura y eficiente de la planta.

4.22 Estudio de factibilidad económica

Con el objetivo de definir la viabilidad económica del proyecto planteado y de las opciones presentadas, se realizará un estudio y evaluación financiera con el objetivo de conocer los egresos e ingresos involucrados y de esta manera, elaborar el flujo de caja neto a partir del cual se determinarán los indicadores Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR) a partir de los cuales se definirá la viabilidad económica del proyecto.

4.23 Estudio financiero

4.23.1 Egresos

4.23.1.1 Inversiones

Son rubros monetarios destinados a soportar las operaciones del negocio, la compra de bienes que serán empleados en la producción y administración o comercialización de los productos; de acuerdo a su destino, las inversiones se clasifican en:

- Activos fijos: corresponde a la inversión en terrenos, infraestructura, instalaciones de servicio, maquinaria, etc.
- Preparativos: aquellos dirigidos a estudios preparativos, puesta en marcha del proyecto, permisos, etc.
- Capital de trabajo: dinero requerido para garantizar la operación normal del proyecto durante el ciclo productivo.

En la Tabla 11, se presenta el costo total de inversión requerido para la implementación de una planta de pirólisis de neumáticos fuera de uso convencional.

Tabla 11. Costo total de inversión planta de pirólisis convencional

INVERSIÓN PLANTA CONVENCIONAL	Total (RD\$)	40,343,677.60
1 Terreno		12,000,000.00
2 Equipos		11,375,000.00
2.1 Reactor y componentes		8,750,000.00
2.2 Planta Eléctrica		750,000.00
2.3 Camión		937,500.00
2.4 Camioneta		625,000.00
2.5 Equipos Menores y Herramientas		312,500.00
3 Instalación de planta		2,800,000.00
4 Adecuación de Planta		2,340,000.00
4.1 Sistema Contra Incendio		1,120,000.00
4.2 Laboratorio		100,000.00
4.3 Almacenamiento de líquidos		1,120,000.00
5 Permiso de Medio Ambiente		300,000.00
6 Capital de trabajo		11,528,677.60

Se seleccionó la zona de Santo Domingo Norte como lugar de localización de la planta, a partir de esto, para la estimación de adquisición de terreno por sugerencia de la empresa que asesora el proyecto, se tomó como punto de partida un terreno de 12.000 m² con un valor promedio de RD\$ 1 000 por m² en la zona. El costo por la adquisición de equipos se determinó en base a la experiencia de conocimiento de precios de la empresa; es importante mencionar que la mayoría de los equipos serán importados, por tanto, se consideró un impuesto del 25% para cada equipo por concepto de importación. El costo por instalación de planta se estimó en un 24% del costo de adquisición de equipos y el costo por capital de trabajo se estableció en un 50% del total de costos y gastos desembolsables del año 1, la recuperación de este se colocará en el flujo de caja neto en el último periodo de evaluación.

En la Tabla 12, se presenta el costo total de inversión requerido para la implementación de una planta de pirólisis de neumáticos fuera de uso mejorada.

Tabla 12. Costo total de inversión planta de pirólisis mejorada

INVERSIÓN PLANTA MEJORADA	Total (RD\$)	48,701,301.60
1 Terreno		12,000,000.00
2 Equipos		17,375,000.00
2.1 Reactor y componentes		8,750,000.00
2.2 Planta Eléctrica		1,500,000.00
2.3 Trituradora		1,750,000.00
2.4 Camión		937,500.00
2.5 Camioneta		625,000.00

2.6	Destiladora	3,500,000.00
2.7	Equipos Menores y Herramientas	312,500.00
3	Instalación planta	4,200,000.00
4	Adecuación de Planta	5,964,000.00
4.1	Alimentación Reactor	1,512,000.00
4.2	Manipulación de Carbón	1,512,000.00
4.3	Destilación/Instalación	600,000.00
4.4	Sistema Contra Incendio	1,120,000.00
4.6	Laboratorio	100,000.00
4.7	Almacenamiento de líquidos	1,120,000.00
5	Permiso de Medio Ambiente	300,000.00
6	Capital de Trabajo	8,862,301.60

Se seleccionó la zona de Santo Domingo Norte como lugar de localización de la planta, a partir de esto, para la estimación de adquisición de terreno por sugerencia de la empresa que asesora el proyecto, se tomó como punto de partida un terreno de 12.000 m² con un valor promedio de RD\$ 1 000 por m² en la zona. El costo por la adquisición de equipos se determinó en base a la experiencia de conocimiento de precios de la empresa; es importante mencionar que la mayoría de los equipos serán importados, por tanto, se consideró un impuesto del 25% para cada equipo por concepto de importación. El costo por instalación de planta se estimó en un 24% del costo de adquisición de equipos y el costo por capital de trabajo se estableció en un 50% del

total de costos y gastos desembolsables del año 1, la recuperación de este se colocará en el flujo de caja neto en el último periodo de evaluación.

En la Tabla 13, se presenta el costo total de inversión requerido para la implementación de una planta de pirólisis de neumáticos fuera de uso mejorada, adquiriendo una planta convencional existente.

Tabla 13. Costo total de inversión planta de pirólisis existente mejorada

INVERSIÓN PLANTA EXISTENTE MEJORADA	Total (RD\$)	32,060,676.60
1 Propiedad planta		8,700,000.00
2 Equipos		7,854,375.00
2.1 Planta Eléctrica		720,000.00
2.2 Trituradora		1,759,375.00
2.3 Camión		937,500.00
2.4 Camioneta		625,000.00
2.5 Destiladora		3,500,000.00
2.6 Equipos Menores y Herramientas		312,500.00
3 Rehabilitación planta		1,500,000.00
4 Adecuación de Planta		4,844,000.00
4.1 Alimentación Reactor		1,512,000.00
4.2 Manipulación de Carbón		1,512,000.00
4.3 Destilación/Instalación		600,000.00

4.4	Sistema Contra Incendio	1,120,000.00
4.5	Laboratorio	100,000.00
5	Permiso de Medio Ambiente	300,000.00
6	Capital de trabajo	8,862,301.60

La planta está ubicada en un terreno de 12.000 m² en Santo Domingo Norte, el costo de la planta es lo que se está pidiendo por terreno y equipos, 75% y 25% del costo respectivamente. El costo por la adquisición de equipos faltantes para hacer la mejora se determinó en base a la experiencia de conocimiento de precios de la empresa; es importante mencionar que la mayoría de los equipos serán importados, por tanto, se consideró un impuesto del 25% para cada equipo por concepto de importación. El costo por rehabilitación de planta se estimó en un 19% del costo de adquisición de equipos y el costo por capital de trabajo se estableció en un 50% del total de costos y gastos desembolsables del año 1, la recuperación de este se colocará en el flujo de caja neto en el último periodo de evaluación.

4.23.1.2 Egresos desembolsables

Lo conforman los costos y gastos en los que se incurre para la aprobación de un bien o servicio que generará un ingreso o beneficio en el futuro; están relacionados directamente con la producción del producto. Los costos a su vez se dividen en variables y fijos.

- Costos variables: su valor está en función de la cantidad producida, es decir, depende de los volúmenes de fabricación, entre ellos se encuentran los de materia prima directa, materiales e insumos directos.

En la Tabla 14, se presentan los costos variables anuales de la planta convencional.

