

**ADAPTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO PARA LA
CONDENSACIÓN DE GAS DE PIRÓLISIS DE LLANTAS USADAS A NIVEL DE
LABORATORIO**

SANTIAGO CAMARGO OJEDA

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

Orientador

Claudio Alberto Moreno Arias

Ingeniero Mecánico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BOGOTÁ, D.C

2023

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre
Firma del Director

Nombre
Firma del Presidente Jurado

Nombre Firma del Jurado

Nombre Firma del Jurado

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA

Consejero Institucional

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. ALEXANDRA MEJIA GUZMAN

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretario General

Dr. JOSÉ LUÍS MACÍAS RODRÍGUEZ

Decano de la Facultad de Ingenierías

Ing. NALINY PATRICIA GUERRA PRIETO

Director del Programa de Ingeniería Mecánica

PhD. MARÍA ANGÉLICA ACOSTA PÉREZ

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

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	10
OBJETIVOS	12
1. GENERALIDADES	13
1.1 Aprovechamiento de la biomasa	13
<i>1.1.1 Conversión de la biomasa</i>	13
1.2 Neumáticos	15
<i>1.2.1 Composición de un neumático</i>	15
<i>1.2.2 Impacto ambiental</i>	17
<i>1.2.3 Aprovechamiento y reciclaje de neumáticos</i>	17
<i>1.2.4 Panorama nacional</i>	19
2. PIRÓLISIS	22
2.1 Caracterización y fundamentos	22
<i>2.1.1 Clasificación</i>	22
<i>2.1.2 Aspectos críticos</i>	23
2.2 Impacto ambiental	25
3. SISTEMA DE CONDENSACIÓN DE GAS DE PIRÓLISIS	28
3.1 Consideraciones y requerimientos de diseño	28
<i>3.1.1 Restricciones y limitaciones</i>	32
<i>3.1.2 Condiciones de operación</i>	34
4. RESTAURACIÓN Y REACONDICIONAMIENTO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR PARA QUE TRABAJE COMO SISTEMA DE CONDENSACIÓN DE GAS DE PIRÓLISIS DE NEUMÁTICOS USADOS	37
4.1 Condiciones iniciales del intercambiador de calor	36
4.2 Limpieza y restauración del intercambiador de calor	40
4.3 Reacondicionamiento del intercambiador de calor	44
<i>4.3.1 Construcción de la base del condensador</i>	46
4.4 Pruebas	49
<i>4.4.1 Pruebas preliminares</i>	49
<i>4.4.2 Pruebas operacionales</i>	50

5. CÁLCULO DE UN SISTEMA DE CONDENSACIÓN DE GAS DE PIRÓLISIS DE NEUMÁTICOS USADOS	57
5.1 Cálculos y consideraciones	57
6. CONCLUSIONES	69
BIBLIOGRAFÍA	70
ANEXOS	76

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. <i>Mecanismos de aprovechamiento de la Biomasa a través del uso del calor</i>	12
Figura 2. <i>Principales rutas de conversión de la biomasa</i>	15
Figura 3. <i>Ilustración de los productos obtenidos mediante pirólisis de biomasa</i>	26
Figura 4. <i>Gigatoneladas de emisiones de CO2 a nivel global</i>	27
Figura 5. <i>Intercambiador de calor de tubos y coraza</i>	30
Figura 6. <i>Disposición y diseño de tubos de uso común</i>	31
Figura 7. <i>Incrustaciones presentes en la superficie de los tubos de un inter. de calor</i>	34
Figura 8. <i>Perfiles de temperatura de intercambiadores de calor con flujo en paralelo y contracorriente</i>	36
Figura 9. <i>Estado del sist. de Enfriamiento didáctico previo al desarrollo de este proyecto</i>	38
Figura 10. <i>Condiciones en las que se encontraba el intercambiador de calor del sistema de enfriamiento didáctico</i>	38
Figura 11. <i>Condiciones en las que se encontraba el Intercambiador de calor</i>	39
Figura 12. <i>Incrustaciones, óxido y corrosión presente en el haz de tubos y la coraza del intercambiador de aceite</i>	39
Figura 13. <i>Condición en la que se encontraban las tapas laterales que cubren el haz de tubos</i>	40
Figura 14. <i>Haz de tubos del intercambiador de aceite</i>	40
Figura 15. <i>Tapas laterales que cubren el haz de tubos y tornillos sumergidos en vinagre</i>	41
Figura 16. <i>Resultado obtenido al sumergir la pieza en vinagre</i>	42
Figura 17. <i>Limpieza del interior de los tubos</i>	42
Figura 18. <i>Condiciones de las tapas que cubren los tubos una vez realizada la limpieza con vinagre</i>	43
Figura 19. <i>Consecuencias de la corrosión en algunas superficies del intercambiador de calor</i>	43
Figura 20. <i>Coraza del intercambiador de calor completamente limpia</i>	44
Figura 21. <i>Tapas laterales del intercambiador de calor pintadas</i>	45
Figura 22. <i>Broca de 1" realizando un agujero en la coraza del intercambiador de calor</i>	46
Figura 23. <i>Agujero de 1" de diámetro realizado</i>	46
Figura 24. <i>Manguera de 5/16" l interior del agujero realizado en el extremo inferior de una de las tapas que cubren el haz de tubos</i>	47

Figura 25. <i>Ensamble de la base del condensador haciendo uso de un taladro y una remachadora</i>	48
Figura 26. <i>El condensador montado en su base</i>	49
Figura 27. <i>Banco de prueba de pirólisis de neumáticos usados</i>	49
Figura 28. <i>Fugas de agua presentes en cada extremo de la unión entre la coraza y el haz de tubos</i>	51
Figura 29. <i>Fuga de gas de pirolisis a la salida del reactor</i>	52
Figura 30. <i>Primera prueba de pirólisis de neumáticos concluida</i>	53
Figura 31. <i>Muestras de productos resultantes de la primer prueba concluida de pirólisis</i>	54
Figura 32. <i>Reemplazo de mangueras por tuberías de galvanizado</i>	55
Figura 33. <i>Recirculación de los gases no condensables</i>	55
Figura 53. <i>Cortes de neumáticos usados siendo introducidos al interior del reactor de pirólisis</i>	56
Figura 35. <i>Muestra de productos obtenidos de la segunda prueba concluida</i>	57
Figura 36. <i>Correlación para el coeficiente de transferencia de calor del lado de la coraza</i>	62

RESUMEN

La finalidad de este proyecto es la de desarrollar la adaptación, rediseño y reacondicionamiento de un sistema de enfriamiento que se encontraba en las instalaciones de la Universidad de América, proveniente de un proyecto de grado del año 2002, el cual ya había cumplido su vida útil y desde algunos años se encontraba fuera de uso y listo para ser descartado y aprovechado como chatarra. Debido al enfoque ambiental y de economía circular del proyecto abordado a lo largo de este documento se determinó que es apropiado destinar parte de este sistema de enfriamiento, específicamente el intercambiador de calor con el fin de que este sea capaz de enfriar y condensar el gas producto de la pirólisis de neumáticos usados, para esto se hizo uso de diferentes recursos bibliográficos que permitieron analizar criterios de diseño y construcción, con consideraciones que permitan entender y profundizar la ingeniería básica detrás de estos procesos, y también entender y abordar una problemática ambiental como son los neumáticos fuera de uso que no son reaprovechados y tampoco son dispuestos de manera responsable.

En primera instancia se genera un marco teórico sobre el proceso estudiado, donde se muestran los conceptos y aspectos más relevantes para la construcción y cálculo de un intercambiador de calor que funcione como sistema de condensación de gas de pirólisis, así como las investigaciones previas más pertinentes. Posteriormente, se presentan etapas de verificación del estado del intercambiador, con pruebas de hermeticidad y pruebas visuales que determinaron apropiada una restauración de todos los componentes del intercambiador de calor, para posteriormente considerar factores de diseño más apropiados para la condensación de este gas pirolítico, validando diferentes configuraciones y formas de diseño y construcción como la disposición de las corrientes, el ángulo y orientación del intercambiador de calor, el análisis de la diferencia media logarítmica que implica cada una de estas configuraciones, entre otros.

Palabras clave: Pirólisis, Neumáticos fuera de uso, biomasa, intercambiador de calor, bioaceite, economía circular, sistema de condensación, transferencia de calor.

INTRODUCCIÓN

Los neumáticos suelen ser vistos como un residuo especial difícil de reciclar, debido a la naturaleza y propósito de construcción, ya que están hechos justamente para durar y aguantar el uso y desgaste por un tiempo prolongado, su degradación, sumado a otros factores como su volumen y durabilidad hacen que su disposición y reciclado sea complicado, también debido a su difícil almacenamiento y gran volumen, al finalizar su tiempo de vida útil no suelen desecharse de manera responsable, ocasionando problemas ambientales.

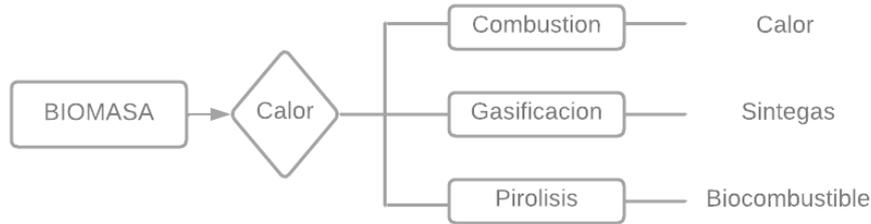
Un artículo de la Revista Semana afirma que, “según cifras de la DIAN, en Colombia en el año 2020 se importaron 1.350.000 llantas, de las cuales se reencaucha solo un 29 %. El total de llantas usadas que terminaron en calles y rellenos sanitarios es de 958.500 unidades.” [1]. Según la alcaldía de Bogotá, en la capital a el mes de octubre del 2020 se logró “controlar 2.628 toneladas de neumáticos que se aprovechan dentro de procesos de economía circular” [2].

En la Fundación Universidad de América, una institución de educación superior (IES) ubicada en Bogotá, la capital de Colombia, se forman profesionales en programas de Ingeniería, como Ingeniería Mecánica, Ingeniería Industrial, Ingeniería de Petróleos, Ingeniería Química, entre otras, dentro del pensum de estas carreras se pueden encontrar materias como máquinas térmicas y energías alternativas. El grupo de investigación en Energías Alternativas - IENA junto con otros grupos de investigación se plantean la realización de un proyecto de reciclaje de neumáticos mediante pirólisis, con enfoque de economía circular.

Existen diferentes procesos de transformación de biomasa gracias al uso de calor, como se muestra en la Figura 1, este calor puede ser suministrado de diferentes maneras, en el caso de la combustión el calentamiento se da en un ambiente con exceso de oxígeno, la gasificación se da en un ambiente con un nivel de oxígeno parcial, la licuefacción hidrotermal se da gracias al uso de agua [3], la pirólisis que es la base aplicada al proyecto consiste en la degradación y descomposición de recortes de neumáticos usados gracias a la inyección de calor en una atmósfera inerte, es decir donde no haya presencia de oxígeno y tampoco llama directa. A partir del proceso de pirólisis se genera una fase volátil que contiene una fracción de productos condensables a temperatura ambiente. La recolección de los productos líquidos se realiza a través del enfriamiento de la fase volátil, logrando la condensación de los productos líquidos y el enfriamiento de los gases permanentes que pueden ser usados como combustible para obtener la energía térmica del proceso de pirólisis.

Figura 1.

Mecanismos de aprovechamiento de la Biomasa a través del uso del calor



Nota. La figura evidencia las diferentes formas y mecanismos de aprovechamiento de la biomasa a través del uso del calor.

El sistema de condensación del gas de pirólisis puede ser llevado a cabo con la implementación de un intercambiador de calor que se encargue de enfriar y condensar aquellos volátiles de bajo peso molecular, debido a la naturaleza de economía circular y aprovechamiento de recursos del proyecto se determinó que es apropiado hacer uso de la infraestructura actual de la Universidad de América, se optó por restaurar y reacondicionar para esta tarea un intercambiador de calor que se encontraba en las instalaciones desde el año 2002, resultante de un proyecto investigativo de ese año, que consistió en la construcción de un sistema de enfriamiento didáctico para los laboratorios de la universidad y que tras varios años de servicio y uso se había determinado como material de desecho e iba a ser descartado y aprovechado como chatarra.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Adaptar un sistema de enfriamiento para la condensación de gas de pirólisis de neumáticos usados a nivel de laboratorio.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las condiciones actuales en las que se encuentra el sistema de enfriamiento a ser recuperado.
- Restaurar el intercambiador de calor para que sea adaptado al reactor de pirólisis.
- Definir los parámetros de diseño pertinentes para la nueva aplicación como sistema de condensación del gas generado en la pirólisis de cortes neumáticos usados.
- Verificar los cálculos realizados con el funcionamiento del sistema adaptado.

1. GENERALIDADES

1.1 Aprovechamiento de la biomasa

“La energía es indispensable en el aspecto productivo y cotidiano de la sociedad, cerca del 92% de esta energía consumida proviene de fuentes no renovables como el petróleo, gas natural y energía nuclear” [4], esto es alarmante debido a que en los últimos años es cada vez más evidente el impacto ambiental que la explotación y el uso de estos recursos genera en el planeta tierra, y es esta dependencia energética del planeta la que implica el desarrollo de nuevas alternativas energéticas, es allí donde la biomasa, designada como “conjunto heterogéneo de materias orgánicas, tanto por su origen como por su naturaleza y composición. Esta fuente energética se basa en la utilización de la materia orgánica formada por vía biológica en un pasado inmediato o en los productos derivados de esta” [5] toma relevancia.

De la gran cantidad de biomasa en la tierra, solo el 5%, 13.500 millones de toneladas métricas, puede movilizarse potencialmente para producir energía. Incluso esta cantidad es lo suficientemente grande como para proporcionar alrededor del 26% del consumo mundial de energía, lo que equivale a 6 mil millones de toneladas de petróleo [6]. A partir del aprovechamiento de la biomasa se pueden producir 3 diferentes tipos de combustibles primarios, que resultan útiles para diferentes tipos de grandes industrias como lo son la industria química, de energías, del transporte y el ambiente, estos combustibles son [6]:

- Combustibles líquidos: Etanol, metanol, biodiesel, aceite vegetal, aceite pirolítico.
- Combustibles sólidos: Carbón vegetal, biomasa torrefactada, biocoque, biocarbón, hidrocarbón.
- Combustibles gaseosos: Biogás (CH_4 , CO_2), gas de síntesis (CO , H_2), gas natural sustituido (CH_4), gas gasógeno (CO , H_2 , CH_4 , CO_2 , H_2)