Tabla 14. Costos variables anuales planta de pirólisis convencional

Materia prima e insumos	Consumo anual	Costo	Costo RD\$/año
Materia prima	171 205 unidades	10,65 RD\$/unidad	1,824,000.01
Agua	720 m3	200 RD\$/m3	144,000.00
Combustible (GLP)	3 600 gal	132,60 RD\$/gal	477,360.00
Combustible (Gasoil)	20 000 gal	240 RD\$/gal	4,800,000.00
Combustible (Gasolina)	2 160 gal	273,50 RD\$/gal	590,760.00
Energía	118 500 kW-h	14 RD\$/kWh	1,659,000.00
	Total		9,495,120.01

El costo de materia prima anual se definió de acuerdo con la cantidad de NFU a tratar y de su costo como residuo, para el costo como residuo se consideraron los valores de recolección y transporte. Mientras que, los combustibles, el agua de enfriamiento y la energía eléctrica se consideran como insumos directos cuya tarifa anual se fijó con base en la cantidad anual requerida y su costo aplicado para el lugar de localización de la planta.

En la Tabla 15, se presentan los costos variables anuales de la planta mejorada y la planta existente mejorada, los cuales son los mismos para ambas.

Tabla 15. Costos variables anuales planta de pirólisis mejorada y planta de pirólisis existente mejorada

Materia prima e insumos	Consumo anual	Costo	Costo RD\$/año
Materia prima	936 000 unidades	1,94 RD\$/unidad	1,824,000.00
Agua	720 m3	200 RD\$/m3	144,000.00
Combustible (GLP)	3 600 gal	132,60 RD\$/gal	477,360.00
Combustible (Gasoil)	8 200 gal	240 RD\$/gal	1,968,000.00
Combustible (Gasolina)	2 160 gal	273,50 RD\$/gal	590,760.00
Energía			-
	Total		5,004,120.00

El costo de materia prima anual se definió de acuerdo con la cantidad de NFU a tratar y de su costo como residuo, para el costo como residuo se consideraron los valores de recolección y transporte. Mientras que, los combustibles y el agua de enfriamiento se consideran como insumos directos cuya tarifa anual se fijó con base en la cantidad anual requerida y su costo aplicado para el lugar de localización de la planta. Para ambos casos no se utilizará energía eléctrica de la matriz, ya que la planta utilizará el gas que produce el proceso para producción de energía.

- Costos fijos: son aquellos cuyo valor en el corto plazo no dependen del volumen de producción, entre ellos se encuentran los costos por salario, los aportes a la AFP y SFS, mantenimiento, etc. Para la fijación de los costos por salario se determinó el personal para mantener operativo el proyecto.

En la Tabla 16, se presentan los costos fijos anuales por salario de personal de la planta convencional y en la Tabla 17, se especifican los valores de los costos fijos anuales por salarios y mantenimiento.

Tabla 16. Costos fijos anuales por salario planta de pirólisis convencional

Cargo	Cantidad	Sueldo	SFS	AFP	Otros	Salario 13	Costo total
		(RDS/mes)				(RDS/año)	
Gerente	1	120,000.00	3,648.0	3,444.0	150.0	120,000.00	1,646,904.00
Asistente Administrativo	1	60,000.00	1,824.0	1,722.0	150.0	60,000.00	824,352.00
Operador de Procesos	4	25,000.00	760.0	717.5	400.0	25,000.00	1,390,120.00
Ayudante de Operaciones	16	15,000.00	456.0	430.5	400.0	15,000.00	3,367,008.00
Ayudante de Suministro	2	15,000.00	456.0	430.5	400.0	15,000.00	420,876.00
Mecánico	1	20,000.00	608.0	574.0	150.0	20,000.00	275,984.00
Administración	1	18,000.00	547.2	516.6	400.0	18,000.00	251,565.60
Chofer de Camión	1	20,000.00	608.0	574.0	150.0	20,000.00	275,984.00
Chofer de Camioneta	1	18,000.00	547.2	516.6	150.0	18,000.00	248,565.60
Seguridad	2	15,000.00	456.0	430.5	400.0	15,000.00	420,876.00
Por Iguala							

Eléctrico	1	35,000.00	420,000.00
Contabilidad	1	25,000.00	300,000.00
Legal	1	25,000.00	300,000.00
Total			10,142,235.20

Tabla 17. Costos fijos anuales planta de pirólisis convencional

Denominación	Costo (RD\$/año)
Salario personal	10,142,235.20
Mantenimiento	720,000.00
Total	10,862,235.20

En la Tabla 18, se presentan los costos fijos anuales por salario de personal de la planta mejorada y la planta existente mejorada, y en la Tabla 19, se especifican los valores de los costos fijos anuales por salarios y mantenimiento, para ambas.

Tabla 18. Costos fijos anuales por salarios planta de pirólisis mejorada y planta de pirólisis existente mejorada

Cargo	Cantidad	Sueldo	SFS	AFP	Otros	Salario 13	Costo total
		(RD\$/mes)				(RD\$/año)	
Gerente	1	120,000.00	3,648.0	3,444.0	150.0	120,000.00	1,646,904.00
Asistente de Operaciones	1	60,000.00	1,824.0	1,722.0	150.0	60,000.00	824,352.00

Operador de Procesos	4	25,000.00	760.0	717.5	400.0	25,000.00	1,390,120.00
Ayudante de Operaciones	12	15,000.00	456.0	430.5	400.0	15,000.00	2,525,256.00
Ayudante de Suministro	2	15,000.00	456.0	430.5	400.0	15,000.00	420,876.00
Mecánico	1	20,000.00	608.0	574.0	150.0	20,000.00	275,984.00
Asistente Administrativo	1	18,000.00	547.2	516.6	400.0	18,000.00	251,565.60
Chofer de Camión	1	20,000.00	608.0	574.0	150.0	20,000.00	275,984.00
Chofer de Camioneta	1	18,000.00	547.2	516.6	150.0	18,000.00	248,565.60
Seguridad	2	15,000.00	456.0	430.5	400.0	15,000.00	420,876.00
Por Iguala							
Eléctrico	1				35,000.00		420,000.00
Contabilidad	1				25,000.00		300,000.00
Legal	1				25,000.00		300,000.00
Total							9,300,483.20

Tabla 19. Costos fijos anuales planta de pirólisis mejorada y planta de pirólisis existente mejorada

Denominación	Costo (RD\$/año)
Salario personal	9,300,483.20
Mantenimiento	720,000.00
Total	10,020,483.20

- Gastos: son aquellos egresos requeridos para efectuar el negocio, los más usuales son: gastos administrativos y gastos por ventas y distribución. Los gastos administrativos corresponden al 15% de los costos fijos anuales por salario y los gastos por venta y comercialización corresponden al 20% de los costos variables anuales.

En la Tabla 20, se presentan los valores de los gastos anuales de la planta convencional.

Tabla 20. Gastos anuales planta de pirólisis convencional

Denominación	Costo (RD\$/año)
Gastos administrativos	1,521,335.28
Gastos por venta y comercialización	1,899,024.00
Total	3,420,359.28

En la Tabla 21, se presentan los valores de los gastos anuales de la planta mejorada y la planta existente mejorada.

Tabla 21. Gastos anuales planta de pirólisis mejorada y planta de pirólisis existente mejorada

Denominación	Costo (RD\$/año)
Gastos administrativos	1,395,072.48
Gastos por venta y comercialización	1,000,824.00
Total	2,395,896.48

Los costos variables, costos fijos y gastos conforman los egresos desembolsables, costos que se colocarán en el flujo de caja neto.