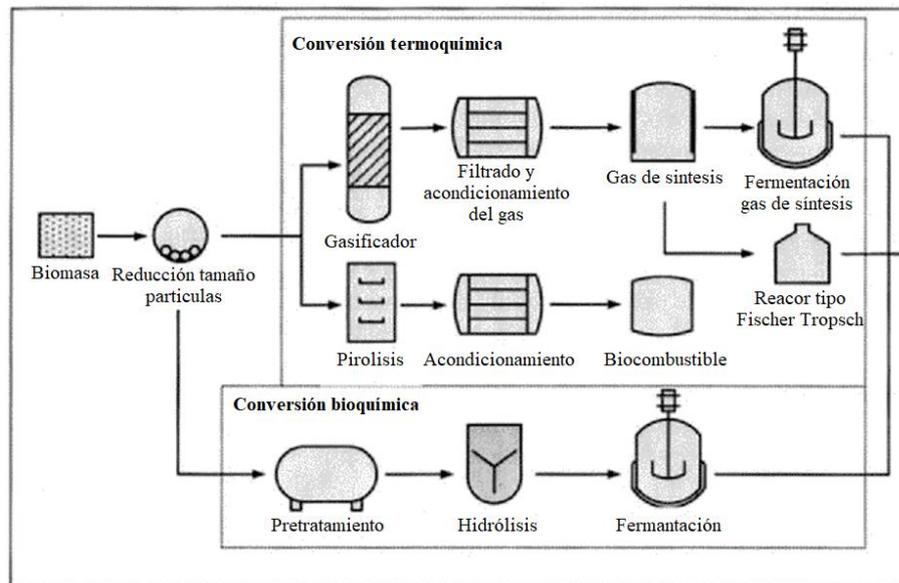
1.1.1 Conversión de la biomasa

Los biocombustibles a partir de la biomasa se pueden producir gracias a dos rutas principales de conversión, conversión bioquímica y conversión biotérmica, ambos presentados en la figura 2. Factores como el volumen, la densidad y la forma de la biomasa son claves para la

determinación del método de conversión a implementar [6], ya que la biomasa sólida a diferencia del gas o el líquido, no se puede manipular, almacenar o transportar tan fácilmente.

Figura 2.

Principales rutas de conversión de la biomasa



Nota. En la figura se evidencian las principales dos grandes rutas de conversión de la biomasa en biocombustibles, estos son la conversión bioquímica y conversión biotérmica. Tomado de: Khanal, Samir K. Surampalli, Rao Y. Zhang, Tian C. Lamsal, Buddhi P. Tyagi, R. D. Kao, C. M. “*Bioenergy and Biofuel from Biowastes and Biomass - 1.4 Biochemical or Thermochemical Conversion of Lignocellulosic Biomass*”. American Society of Civil Engineers (ASCE). 2010 [En línea] Disponible: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00AEHJ62/bioenergy-biofuel-from/biochemical-or-thermochemical>

1.1.1.a. Conversión bioquímica. Este es quizás el medio de conversión más antiguo, consiste en el uso de múltiples enzimas para la hidrólisis de la biomasa pretratada para obtener azúcares fermentables. El hidrolizado obtenido luego se fermenta obteniendo así etanol gracias al uso de catalizadores microbianos provenientes de los desechos animales [6]. Este medio de conversión bioquímico es significativamente más lento que la conversión termoquímica, pero cuenta con la ventaja de no requerir gran energía externa.

1.1.1.b. Conversión termoquímica. Este medio de conversión surgió mucho después de la conversión bioquímica, y tiene como objetivo convertir la biomasa en gas, así como la

producción de energía térmica [4] que después es transformada en biocombustibles a través de rutas químicas o biológicas.

1.2 Neumáticos

1.2.1 Composición de un neumático

Independientemente del diseño o la aplicación del neumático, todos los neumáticos deben Cumplir y satisfacer un conjunto fundamental de funciones:

1. Proporcionar capacidad de carga.
2. Proporcionar amortiguación.
3. Transmitir par de conducción y frenado.
4. Proporcionar agarre en las curvas
5. Proporcionar estabilidad dimensional
6. Resistir la abrasión.
7. Generar respuesta de dirección.
8. Tener baja resistencia a la rodadura.
9. Proporcionar el mínimo ruido y la mínima vibración.
10. Buena durabilidad y larga vida útil.

Un neumático se compone básicamente de caucho y refuerzos en capas de alambres y cuerda, estas capas de refuerzo se extienden transversalmente de extremo a extremo de las paredes del neumático, encima de las cuales hay un cinturón ubicado debajo de la banda de rodadura, las características técnicas, y de diseño cambian respecto a las diferentes aplicaciones del neumático y el desempeño esperado por parte de estos [8].

Los neumáticos suelen tener una cubierta de nylon, también llamada capa superior, ubicada sobre el paquete del cinturón. Las superposiciones de nylon restringen y controlan el crecimiento de los neumáticos como resultado de las fuerzas centrífugas creadas a altas velocidades. La vuelta hacia arriba de la capa, que describe la manera en que la capa del cuerpo envuelve el alambre del talón y gira hacia arriba la pared lateral, ancla la capa del cuerpo al haz de cuentas y refuerza aún más la región inferior de la pared lateral. Un protector de puntera, que es un componente de caucho reforzado con nylon, protege la puntera del talón para que no

se rompa durante el montaje y el desmontaje. Por encima de la protección de la puntera, el chafer protege aún más el área del talón de la abrasión contra la pestaña de la llanta durante el uso [8].

En la Tabla 1 se muestran los componentes típicos de los neumáticos para pasajeros y camiones. Los cauchos y elastómeros que constituyen el componente de caucho del neumático son una mezcla de varios cauchos reforzados con material de relleno de negro de humo. La construcción del neumático implica un compuesto de varias capas de caucho, material textil y cinturón y cordón de acero [9], es importante exponer de manera superficial los usos de estos diferentes componentes.

Tabla 1.

Componentes típicos de los neumáticos

Componente	% de peso en un neumático
Goma	47
Negro de humo	21.5
Metales	16.5
Textiles	5.5
Aditivos	9.5

Nota. La tabla muestra los componentes típicos de un neumático, tanto para carros de pasajeros como para camiones o vehículos de carga, se evidencian los porcentajes relacionados con la cantidad específica de cada componente presente en el neumático. Tomado de: de P. T. Williams, “*Pyrolysis of waste tyres: A review,*” vol. 33, no. 8, pp. 1714–1728, doi: 10.1016/j.wasman.2013.05.003. 2013. [En línea] Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X13002122>

1.2.1.a. Caucho. Se utilizan muchos cauchos sintéticos y naturales diferentes, caucho de estireno butadieno, caucho natural (poliisopreno), caucho de nitrilo, caucho de cloropreno, caucho de polibutadieno.

1.2.1.b. Negro de humo. Se usa para fortalecer el caucho y generar resistencia a la abrasión.

1.2.1.c. Metales y alambres. Son cinturones y cuerdas tejidos al interior del neumático para otorgar resistencia estructural.

1.2.1.d. Textiles. Se usa como material de refuerzo.

1.2.1.e. Aditivos: Como óxido de zinc, azufre entre otros, son usados para controlar el proceso de vulcanización y mejorar las propiedades físicas del caucho como entrecruzar las cadenas de polímero dentro del caucho y también para endurecer y evitar una deformación excesiva del neumático a temperaturas elevadas.

1.2.2 Impacto ambiental

La gestión de los neumáticos de desecho se ha convertido en un problema creciente en los últimos años, y este ha sido más evidente debido al actual gran y progresivo interés ambiental de personas, organizaciones y gobiernos. Los neumáticos de desecho representan uno de varios desechos especiales que son difíciles de manejar [7]. Los neumáticos suelen ser desechos que no son dispuestos de manera responsable, esto debido a factores como su gran volumen y peso.

Millones de neumáticos están dispersos en barrancos, desiertos, bosques y lotes baldíos. Los neumáticos resultan apilados generalmente en grandes montañas de neumáticos en los diferentes vertederos de las ciudades. Esto presenta grandes riesgos de incendio, los cuales son muy difíciles de controlar y generan gran contaminación, lo que puede llegar a generar diferentes problemas ambientales y de salud pública para las zonas cercanas, a su vez gracias a su durabilidad, el paso del tiempo no les afecta de forma considerable, resultando en años sin presentar mayor nivel de descomposición, acumulando agua estancada que permite la proliferación de mosquitos que presentan un riesgo de propagación de enfermedades.