En la Tabla 22, se presentan los egresos desembolsables anuales de la planta convencional.

Tabla 22. Egresos desembolsables anuales de la planta de pirólisis convencional

Denominación	Costo (RD\$/año)
Costos variables	9,495,120.01
Costos fijos	10,862,235.20
Gastos	3,420,359.28
Total	23,777,714.49

En la Tabla 23, se presentan los egresos desembolsables anuales de la planta mejorada y la planta existente mejorada, representa lo mismo para ambos casos.

Tabla 23. Egresos desembolsables anuales planta de pirólisis mejorada y planta de pirólisis existente mejorada

Denominación	Costo (RDS/año)
Costos variables	5,004,120.00
Costos fijos	10,020,483.20
Gastos	2,395,896.48
Total	17,420,499.68

4.23.1.3 Egresos no desembolsables

Los egresos no desembolsables lo conforman la depreciación de equipos e instalaciones, la depreciación es aquel costo por el desgaste que tienen los activos tangibles a lo largo del tiempo a causa de su uso. El tiempo de depreciación se establece en 10 y 20 años para los equipos e infraestructura respectivamente.

En la Tabla 24, se presentan los costos anuales de egresos no desembolsables los mismos que corresponden a los valores de depreciación de los equipos e infraestructura de la planta convencional.

Tabla 24. Egresos no desembolsables anuales planta de pirólisis convencional

Activo	Valor (RD\$)	Tiempo de depreciación (años)	Depreciación (RD\$/año)
Equipos	11,375,000.0	10	1,137,500.00
Infraestructura	2,800,000.0	20	140,000.00
Total			1,277,500.00

En la Tabla 25, se presentan los costos anuales de egresos no desembolsables los mismos que corresponden a los valores de depreciación de los equipos e infraestructura de la planta mejorada.

Tabla 25. Egresos no desembolsables anuales planta de pirólisis mejorada

Activo	Valor (RD\$)	Tiempo de depreciación (años)	Depreciación (RD\$/año)
Equipos	17,375,000.0	10	1,737,500.00
Infraestructura	4,200,000.0	20	210,000.00
Total			1,947,500.00

En la Tabla 26, se presentan los costos anuales de egresos no desembolsables los mismos que corresponden a los valores de depreciación de los equipos e infraestructura de la planta existente mejorada.

Tabla 26. Egresos no desembolsables anuales planta de pirólisis existente mejorada

Activo	Valor (RD\$)	Tiempo de depreciación (años)	Depreciación (RD\$/año)
Equipos	7,854,375.0	10	785,437.50
Infraestructura	3,675,000.0	20	183,750.00
Total			969,187.50

4.23.2 Ingresos

Corresponden al dinero proveniente de las ventas de los productos obtenidos, sin embargo, existen otros ingresos que aportan al flujo de caja neto y por consiguiente, impactan en la rentabilidad del proyecto. Para este trabajo se considerarán ingresos por ventas de producto e ingresos por valor de desecho.

4.23.2.1 Ingresos por ventas de producto

Estos se calcularán como el resultado de la cantidad de producto que se espera vender anualmente por su precio. El producto que se lanzará al mercado y por el cual se obtendrá este tipo de ingresos es el combustible líquido.

En la Tabla 27, se presenta el ingreso anual por la venta del producto obtenido en planta convencional.

Tabla 27. Ingresos por ventas anuales planta de pirólisis convencional

Producto	Cantidad	Costo	Ingreso (RD\$/año)
Combustible líquido	360 000 gal/año	115 RD\$/gal	41,400,000.00
Negro de carbono	840 tn/año	2 800 RD\$/tn	2,352,000.00
Acero	120 tn/año	10.000 RD\$/tn	1,200,000.00
Total			44,952,000.00

En la Tabla 28, se presenta el ingreso anual por la venta de producto obtenido en planta mejorada y planta existente mejorada, que representa lo mismo para ambos casos.

Tabla 28. Ingresos por ventas anuales planta de pirólisis mejorada y planta de pirólisis existente mejorada

Producto	Cantidad	Costo	Ingreso (RD\$/año)
Combustible líquido	2 160 000 gal/año	150 RD\$/gal	324,000,000.00
Negro de carbono	5 040 tn/año	2 800 RD\$/tn	14,112,000.00
Acero	720 tn/año	10.000 RD\$/tn	7,200,000.00
Total			345,312,000.00

4.23.2.2 Ingresos por valor de desecho

Es aquel ingreso que se obtendrá del proyecto al final del periodo de evaluación por la liquidación de futuros bienes, para el estudio financiero de este proyecto se estableció un periodo de evaluación de 10 años. El costo inicial de infraestructura corresponde al definido en la tabla, su depreciación es la planteada en la tabla mientras que, el periodo de evaluación corresponde al descrito previamente en esta sección.

En la Tabla 29, se describen los resultados obtenidos de valor de desecho por infraestructura y equipos de la planta convencional.

Tabla 29. Ingreso por valor de desecho planta de pirólisis convencional

Activo	Valor (RD\$)	Ingreso (RD\$)
Equipos	11,375,000.0	-
Infraestructura	2,800,000.0	1,400,000.00
Total		1,400,000.00

En la Tabla 30, se describen los resultados obtenidos de valor de desecho por infraestructura y equipos de la planta mejorada.

Tabla 30. Ingreso por valor de desecho planta de pirólisis mejorada

Activo	Valor (RD\$)	Ingreso (RD\$)
Equipos	17,375,000.0	-
Infraestructura	4,200,000.0	2,100,000.00
Total		2,100,000.00

En la tabla, se describen los resultados obtenidos de valor de desecho por infraestructura y equipos de la planta existente mejorada.

Tabla 31. Ingreso por valor de desecho planta de pirólisis existente mejorada

Activo	Valor (RD\$)	Ingreso (RD\$)
Equipos	7,854,375.0	-
Infraestructura	3,675,000.0	1,837,500.00
Total		1,837,500.00

4.24 Evaluación financiera

Esta evaluación es adecuada para determinar la rentabilidad del proyecto. La evaluación implica la ejecución del flujo de caja neta a partir del cual se obtendrán los indicadores de rentabilidad VAN y TIR.

4.24.1 Flujo de caja neto

El flujo de caja neto consiste en una tabla en la cual se proyecta periodo a periodo, durante el tiempo de evaluación, la manera en la que fluye el efectivo cuyo resultado final representa el balance entre las entradas y salidas de dinero. El horizonte de evaluación se fijó en 10 años y el tipo de flujo de caja que se realizó es el de rentabilidad del proyecto en el cual se identifican 3 momentos, momento previo (año 0), momento de operación (año 1-9) y momento final (año 10). Con una inflación anual esperada de 5%.

El flujo de caja neto de la planta convencional se presenta en la Tabla 32.

Tabla 32. Flujo de caja neto planta de pirólisis convencional

Periodo	Año 0 (RD\$)	Año 1 (RD\$)	Año 2 (RD\$)	Año 3 (RD\$)	Año 4 (RD\$)	Año 5 (RD\$)	Año 6 (RD\$)	Año 7 (RD\$)	Año 8 (RD\$)	Año 9 (RD\$)	Año 10 (RD\$)
Ingresos por ventas		44,952,000.00	44,952,000.00	44,952,000.00	44,952,000.00	44,952,000.00	44,952,000.00	44,952,000.00	44,952,000.00	44,952,000.00	44,952,000.00
Egresos desembolsables		(23,777,714.49)	(23,777,714.49)	(23,777,714.49)	(23,777,714.49)	(23,777,714.49)	(23,777,714.49)	(23,777,714.49)	(23,777,714.49)	(23,777,714.49)	(23,777,714.49)
Egresos no desembolsables		(1,277,500.00)	(1,277,500.00)	(1,277,500.00)	(1,277,500.00)	(1,277,500.00)	(1,277,500.00)	(1,277,500.00)	(1,277,500.00)	(1,277,500.00)	(1,277,500.00)
Utilidad antes de impuestos		19,896,785.51	19,896,785.51	19,896,785.51	19,896,785.51	19,896,785.51	19,896,785.51	19,896,785.51	19,896,785.51	19,896,785.51	19,896,785.51
Impuestos (25%)		(4,974,196.38)	(4,974,196.38)	(4,974,196.38)	(4,974,196.38)	(4,974,196.38)	(4,974,196.38)	(4,974,196.38)	(4,974,196.38)	(4,974,196.38)	(4,974,196.38)
Utilidad despues de impuestos		14,922,589.13	14,922,589.13	14,922,589.13	14,922,589.13	14,922,589.13	14,922,589.13	14,922,589.13	14,922,589.13	14,922,589.13	14,922,589.13
Egresos no desembolsables		1,277,500.00	1,277,500.00	1,277,500.00	1,277,500.00	1,277,500.00	1,277,500.00	1,277,500.00	1,277,500.00	1,277,500.00	1,277,500.00
Ingresos liquidacion											1,400,000.00
Recuperacion capital de trabajo											11,888,857.24
Inversiones	(40,343,677.60)										
Flujo Real	(40,343,677.60)	16,200,089.13	16,200,089.13	16,200,089.13	16,200,089.13	16,200,089.13	16,200,089.13	16,200,089.13	16,200,089.13	16,200,089.13	29,488,946.37
Flujo Nominal (Inflacion 5%)	(40,343,677.60)	17,010,093.59	17,860,598.27	18,753,628.18	19,691,309.59	20,675,875.07	21,709,668.82	22,795,152.27	23,934,909.88	25,131,655.37	48,034,386.30

El flujo de caja neto de la planta mejorada se presenta en la Tabla 33.

Tabla 33. Flujo de caja neto planta de pirólisis mejorada

Periodo	Año 0 (RDS)	Año 1 (RDS)	Año 2 (RDS)	Año 3 (RDS)	Año 4 (RDS)	Año 5 (RDS)	Año 6 (RDS)	Año 7 (RDS)	Año 8 (RDS)	Año 9 (RDS)	Año 10 (RDS)
Ingresos por ventas		345,312,000.00	345,312,000.00	345,312,000.00	345,312,000.00	345,312,000.00	345,312,000.00	345,312,000.00	345,312,000.00	345,312,000.00	345,312,000.00
Egresos desembolsables		(17,420,499.68)	(17,420,499.68)	(17,420,499.68)	(17,420,499.68)	(17,420,499.68)	(17,420,499.68)	(17,420,499.68)	(17,420,499.68)	(17,420,499.68)	(17,420,499.68)
Egresos no desembolsables		(1,947,500.00)	(1,947,500.00)	(1,947,500.00)	(1,947,500.00)	(1,947,500.00)	(1,947,500.00)	(1,947,500.00)	(1,947,500.00)	(1,947,500.00)	(1,947,500.00)
Utilidad antes de impuestos		325,944,000.32	325,944,000.32	325,944,000.32	325,944,000.32	325,944,000.32	325,944,000.32	325,944,000.32	325,944,000.32	325,944,000.32	325,944,000.32
Impuestos (25%)		(81,486,000.08)	(81,486,000.08)	(81,486,000.08)	(81,486,000.08)	(81,486,000.08)	(81,486,000.08)	(81,486,000.08)	(81,486,000.08)	(81,486,000.08)	(81,486,000.08)
Utilidad despues de impuestos		244,458,000.24	244,458,000.24	244,458,000.24	244,458,000.24	244,458,000.24	244,458,000.24	244,458,000.24	244,458,000.24	244,458,000.24	244,458,000.24
Egresos no desembolsables		1,947,500.00	1,947,500.00	1,947,500.00	1,947,500.00	1,947,500.00	1,947,500.00	1,947,500.00	1,947,500.00	1,947,500.00	1,947,500.00
Ingresos liquidacion											2,100,000.00
Recuperacion capital de trabajo											8,710,249.84
Inversiones	(48,701,301.60)										
Flujo Neto	(48,701,301.60)	246,405,500.24	246,405,500.24	246,405,500.24	246,405,500.24	246,405,500.24	246,405,500.24	246,405,500.24	246,405,500.24	246,405,500.24	257,215,750.08
Flujo Nominal (Inflacion 5%)	(48,701,301.60)	258,725,775.25	271,662,064.01	285,245,167.22	299,507,425.58	314,482,796.85	330,206,936.70	346,717,283.53	364,053,147.71	382,255,805.09	418,977,353.23

El flujo de caja neto de la planta existente mejorada se presenta en la Tabla 34.

Tabla 34. Flujo de caja neto planta de pirólisis existente mejorada

Periodo	Año 0 (RDS)	Año 1 (RDS)	Año 2 (RDS)	Año 3 (RDS)	Año 4 (RDS)	Año 5 (RDS)	Año 6 (RDS)	Año 7 (RDS)	Año 8 (RDS)	Año 9 (RDS)	Año 10 (RDS)
Ingresos por ventas		345,312,000.00	345,312,000.00	345,312,000.00	345,312,000.00	345,312,000.00	345,312,000.00	345,312,000.00	345,312,000.00	345,312,000.00	345,312,000.00
Egresos desembolsables		(17,420,499.68)	(17,420,499.68)	(17,420,499.68)	(17,420,499.68)	(17,420,499.68)	(17,420,499.68)	(17,420,499.68)	(17,420,499.68)	(17,420,499.68)	(17,420,499.68)
Egresos no desembolsables		(969,187.50)	(969,187.50)	(969,187.50)	(969,187.50)	(969,187.50)	(969,187.50)	(969,187.50)	(969,187.50)	(969,187.50)	(969,187.50)
Utilidad antes de impuestos		326,922,312.82	326,922,312.82	326,922,312.82	326,922,312.82	326,922,312.82	326,922,312.82	326,922,312.82	326,922,312.82	326,922,312.82	326,922,312.82
Impuestos (25%)		(81,730,578.21)	(81,730,578.21)	(81,730,578.21)	(81,730,578.21)	(81,730,578.21)	(81,730,578.21)	(81,730,578.21)	(81,730,578.21)	(81,730,578.21)	(81,730,578.21)
Utilidad despues de impuestos		245,191,734.62	245,191,734.62	245,191,734.62	245,191,734.62	245,191,734.62	245,191,734.62	245,191,734.62	245,191,734.62	245,191,734.62	245,191,734.62
Egresos no desembolsables		969,187.50	969,187.50	969,187.50	969,187.50	969,187.50	969,187.50	969,187.50	969,187.50	969,187.50	969,187.50
Ingresos liquidacion											1,837,500.00
Recuperacion capital de trabajo											8,710,249.84
Inversiones	(32,060,676.60)										
Flujo Neto	(32,060,676.60)	246,160,922.12	246,160,922.12	246,160,922.12	246,160,922.12	246,160,922.12	246,160,922.12	246,160,922.12	246,160,922.12	246,160,922.12	256,708,671.96
Flujo Nominal (Inflacion 5%)	(32,060,676.60)	258,468,968.22	271,392,416.63	284,962,037.46	299,210,139.34	314,170,646.30	329,879,178.62	346,373,137.55	363,691,794.43	381,876,384.15	418,151,376.39

4.24.2 Indicadores de rentabilidad

Los indicadores de rentabilidad VAN y TIR permiten determinar la factibilidad económica del proyecto, el Valor Anual Neto (VAN) demuestra si existe o no remanente en una inversión ya que consiste en la diferencia entre la sumatoria de los flujos anuales traídos a valor presente por medio de la tasa de descuento y la inversión inicial, si el $VAN > 0$ se acepta el proyecto y si el $VAN < 0$ se rechaza.