1.2.3 Aprovechamiento y reciclaje de neumáticos

Se estima que la producción mundial de neumáticos es de 1.7 billones al año aproximadamente, eventualmente todos estos neumáticos serán usados y quedarán fuera de uso. En muchos países, especialmente los de la Unión Europea hay regulaciones que determinan estrategias de aprovechamiento y reciclaje de este tipo especial de desechos, los porcentajes de aprovechamiento van desde el 70% hasta el 95% aproximadamente, pero en países en desarrollo estos porcentajes suelen ser marginales [10].

Este desarrollo y estudio ha establecido principales tecnologías de reciclaje y aprovechamiento, estas son la incineración, pirólisis, recuperación/reúso, desvulcanización y pulverización [7].

1.2.3.a. Incineración: Se quema por completo el neumático fuera de uso dentro de un incinerador especial, para la generación de energía, que es usada como combustible para la combustión de hornos de cemento, para la producción de vapor, energía eléctrica, pulpa, cal, papel y acero. Es un método efectivo y económico para aprovechar el caucho de los neumáticos, el contenido de energía del caucho es de aproximadamente 32,6 MJ/kg, cerca de un 10% menos que el petróleo pesado con 37,7 MJ/kg, y 1,3 veces el contenido energético del carbón con 25,1 MJ/kg [7][12].

1.2.3.b. Desvulcanización: ‘Este método tiene como objetivo romper selectivamente los enlaces cruzados de sulfuros en los vulcanizados, con una escisión mínima de la cadena principal’ [4], es decir en la cadena de polímero, es una buena opción debido a que renueva la fórmula química original de los elastómeros y brinda la posibilidad de rescatar elastómeros de los desechos del caucho vulcanizado, de ahí su nombre [12].

1.2.3.c. Recuperación: “Este proceso descompone el caucho vulcanizado junto con la escisión de la cadena principal por el calor en presencia de productos químicos o vapor a alta presión” [4].

1.2.3.d. Pirolisis: La base de este proyecto, que consiste en la “descomposición del componente de caucho en presencia de calor y ausencia de oxígeno, evitando así la oxidación” [4], el proceso de pirolisis suele darse en temperaturas típicas entre los 400 °C hasta los 800 °C, este proceso deja tres residuos y productos aprovechables; el gas pirolítico, correspondiente al 10%-20%, el aceite pirolítico, correspondiente al 40%-50% y por último el negro de humo, correspondiente al 30%-40% generalmente. Otros subproductos de la pirólisis pueden incluir fibras de acero, rayón, algodón o nailon de las cuerdas de los neumáticos, todos estos productos y subproductos pueden ser aprovechables y fuentes de ingresos [12].

Una vez aprovechados estos neumáticos, según el tipo de tecnología o proceso usado se presentan diferentes alternativas y aplicaciones, como las mencionadas a continuación:

- Neumáticos enteros: Arrecifes artificiales y rompeolas, equipo de juegos, control de la erosión, barreras de choque de carretera [11].
- Neumáticos perforados: Alfombrillas, cinturones, juntas, suelas de zapatos, parachoques de muelle, sellos, silenciadores, colgadores, cuñas, arandelas y aisladores [11].
- Neumáticos triturados: material ligero de construcción de carreteras, sustitutos de grava para parques infantiles, compostaje de lodos [11].
- Neumáticos molidos: Caucho y productos plásticos (tapetes moldeados, adhesivos plásticos), cruces de ferrocarril de caucho, aditivos para pavimentos asfálticos [11].

Se ha demostrado que reciclar neumáticos como material o energía tiene muchos efectos positivos, especialmente en el tema de emisiones. Aproximadamente cada tonelada de combustible derivado de neumáticos fuera de uso, sustituido por carbón en los hornos de cemento evita un estimado de 543 kg CO₂ de emisiones directas tanto indirectas. Si se tienen en cuenta las emisiones de la fracción de biomasa, la cantidad de emisiones evitadas es de 613 kg CO₂ por tonelada de neumáticos [10].

1.2.4 Panorama nacional

Anualmente en Colombia se están desechando aproximadamente 61.000 toneladas de neumáticos, muchos de estos no son dispuestos de forma responsable, y terminan arrojados en las calles, ríos, y potreros, generando así un gran impacto; al ser residuos especiales no pueden ser arrojados en el espacio público, quemados o enterrados. Su incorrecta disposición no solo contamina el ambiente, también genera riesgos en la salud de seres vivos [13].

Aunque el fenómeno de los neumáticos abandonados es preocupante en algunos territorios del país, lo cierto es que la industria está haciendo lo posible para evitar que estos elementos sigan impactando el ambiente. El principal programa en esta materia es la Corporación Rueda Verde, una iniciativa que lidera la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia y cuya meta para el 2017 fue recolectar y gestionar 2,5 millones de neumáticos, para el 2021 el programa quiso consolidarse como el sistema líder de recolección de este residuo, reincorporando al menos

65% de estos neumáticos fuera de uso gracias a los 177 puntos de recolección con los que cuenta el programa [14].

El director del programa aseguró que estos neumáticos o llantas fuera de uso “Las llevamos a procesos de trituración mecánica para obtener caucho granulado o pulverizado, y ese caucho se está utilizando para hacer mezclas modificadas para rehabilitación y construcción de vías, en mobiliario urbano, canchas sintéticas, pistas atléticas y en la industria de calzado” [14].

En Bogotá, la capital del país específicamente sólo el año pasado 2021 se lograron aprovechar 2.000 toneladas de neumáticos fuera de uso, bajo programas de la Alcaldía de Bogotá se organizan a lo largo del año jornadas llamadas ‘*Llantaton*’ donde se logró la recolección de 14.000 neumáticos, y otros proyectos impulsados por Rueda Verde, Sistema Verde, Ecollantas de Colombia, Acopiadora de Llantas Hernández y Centro de Acopio JADA [15], donde estos residuos especiales son recolectados para posteriormente ser reaprovechados.

Por otra parte, es importante tener en cuenta que legalmente en Bogotá está prohibido el abandono de neumáticos en el espacio público, enterrarlas como método de eliminación o disposición final, usarlas como subproductos de combustión o su quema a cielo abierto [15], esto apoyado por el Decreto 442 del año 2015.

Dentro de las políticas actuales que se han implementado, para las cuales aún hace falta un seguimiento, monitoreo y actualización estricta se encuentra la resolución 1326 de 2017 donde se establecen los sistemas de recolección de llantas, el acuerdo 602 de 2015, que rige en la ciudad de Bogotá, en el que se promueve la realización del plan estratégico a seguir para el manejo, reutilización y aprovechamiento de llantas usadas. Finalmente se encuentra la resolución 1457 de 2010 expedido por la secretaría distrital de hábitat de Bogotá, donde se establecen Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de llantas usadas [16].

En el país podemos encontrar que dentro de los métodos de aprovechamiento de neumáticos usados y fuera de uso la alternativa no tan popular es la pirólisis, hay muy pocas plantas en operación a lo largo del territorio nacional, así como poca información respecto a su operación.

- Yopal, Departamento de Casanare: Se encuentra una planta de pirolisis con una capacidad de procesamiento de 5 t/día y una capacidad productora de 1.500 kg/día entre negro de

humo, aceite pirolítico, aceros y alambres al interior de los neumáticos y gas no condensable [17].