Por otra parte, el indicador TIR corresponde a la tasa interna de retorno máxima que puede tener el proyecto para ser rentable y es la única tasa que permite que la suma de los flujos descontados sea igual a la inversión inicial. En la Tabla 35, se presenta el resultado en términos de rentabilidad según la relación existente entre el VAN y TIR en un proyecto.

Tabla 35. Relación entre el VAN y TIR

Relación	Rentabilidad
$TIR > 0$ y $VAN > 0$	Mayor a la exigida después de recuperar toda la inversión
$TIR > 0$ y $VAN < 0$	Menor a la exigida después de recuperar toda la inversión

En la Tabla 36, se presentan los resultados obtenidos de los indicadores de rentabilidad y el tiempo de recuperación de la inversión de la planta convencional.

Tabla 36. Indicadores de rentabilidad y el tiempo de recuperación de la inversión de la planta de pirólisis convencional

Indicador rentabilidad	Valor
VAN (RD\$)	61,233,761.98
TIR (%)	46.11
Tiempo de recuperación de la inversión	2 años y 4 meses

Con base en los resultados obtenidos de VAN y TIR, se establece que la rentabilidad del proyecto es mayor a la exigida después de recuperar toda la inversión y, por tanto, la implementación de la planta convencional sería factible.

En la Tabla 37, se presentan los resultados obtenidos de los indicadores de rentabilidad y el tiempo de recuperación de la inversión de la planta mejorada.

Tabla 37. Indicadores de rentabilidad y el tiempo de recuperación de la inversión de la planta de pirólisis mejorada

Indicador rentabilidad	Valor
VAN (RD\$)	1,426,869,624.40
TIR (%)	536.25
Tiempo de recuperación de la inversión	3 meses

Con base en los resultados obtenidos de VAN y TIR, se establece que la rentabilidad del proyecto es mayor a la exigida después de recuperar toda la inversión y, por tanto, la implementación de la planta mejorada sería factible.

En la tabla, se presentan los resultados obtenidos de los indicadores de rentabilidad y el tiempo de recuperación de la inversión de la planta existente mejorada.

Tabla 38. Indicadores de rentabilidad y el tiempo de recuperación de la inversión de la planta de pirólisis existente mejorada

Indicador rentabilidad	Valor
VAN (RD\$)	1,441,954,244.78
TIR (%)	811.19
Tiempo de recuperación de la inversión	2 meses

Con base en los resultados obtenidos de VAN y TIR, se establece que la rentabilidad del proyecto es mayor a la exigida después de recuperar toda la inversión y, por tanto, la implementación de la planta existente mejorada sería factible.

CAPÍTULO V: CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusión

Los tratamientos de conversión termoquímicos, como la pirólisis, para neumáticos fuera de uso son una opción tecnológica, ecológica y económicamente viable. Los subproductos de la pirólisis de neumáticos fuera de uso son comercializables y solo la ceniza necesita ser eliminada. La clave es ver los NFU no como un flujo de desechos, sino como un recurso valioso que debe aprovecharse. Al encontrar nuevos métodos para el tratamiento de NFU, será posible contrarrestar el daño ambiental causado por su eliminación inadecuada y, a su vez, obtener productos con diferentes funcionalidades.

Dado que uno de los objetivos de este proyecto es presentar una planta de pirólisis de neumáticos de uso como una forma viable de comenzar a restaurar el medio ambiente, es razonable decir que permitirá la recuperación de materiales y productos peligrosos, la recuperación del estado del medio ambiente y la sostenibilidad. Aunque es imposible estimar la contribución al mantenimiento y preservación del medio ambiente en el Gran Santo Domingo, el tratamiento de NFU por parte de esta planta será un paso en la dirección correcta para lograr este objetivo.

El producto principal obtenido en planta es el aceite de pirolisis que posee propiedades energéticas semejantes al diésel, sin embargo, como subproductos se obtendrán negro de carbón, acero y gas no condensable, los cuales jugarán un papel importante en materia de rentabilidad del proyecto. El gas no condensable se emplea como fuente de energía alternativa para el funcionamiento del reactor con el objetivo de hacerlo autosuficiente. Al combustionar residuos en lugar de combustible virgen, se forman menos CO₂ y metano, entonces los procesos

termoquímicos tienen emisiones de gases de efecto invernadero negativas y se reduce su huella de carbono.

Los resultados del estudio de factibilidad de las tres opciones presentadas de la implementación en el Gran Santo Domingo de una planta de pirólisis de neumáticos, han concluido que, una vez salvado el gran obstáculo de la alta inversión inicial, los procesos de conversión termoquímicos de neumáticos fuera de uso pueden ser económicamente factibles.

Sin tomar en cuenta la cantidad desconocida de NFU que hay acumulados actualmente, con base en la información existente, se estima que para el final del 2023 en el Gran Santo Domingo se van a generar 194 657 tn de NFU y sabiendo que para producir el potencial máximo diario se necesitan 14 400 tn de NFU al año, el proyecto procesaría el 7,4 % del estimado de generación de NFU en el Gran Santo Domingo para el 2023.

Este proyecto sería no solo provechoso económicamente, sino también de gran aporte social para el tratamiento de NFU, contrarrestando un importe pasivo ambiental y contribuyendo al beneficio de la sociedad.

5.2 Recomendaciones

1. Implementar en la etapa de pretratamiento el triturador de neumáticos móvil. Con esto la materia prima llega a la planta ya pretratada y se aumenta el volumen de llenado del reactor, así maximizando la cantidad de producto terminado y reduciendo el tiempo de reacción.
2. Implementar el sistema de alimentación del reactor, esto hace que este paso sea mecánico y reduce el tiempo en esa etapa del proceso.
3. Emplear un sistema de manejo de descarga cerrada, es decir hermético. El negro de carbón se almacena en un contenedor cerrado, completamente automático, que evita la contaminación, y que ahorra tiempo y trabajo. Haciendo posible que no se tenga que esperar que el reactor se enfríe para hacer el proceso de descarga, reduciendo así los tiempos de trabajo.
4. Implementar el sistema de destilación para limpiar el aceite de pirólisis, con esto llevarlo a estándares paralelos con el diésel comercial. Al hacer esto el valor comercial del aceite de pirólisis aumenta.
5. Emplear el gas no condensable como fuente de energía alternativa para el funcionamiento del reactor con el objetivo de hacerlo autosuficiente. Al combustionar residuos en lugar de combustible virgen, se forman menos CO₂ y metano, entonces los procesos termoquímicos tienen emisiones de gases de efecto invernadero negativas y se reduce su huella de carbono.

6. Se recomienda la opción de la planta de pirólisis de NFU existente mejorada puesto que esta tiene un tiempo de comienzo de producción estimado más corto, ya que las partes integrales de la planta ya existen y ésta ya tiene todos los permisos requeridos por el Ministerio de Medio Ambiente. Solo se tendría que rehabilitar la planta e incorporar las mejoras propuestas.