- Reacecol Green SAS: Es una planta de pirólisis ubicada en el Valle del Cauca, tiene como proyecto “Valoración energética de residuos con enfoque de economía circular”, cuenta con una capacidad de procesamiento de 12 t/día [17].
- Aceites Pirolíticos S.A.S E.S.P: Es una planta en Madrid, Cundinamarca, en el 2019 personal de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca descubrieron dentro de las instalaciones de esta empresa un vertimiento de residuos peligrosos, lo que sería el gas pirolítico, a pocos metros del espejo de la laguna de La Herrera, la empresa fue sometida a una medida de prevención por posibles daños al ecosistema, y fueron suspendidas sus actividades, aunque la empresa sigue activa según bases de datos se desconoce su forma y capacidad de operación actual [18].

En Colombia, la ANLA, Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, según el artículo 2 del decreto 3573 de 2011, es el organismo del estado encargado de que los proyectos, obras o actividades sujetos de licenciamiento, permiso o trámite ambiental cumplan con la normativa ambiental, de tal manera que contribuyan al desarrollo sostenible ambiental del país [19], sin embargo hay mucha ambigüedad acerca de lo que se puede y no se puede hacer en este aspecto de tecnologías de aprovechamiento de recursos de este tipo, como los neumáticos fuera de uso.

2. PIRÓLISIS

La pirólisis es una descomposición termoquímica de biomasa generalmente, esta descomposición se puede dar en ausencia total de agentes oxidantes o con un suministro limitado que no permite la gasificación en un grado apreciable. Este proceso de descomposición precede a otros procesos de descomposición de biomasa como la combustión y gasificación, aunque con la diferencia de requerir de agentes externos oxidantes como el oxígeno o el vapor [20].

2.1 Caracterización y fundamentos

La pirólisis de la biomasa normalmente se lleva a cabo en un rango de temperatura que va desde los 300 °C hasta 650 °C, a diferencia de otros procesos como la gasificación que opera en un rango entre los 800 °C a 1000 °C y para el caso de la torrefacción este rango de operación es entre los 200 °C a 300 °C. Este proceso está motivado en mayor medida a la producción de productos líquidos para la obtención de combustibles o producción química, por ejemplo, en grandes moléculas complejas de hidrocarburos de la biomasa se descomponen en moléculas relativamente más pequeñas y simples de gas, líquido y carbón [21].

2.1.1 Clasificación

La pirólisis se puede clasificar principalmente según la velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia, se subcategoría, por ejemplo, en pirólisis lenta, pirólisis convencional y pirólisis rápida [22].

2.1.1.a. Pirolisis lenta: Es un proceso de pirólisis muy lento, conocido como la forma de pirolisis más antigua y caracterizado por una tasa de calentamiento muy baja inferior a 0.01 - 2.0 °C/s [22], un tiempo de residencia de incluso un par de días que promueve reacciones secundarias de carbonización de vapor volátil aumentando el rendimiento del biocarbon, y cuya operación se da a una temperatura aproximada 400 °C, este proceso se usa ampliamente para la producción de negro de humo, permite un tiempo adecuado para que el vapor condensable se convierta en carbón y gases no condensables [21].

2.1.1.b. Pirólisis convencional: En la pirólisis convencional la biomasa es calentada a temperatura moderada por debajo de los 600 °C y a una velocidad igualmente moderada de 10 °C/min aproximadamente [23]. El tiempo de residencia en el proceso es del orden de pocos minutos y produce los tres tipos de productos de la pirólisis en proporciones relativamente similares [21].

2.1.1.c Pirólisis rápida: En este proceso la biomasa es calentada a una tasa de calentamiento sumamente rápida que va desde los 1.000 hasta los 10.000 °C por segundo, según el producto de interés las temperaturas máximas cambian, para el caso en el que el producto líquido la temperatura máxima debe no superar los 650 °C, mientras que para la obtención de productos gaseoso estas temperaturas pueden llegar incluso a los 1.000 °C [21].

Cuatro características importantes del proceso de pirólisis rápida que ayudan a aumentar el rendimiento del líquido son una velocidad de calentamiento muy alta, temperatura de reacción dentro del rango de 425 a 600 °C, tiempo de residencia corto, de menos de 3 segundos de vapor en el reactor, y finalmente un enfriamiento rápido del gas producto [21].

Un aspecto muy importante a tener en cuenta para la pirólisis, especialmente la pirólisis rápida es el secado y la molienda, estos se deben realizar antes de introducir la materia prima dentro del reactor, un mayor contenido de humedad en la biomasa reduce la cantidad y calidad del producto líquido; y la biomasa con partículas de gran tamaño evita la transferencia de calor y, por lo tanto, conduce a una conversión de biomasa incompleta [24].

2.1.2 Aspectos críticos

La producción de pirólisis se ve afectada por varios factores como la temperatura, velocidad de calentamiento, composición de la materia prima, tamaño de partícula de la materia prima, diseño del reactor, entre otros. Para la biomasa lignocelulósica, la producción de pirólisis haciendo uso de estos residuos está estrechamente relacionada con los contenidos relativos de hemicelulosa, celulosa y lignina de los desechos. Por ejemplo, la composición de celulosa es una fuente importante para la producción del producto líquido, es decir el bioaceite, mientras que la lignina es la principal responsable de la producción del producto sólido, es decir el biocarbón o negro de humo [25].

- El rendimiento máximo de líquido orgánico, es decir el biocombustible, de la descomposición térmica se puede aumentar hasta un 80 % mediante la elección apropiada de aspectos variables como la velocidad de calentamiento, la temperatura de pirólisis y la evacuación del producto de la zona de reacción o también conocido como tiempo de residencia [26]. En resumen, se determina lo siguiente:
- El calentamiento rápido genera una mayor volatilidad y un producto sólido más reactivo que los producidos por un proceso de calentamiento más lento [21].
- Una tasa baja y lenta de calentamiento, una temperatura de pirolisis más baja sumado a un tiempo de residencia prolongado maximiza el rendimiento en la obtención del carbón sólido o negro de humo [26], esto sucede por el carbono fijo, que tiene un poder calorífico más alto, en el carbón vegetal aumenta mientras que el contenido volátil del carbón vegetal disminuye [21].
- Una tasa alta de calentamiento, una temperatura de pirólisis más elevada y un tiempo de residencia más corto maximizan el rendimiento de este gas pirolítico [26].
- Una tasa de calentamiento alta, una temperatura de pirólisis intermedia y un tiempo de residencia más corto maximizan el rendimiento en la obtención del requerimiento líquido [26].

Con lo anteriormente mencionado se determina que la tasa de calentamiento de las partículas de biomasa tiene una influencia importante en el rendimiento y la composición en los productos de la pirólisis. Además de estos, otros factores como la presión, la composición del medio de pirólisis y la presencia de catalizadores también afectan el producto de pirólisis.