BIBLIOGRAFÍA

- Ambiente, M. (2003). *NORMA PARA LA GESTIÓN AMBIENTAL DE RESIDUOS SÓLIDOS NO PELIGROSOS*. Obtenido de Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales:
<https://www.cne.gob.do/wp-content/uploads/2016/08/Norma-Residuos-Solidos-no-Peligrosos.pdf>
- Ambiente, M. (2015). *Res. No.0005-2015 Que Emite el Reglamento Tecnico Ambiental Gestion Neumaticos Fuera de Uso*. Obtenido de Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales:
https://ambiente.gob.do/wpfd_file/res-no-0005-2015-que-emite-el-reglamento-tecnico-ambiental-gestion-neumaticos-fuera-de-uso-1/
- BCA. (2023). *Portable/ PD1000 & PD1000 IO Portable Shredder*. Obtenido de bca-industries.com: <https://www.bca-industries.com/P/25/PD1000PD1000IO>
- Beston. (2023). *¿Qué es la pirólisis de neumáticos?* Obtenido de Beston:
<https://bestonasia.com/es/waste-tyre-pyrolysis-plant/what-is-tyre-pyrolysis/>
- Circular. (25 de 08 de 2022). *Environment and Energy*. Obtenido de Circular Online:
<https://www.circularonline.co.uk/features/how-can-we-solve-the-problem-of-end-of-life-tyres/>
- Congreso. (2000). *Ley 64-00*. Obtenido de Ministerio de Energia y Minas:
<https://mem.gob.do/wp-content/uploads/2019/01/Ley-No.-64-00-que-crea-la-Secretaria-de-Estado-de-Medio-Ambiente-y-Recursos-Naturales.pdf>
- Congreso. (2015). *Constitucion de la Republica Dominicana*. Obtenido de Presidencia de la Republica Dominicana:
<https://presidencia.gob.do/sites/default/files/statics/transparencia/base-legal/Constitucion-de-la-Republica-Dominicana-2015-actualizada.pdf>
- Congreso. (2020). *Ley General de Gestion Integral y Coprocesamiento de Residuos Solidos*. Obtenido de Direccion General de Impuestos Internos:
<https://dgii.gov.do/legislacion/leyestributarias/documents/leyes%20de%20instituciones%20y%20fondos%20de%20terceros/225-20.pdf>
- DeCarlo, M. (2011). *Tipos de investigacion*. Obtenido de libretxts.org:
[https://espanol.libretxts.org/Ciencias_Sociales/Trabajo_Social_y_Servicios_Humanos/Investigaci%C3%B3n_Cient%C3%ADfica_en_Trabajo_Social_\(DeCarlo\)/07%3A_Dise%C3%B1o_y_causalidad/7.01%3A_Tipos_de_investigaci%C3%B3n](https://espanol.libretxts.org/Ciencias_Sociales/Trabajo_Social_y_Servicios_Humanos/Investigaci%C3%B3n_Cient%C3%ADfica_en_Trabajo_Social_(DeCarlo)/07%3A_Dise%C3%B1o_y_causalidad/7.01%3A_Tipos_de_investigaci%C3%B3n)
- DeWALT. (2023). *Compresora de aire estacionario*. Obtenido de Amazon.com:
https://www.amazon.com/stores/page/78867AA0-08A5-42D0-88DA-D0BFB9C504C2?ingress=2&visitId=11e85891-2586-4e96-be39-5f007ab5c61f&ref_=ast_bln

- ETRMA. (2011). *End of life tyres: A valuable resource with growing potential*. European Tyre & Rubber Manufacturers Association.
- ETRMA. (2015). *End-of-Life Tyre Report*. European Tyre & Rubber Manufacturers Association.
- Hoy, P. (2022). *Entre reglamentos, leyes y pocas acciones, aún rueda la contaminación*. Obtenido de hoy.com.do:
<https://hoy.com.do/entre-reglamentos-ley-y-pocas-acciones-aun-rueda-la-contaminacion/>
- Ibrahim, H. A.-H. (2020). Introductory Chapter: Pyrolysis. En H. A.-H. Ibrahim, *Recent Advances in Pyrolysis* (págs. 1-12). London: IntechOpen.
- Mahapatra, S. S. (2014). *Experimentation and Evaluation of Tyre Pyrolysis Oil [Tesis de grado Technology in Mechanical Engineering]*. National Institute of Technology, Rourkela.
- Mejia, S. A., & Upegui, S. A. (2021). La pirólisis y otros métodos para el aprovechamiento de residuos de neumáticos como fuente de energía para la industria. Una revisión [ISSN:2027-8101]. *Cuaderno Activa 13. Revista Científica de la Facultad de Ingeniería.*, 41-60.
- Miteco. (2023). *Sistema de tratamiento*. Obtenido de Miteco:
<https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/sistema-tratamiento/pirolisis.html#:~:text=La%20pirólisis%20es%20una%20degradación,produzcan%20las%20reacciones%20de%20combustión>
- Murugan, S., Ramaswamy, M. C., & Nagarajan, G. (2008). Performance, Emission and Combustion studies of a DI Diesel Engine using Distilled Tyre Pyrolysis Oil-Diesel Blends. *Fuel Processing Technology*, 89, 152-159.
- Pamplona, F. (2022). Obtenido de mindthegraph:
<https://mindthegraph.com/blog/es/que-es-la-metodologia-en-la-investigacion/>
- Parra, R. S. (2016). Obtenido de DocPlayer:
<https://docplayer.es/10979688-Pirolisis-y-gasificacion-alternativas-a-la-incineracion-convencional.html>
- Reschner, K. (2019). *Recycling von Altreifen und anderen Elastomeren*.
<http://www.entire-engineering.de/Altreifenrecycling>.
- SIGNUS. (2020). *10 años de Prevención de la Generación de Neumáticos Fuera de Uso*. SIGNUS.
- Skoddow, T. (2014). *Asesoría "Colección y Base de Datos de los Flujos de Materias Primas"*. Santo Domingo: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
- Strydom, R. (2017). *Enhanced Waste Tyre Pyrolysis for the Production of Hydrocarbons and Petrochemicals [Tesis de master Engineering: Chemical Engineering]*. Cape Peninsula University of Technology, Cape Town.

TNU. (2021). *Memoria TNU*. Tratamiento de neumáticos usados.

Ugarte, C. A. (2015). Los neumáticos están fuera de uso. *Ecologista* #87, 36-39.

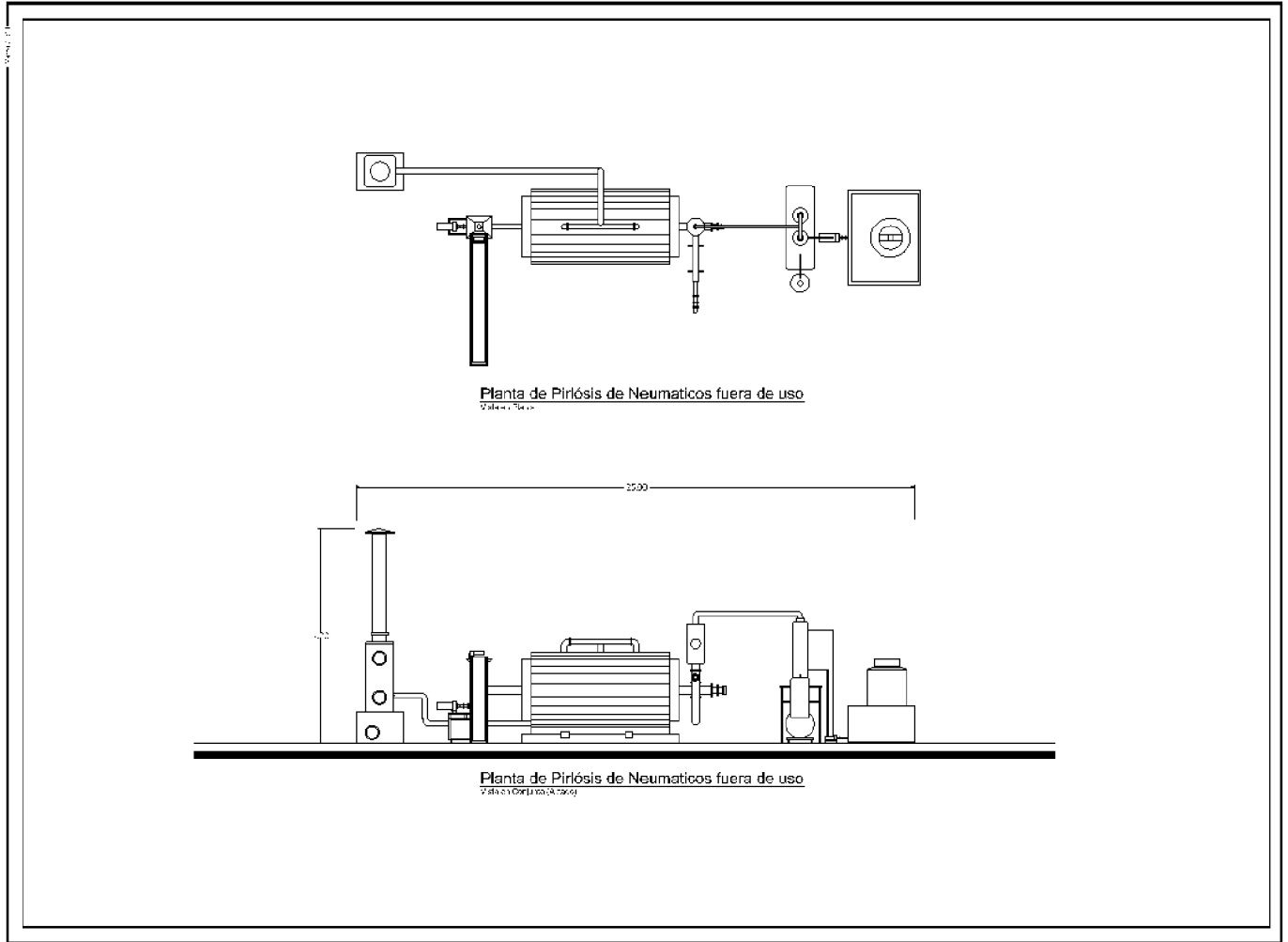
USTMA. (2019). *2019 U.S. Scrap Tire Management Summary*. U.S. Tire Manufacturers Association .

USTMA. (s.f.). *What 's in a tire*. Obtenido de U.S. Tire Manufacturers Association:
<https://www.ustires.org/whats-tire-0>

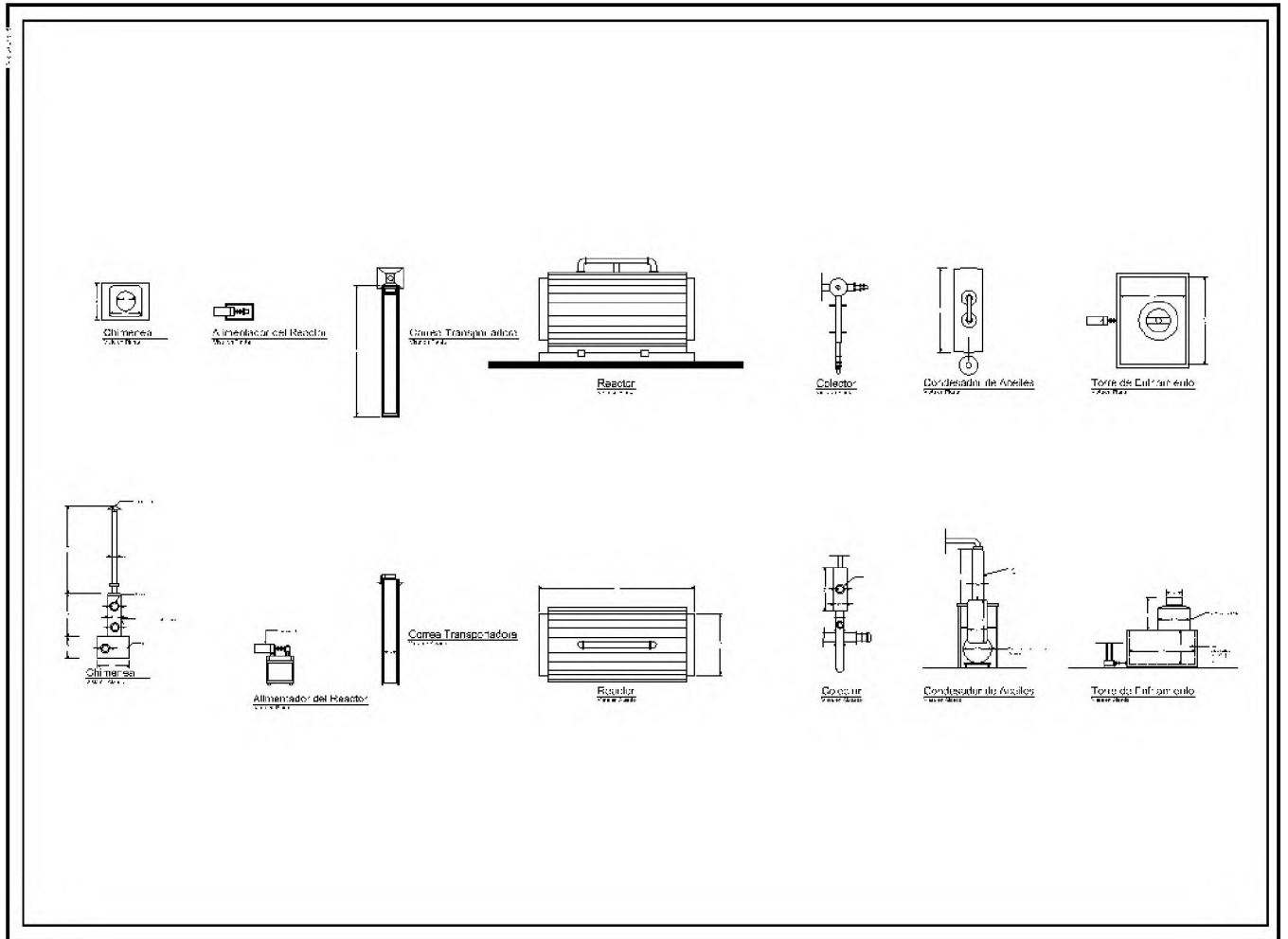
WBCSD. (2021). *Perspectives on End-of-Life Tire (ELT) Management: Challenges and potential solutions in the US, Europe and China*. Tire Industry Project (TIP).