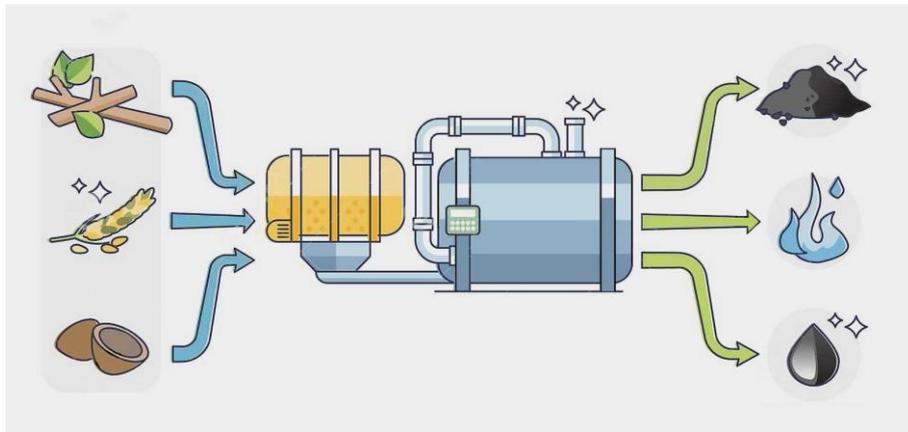
Hay bastantes consideraciones y observaciones que han sido determinadas como apropiadas para el proceso de la pirólisis de forma general, sin embargo, todos estos valores y consideraciones dependen de varios factores. La pérdida de calor superficial es difícil de estimar en etapas de diseño, por lo que se ha determinado como apropiado asumir que este valor sea el 10% del calor en la corriente entrante. Para un sistema integrado, el suministro de aire debe ser controlado, esto con el fin de evitar una disminución en el rendimiento del proceso. La pirólisis rápida es especialmente adecuada para un proceso de licuefacción

pirolítica de biomasa. El rendimiento óptimo para la obtención del producto líquido es más alto a los 500 °C y cae bruscamente cuando se trabaja a temperaturas por encima y por debajo de esta cifra. El tiempo de residencia generalmente está en el rango de 0.1 a 2.0 s [26].

Adicionalmente el tamaño de las partículas suele determinar y facilitar aspectos del proceso de pirólisis, ya que moléculas más finas de biomasa o residuos suele ofrecer menor resistencia al escape de los gases condensables, dando así un mejor rendimiento del producto líquido [26].

Figura 3.

Ilustración de los productos obtenidos mediante pirólisis de biomasa



Nota. Representación gráfica de los productos resultantes de un proceso pirolítico que tuvo como insumo y materia prima diferentes formas de biomasa, Tomado de Extinguelo. “¿Que es la pirolisis?” [En línea], disponible en <https://www.extinguelo.com/que-es-la-pirolisis-diferencia-combustion/>

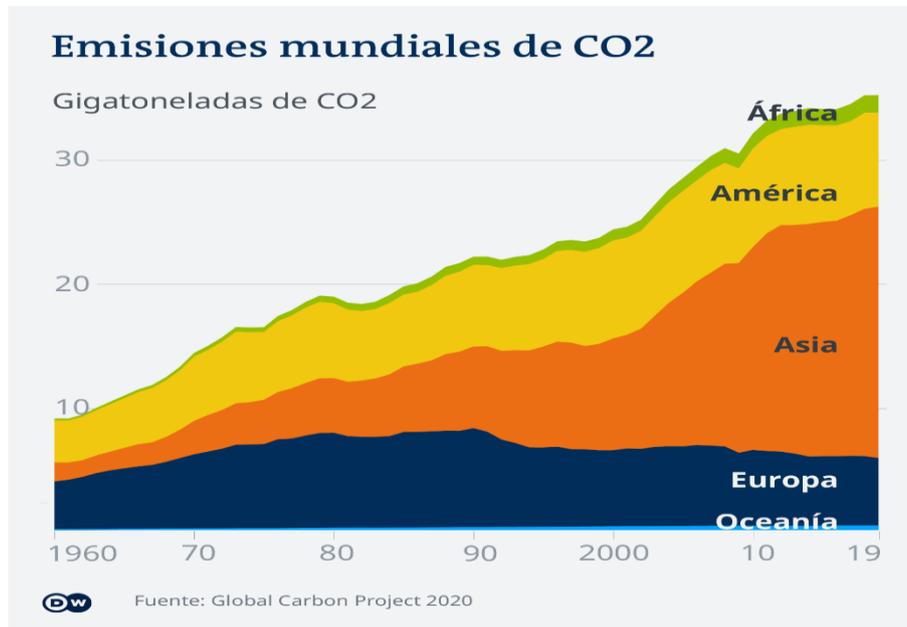
2.2 Impacto ambiental

Desde hace décadas se viene presentando el desconsiderado uso de plásticos de un solo uso, o productos de consumo de corta duración, lo que implica que serán desechados prontamente y en grandes cantidades, también están aquellos otros residuos especiales como los lodos y los neumáticos, todo esto como bien sabemos contribuye a diferentes problemas ambientales a lo largo del planeta tierra, problemas que avanzan y crecen de manera preocupante y exponencial, en la figura 4 se evidencia como en las últimas 6 décadas las emisiones a nivel mundial de CO₂ se han más que triplicado, algo realmente preocupante, es por eso que procesos enfocados en la economía circular están tomando cada vez más fuerza, con el fin de minimizar ese desperdicio y más bien aprovechar al máximo los recursos de los que se dispone, con el fin de

gestionar estos desechos de la mejor y más provechosa manera, generando y promoviendo la sostenibilidad. Uno de estos procesos es la pirólisis, un proceso que, aunque ya es más usado y promovido, sigue siendo una tecnología en desarrollo.

Figura 4.

Gigatoneladas de emisiones de CO2 a nivel global



Nota. Representación gráfica de los niveles de emisiones globales de CO2 durante las últimas 70 décadas. Tomado de G. Grün, R. Menegat S. Michel Penke “La crisis climática en once gráficas” 2021. [En línea], disponible en <https://www.dw.com/es/la-crisis-clim%C3%A1tica-en-once-gr%C3%A1ficas/a-59699777>

Los resultados sugieren que el reciclaje químico a través de la pirólisis tiene un impacto de alrededor del 50% en el cambio climático respecto con otras tecnologías más convencionales de recuperación de energía, para ponerlos en cifras, aquellos plásticos de desecho que se aprovechan en la pirólisis tienen un impacto en el cambio climático significativamente menor, cerca de 1,44 toneladas de CO2 equivalente, frente a 1,89 toneladas de CO2 [30] equivalente por tonelada de plástico producto de la fabricación de nuevos recursos a partir de plásticos nuevos y los recursos fósiles vírgenes que se requieren para su producción que el equivalente fabricado a partir de recursos fósiles vírgenes.

Para comparar otras formas de aprovechamiento de residuos con la pirólisis se puede abordar el reciclado mecánico, que es una técnica ampliamente usada alrededor del mundo,

básicamente consiste en recolectar, lavar, triturar y derretir estos residuos, como el plástico mayormente, para producir pellets que finalmente se pueden usar para producir productos plásticos [30], la desventaja de este proceso mecánico es que se pueden afectar las propiedades del material, algo que el reciclaje químico mediante pirólisis no afecta, ya que esta alternativa comprende diferentes tecnologías que convierten los desechos en materia prima valiosa para la industria química, productos como monómeros, oligómeros e hidrocarburos superiores [31] que no generan deterioros ni restricciones en la calidad de los productos y que además generan un bajo consumo energético, la gran diferencia se ve a la hora de analizar el consumo energético, este es más bajo en la pirólisis, sin embargo el potencial para el desarrollo de esta tecnología es muy amplio, con el posible aumento en la eficiencia de conversión de carbono en el futuro, es probable que su impacto ambiental se reduzca significativamente [31].

Un aspecto muy importante mencionado por los autores del artículo *“A life cycle assessment data analysis toolkit for the design of novel processes – A case study for a thermal cracking process for mixed plastic waste”* es el de que el impacto ambiental de la pirolisis como tal depende de los productos o desechos que se emplean para su operación, y también este impacto depende del producto al que entran a reemplazar [32].