ANEXOS

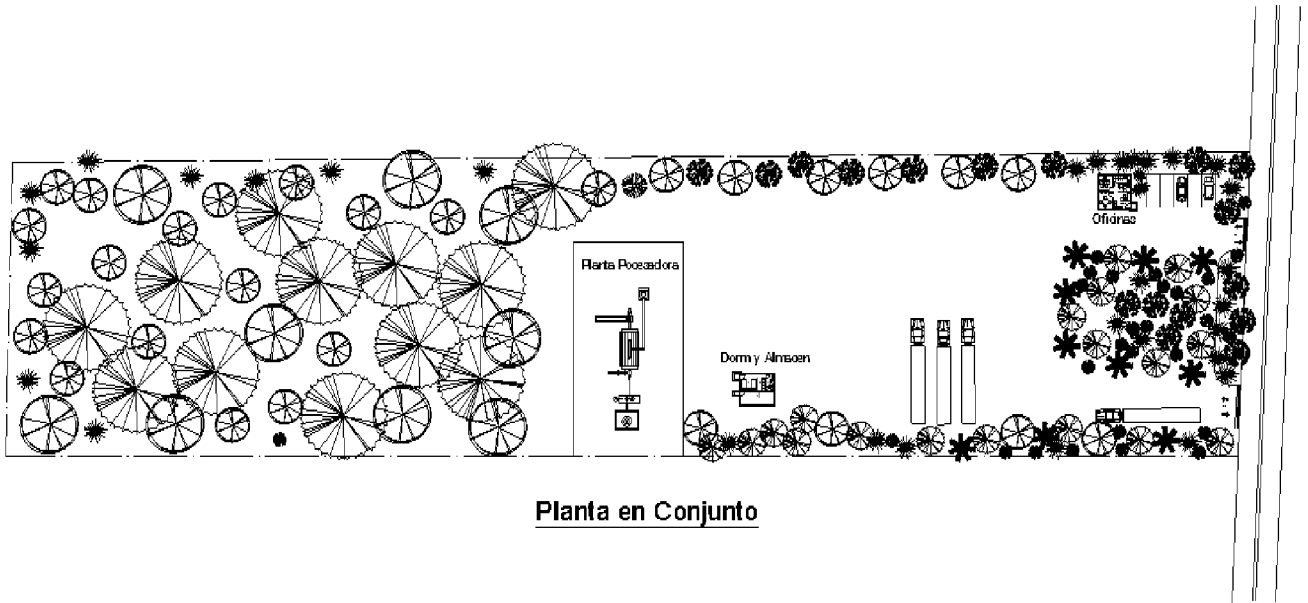
Anexo 1



Anexo 2

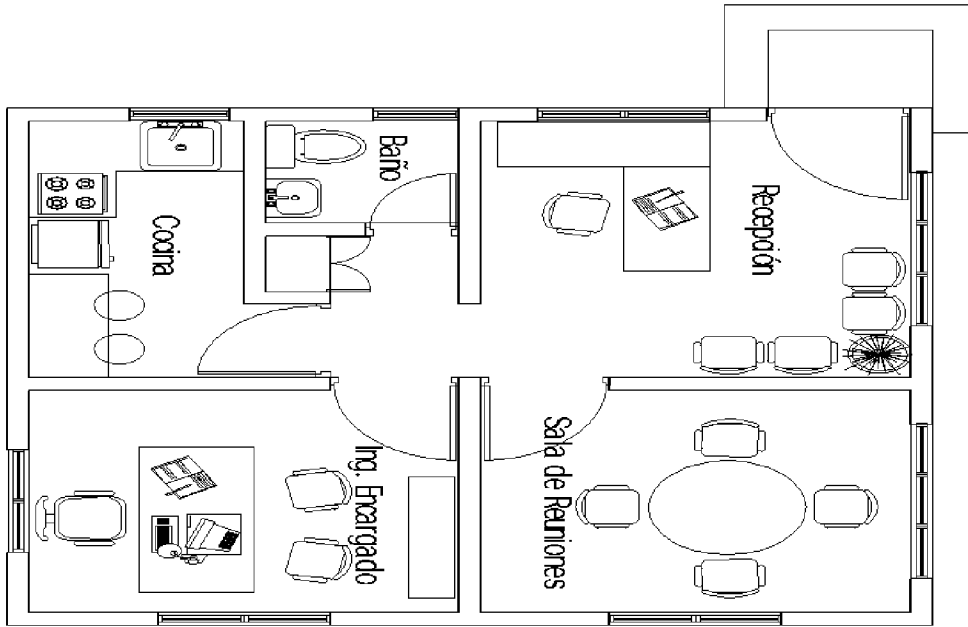


Anexo 3



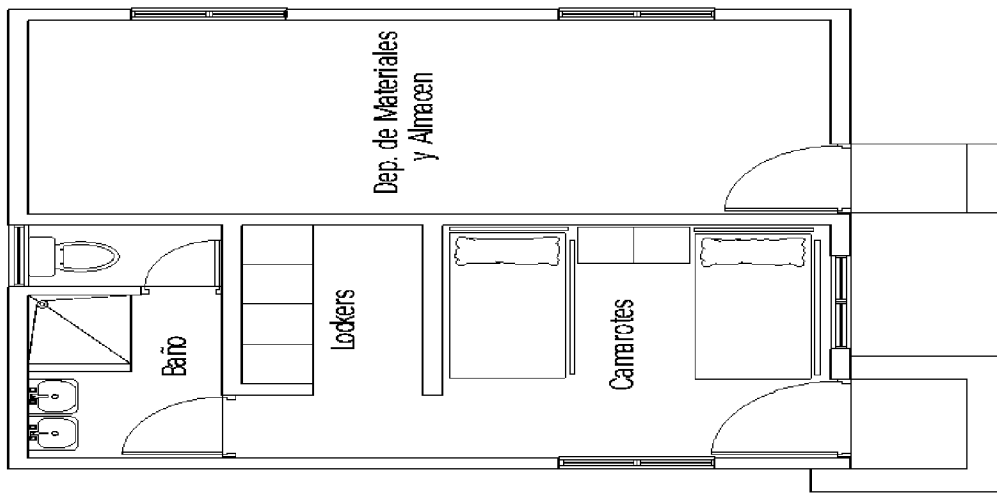
Planta en Conjunto

Anexo 4



Oficinas Administrativas

Anexo 5



Dorm. de Empleados y Almacén

Anexo 6

Nota: Estas especificaciones comprende todos los equipos mencionados en este trabajo a excepción del destilador

Lista de especificaciones Planta Pirólisis	
Energia Necesario	380 Volts, corriente trifásica, 50 Hz necesarios
Potencia total	40KW
Capacidad	12-16 TON/lote
Consumo de combustible	Gas natural: 250 m3, Carbon 800Kgs, Diesel: 250L
Enfriamiento	70 m3/ H2O reciclada o recuperada
Consumo de enfriador	1T/día
Trabajadores necesarios	3-5 trabajadores/ turno
Área ocupada	Producción: L30 M x W 10M x H7M equivalente a 300 m2
Peso	30 toneladas

Lista de especificaciones Destiladora	
Capacidad	6T / D
Rendimiento de aceite	5.1T / D
Método de trabajo	Lote
Materias primas	Petróleo crudo, aceite usado, fueloil, aceite de motor usado
Materiales de calentamiento	Petróleo, GLP, gas natural, madera, carbón, etc.
Comunitario	20KW
Forma estructural	Vertical
Método de enfriamiento	Refrigeración por agua
Presión operacional	Normal y Vacío
Tiempo de vida	5-8 años