3. SISTEMA DE CONDENSACIÓN DE GAS DE PIRÓLISIS

El aceite de pirólisis, producido a través de la pirólisis de biomasa residual es una fuente sostenible alternativa tanto de bioenergía como de bioquímicos valiosos [33], estos biocombustibles se pueden además usar en aplicaciones de calefacción térmica o generación de electricidad; para la obtención de este producto líquido se requiere la implementación de un sistema de condensación en la planta de pirólisis, el cual depende básicamente de la implementación de uno o varios intercambiadores de calor que pueden ser de diferentes configuraciones pero que tienen como objetivo la recuperación objetiva de este bioaceite, es decir que recupera los gases condensables como producto líquido. El uso de condensadores para separar fraccionadamente el bioaceite requiere menos energía y potencialmente produce líquidos de mayor calidad de combustible y flujos de productos que pueden refinarse aún más para recuperar productos químicos de alto valor [33].

3.1 Consideraciones y requerimientos de diseño

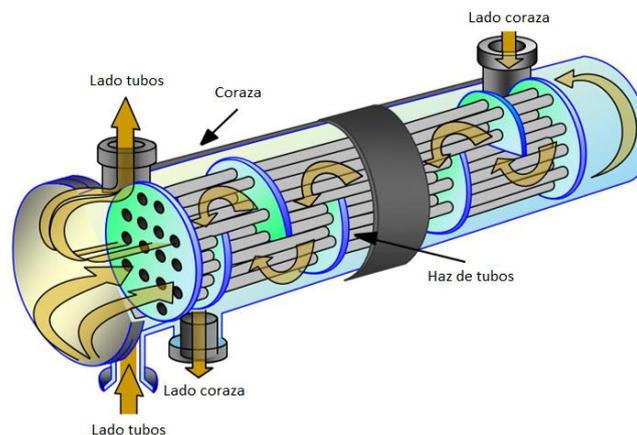
Si bien las condiciones del reactor son los principales impulsores del rendimiento y la calidad del bioaceite producido, el diseño del condensador afecta la calidad del petróleo con respecto a su composición [33]. La selección del condensador y su diseño, es decir, el tipo y el tamaño del condensador, se basa en la idoneidad para un proceso que depende del tipo de fluido, su fase, rango de temperatura, presión y otras propiedades termodinámicas [34].

La tecnología de lecho fluidizado parece ser la tecnología con mayor potencial en la pirólisis rápida de biomasa para la producción de bioaceite, ya que ofrece una alta velocidad de calentamiento, una rápida desvolatilización, un control sencillo, una conveniente recolección de carbón, un bajo costo, entre otros [34], y es en este punto en el que toca detenerse a analizar estas consideraciones que juegan un papel importante, determinar según la aplicación y la escala del proyecto si es o no conveniente y suficiente la implementación de un sistema de condensación de una sola etapa o si por el contrario hay una necesidad de implementar un sistema fraccionado mediante el uso de varias etapas de condensación, es decir el uso de más de un intercambiador de calor, teniendo en cuenta siempre el objetivo de mejorar la calidad del bioaceite.

La condensación de estos gases depende de un intercambiador de calor, por lo que es importante partir de los principios de transferencia de calor para determinar el tipo y geometría a aplicar, en la mayoría de los estudios, la condensación fraccionada se logró mediante el uso de unidades de condensación de etapas múltiples, que requieren más espacio y mayor inversión económica y por consiguiente un mayor costo de funcionamiento [34], y se ha determinado que la implementación de un intercambiador de calor de tubos y coraza suele ser la opción más comúnmente usada en aplicaciones de este tipo.

Figura 5.

Intercambiador de calor de tubos y coraza.



Nota. En la imagen se muestra el diseño básico de un intercambiador de calor de tubos y coraza, en el que se identifican sus diferentes componentes, como el haz de tubos, coraza, deflectores, cabezales y evidencia la entrada y salida de cada uno de los dos flujos que participan en la transferencia de calor. Tomado de H. Fernandez, ¿Qué tipo de máquinas se utilizan para la pirólisis de plásticos?, 2020. [En línea], disponible en <https://es.quora.com/Qu%C3%A9-tipo-de-maquinas-se-utilizan-para-la-pirólisis-de-plásticos>

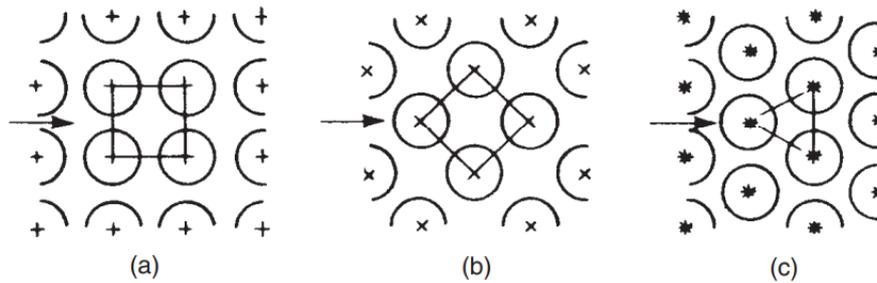
Un intercambiador de calor de tubos y coraza es un dispositivo en el que circulan dos fluidos, uno por el lado de los tubos y otro por el lado de la carcasa, a diferentes condiciones de temperatura, intercambian calor a través de las paredes de los tubos, sin contacto directo entre ellos. Para iniciar la fase de diseño se requiere hacer uso de los principios de transferencia de calor, termodinámica y mecánica de fluidos.

Los tubos que comprenden el haz de tubos están dispuestos de acuerdo con patrones específicos. Los más comunes son el cuadrado (90°), el cuadrado girado (45°) y el triángulo

equilátero (30°). Las disposiciones cuadradas y cuadradas giradas permiten la limpieza mecánica del exterior de los tubos. La distancia de centro a centro entre los tubos se llama paso de tubo. La distancia mínima entre tubos adyacentes es el espacio libre, todo lo anteriormente mencionado está expuesto en la figura 6 [38].

Figura 6.

Disposición y diseño de tubos de uso común



Nota. En la imagen se muestran las diferentes configuraciones comúnmente disponibles para la distribución del haz de tubos de un intercambiador de calor de tubos y coraza, (a) paso cuadrado (90°); (b) paso cuadrado girado (45°); y (c) paso triangular (30°). Tomado de R. Serth. Process Heat Transfer Principles and applications, cap 3.3 Shell-and-Tube Equipment. 2007.

El haz de tubos generalmente está soportado contra la flexión y las vibraciones mediante deflectores segmentados. El corte del deflector es la relación entre la altura del segmento recortado y el diámetro interior (ID) de la carcasa. Por lo tanto, un deflector segmentado con un corte del 25 % es aquel en el que la altura del segmento cortado es un cuarto del DI de la carcasa. Los deflectores también cumplen la función de dirigir el flujo del fluido del lado de la carcasa a través del haz de tubos, mejorando así la tasa de transferencia de calor [38].

La fuerza motriz para la transferencia de calor es la diferencia de temperatura entre las corrientes fría y caliente, se parte de la fórmula inicial de Transferencia de calor.

Ecuación 1.

Coficiente global de transferencia de calor

$$Q = UA_s \Delta T_m$$

Donde:

Q = Transferencia de calor por unidad de tiempo, W

U = Coeficiente global de transferencia de calor, $W/m^2 \text{ } ^\circ C$

A_s = Área de transferencia de calor, m^2

ΔT_m = Diferencia de temperatura media, $^{\circ}C$

Se hace uso de la ecuación 3 de la Diferencia de temperatura media logarítmica con el fin de encontrar parámetros como el área de superficie de los tubos de refrigeración y la longitud.

Ecuación 3.

Diferencia de temperatura media logarítmica

$$LMTD = \frac{(t_{h1} - t_{c2}) - (t_{h2} - t_{c1})}{\log \log \frac{t_{h1} - t_{c2}}{t_{h2} - t_{c1}}}$$

Ahora, usando la ecuación 1, el área de superficie de transferencia de calor requerida del tubo del condensador se calcula mediante la siguiente ecuación 4.

Ecuación 4.

Área de superficie de transferencia de calor

$$A_s = \frac{Q}{U LMTD}$$

Dado que la longitud de la carcasa del condensador está restringida y el diámetro del tubo de agua de refrigeración se selecciona del catálogo del fabricante. Luego, el área de superficie de un tubo que tiene una longitud equivalente a la longitud del condensador se calcula mediante la ecuación 5

Ecuación 5.

Área de la superficie de un intercambiador de calor

$$A_t = \pi d L$$

Donde:

d = Diámetro del tubo

L = longitud del tubo como longitud de la carcasa del condensador.

Ahora, el número de tubos de agua de enfriamiento requeridos, 'n', viene dado por la ecuación 6.

Ecuación 6.

Número de tubos requeridos

$$n = \frac{A_s}{A_t}$$

Donde:

A_s = Área de superficie total requerida para un tubo de diámetro seleccionada

A_t = Área de superficie de un solo tubo equivalente a la longitud de la carcasa del condensador.

Para mejorar la transferencia de calor y la máxima recuperación de bioaceite, las placas deflectoras se colocan en un condensador de carcasa y tubos para guiar la dirección del flujo de vapor, generando turbulencia [34], el flujo turbulento aumenta la tasa de transferencia de calor del intercambiador de calor y también reduce la probabilidad de que se acumulen sólidos disueltos en las paredes del tubo y la coraza [35], esto ayuda a una mayor duración del flujo de vapor y un mejor enfriamiento [34], se estima que están sean ubicados de forma intercalada, en cada extremo del haz de tubos al interior de la coraza, y que tengan un recorte del 25% de la sección transversal del diámetro interno de la coraza.

3.1.1 Restricciones y limitaciones

Un aspecto que ha sido evidente a lo largo del desarrollo de este documento es el hecho de que la mayor parte de documentos y trabajos investigativos se enfocan en las formas de pirólisis de biomasa y buscan estrategias de mejora especialmente en el método operacional y en el diseño del reactor, así como la implementación de diferentes tipos de reactores, pero por otro lado el estudio del sistema de condensación de pirólisis de biomasa ha sido considerablemente limitado.

Las incrustaciones son un aspecto a tener en consideración durante el cálculo y diseño de un sistema de condensación o cualquier intercambiador de calor en general, claramente más en una aplicación de un proceso de pirólisis debido a la naturaleza de un fluido como el bioaceite, que es corrosivo [34], como se muestra en la figura 7, las incrustaciones son el ensuciamiento y formación de depósitos de material no deseado en las superficies de transferencia de calor durante el proceso de calentamiento y enfriamiento [36], y es que con el funcionamiento continuo de la unidad de pirólisis, y la producción de bioaceite se pueden presentar

deposiciones de alquitrán en la superficie de los tubos y los deflectores, por lo que la transferencia de calor efectiva a través del condensador disminuye [34].

Estas incrustaciones se pueden presentar por algunos factores claves, por variables que contribuyen al ensuciamiento, como el pH del agua, las diferentes viscosidades del producto, la rugosidad de las superficies de los componente [36], la falta de mantenimiento que es un aspecto que se abordará más adelante. Todo esto se expresa como factor de ensuciamiento y tiene repercusiones en la efectiva operación y funcionamiento de un proceso, como el de pirólisis, al degradar la transferencia de calor, afectar la resistencia al flujo y posibles caídas de presión.

Figura 7.

Incrustaciones presentes en la superficie de los tubos de un intercambiador de calor



Nota. En la imagen se muestra evidencia la presencia de incrustaciones en la superficie del haz de tubos de un intercambiador de calor de tubos y coraza, esta corresponde a la acumulación de fluidos y elementos procesados por el intercambiador de calor. Tomado de Csi Designs, “Fouling in Heat Exchangers”. 2021. [En línea], disponible en <https://www.csidesigns.com/blog/articles/fouling-in-heat-exchangers#:~:text=Incrustation%3A%20the%20accumulation%20of%20a,surface%20of%20heat%20exchanger%20parts.>

Las incrustaciones estarán presentes de una forma u otra, lo que se puede hacer es prever que se presentaran y de esa forma generar un diseño que permita un fácil desmontaje y acceso a las piezas y componentes del sistema de condensación, para así hacer más fácil el mantenimiento;

otras estrategias o factores útiles que pueden disminuir la presencia de este fenómeno son las velocidades de los flujos [36] de los fluidos de ser posible y haciéndolo con cuidado, ya que si esta se eleva la tensión de corte del fluido lo hará también, provocando que haya mayor eliminación de depósitos durante el propio flujo del fluido, los cambios químicos o de fase de los fluidos también puede significar en la formaciones de capas de suciedad en las superficies del intercambiador de calor, y por último pero ciertamente no menos importante, se debe considerar los materiales de construcción del intercambiador de calor, si se seleccionan aleaciones y aceros inoxidable resistentes a la corrosión se evitará en gran medida el daño que estas incrustaciones pueden generar a la estructura de los componentes de los intercambiadoras de calor.

3.1.2 Condiciones de operación

Generalmente la pirolisis rápida es el proceso usado si se tiene como objetivo la producción de mayor volumen de producto líquido y no la producción del gas de pirolisis o negro de humo, sin embargo, hay algunas limitaciones como la pobre estabilidad térmica del proceso [37].

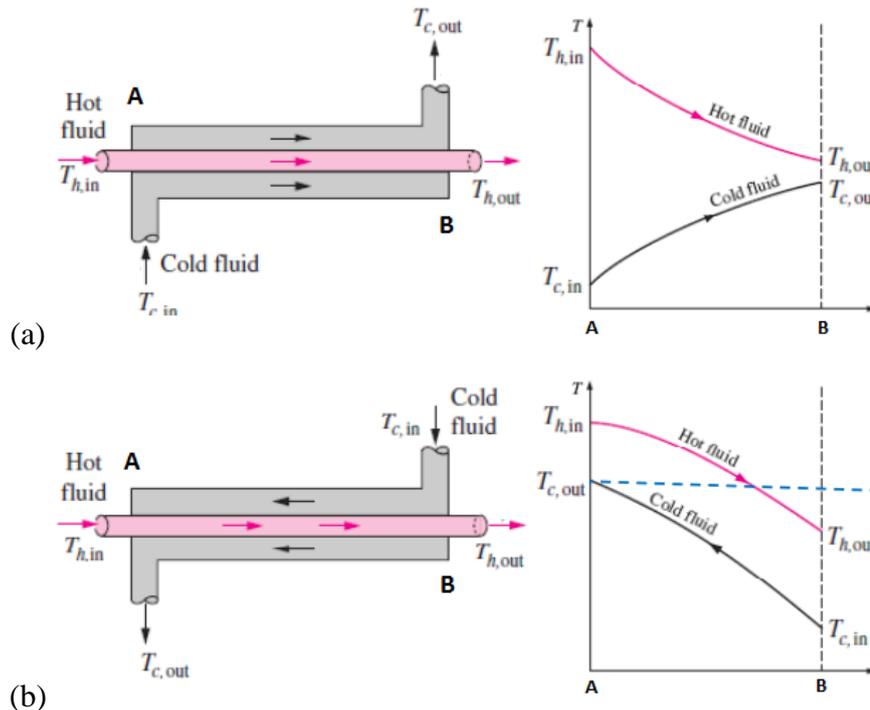
Un factor de operación y de diseño importante es el paso que pueden hacer los fluidos, puede ser tanto el fluido del lado de los tubos como el fluido del lado de la coraza o ambos. En el lado de los tubos, los pasos múltiples se logran mediante tubos en U o mediante la partición de los cabezales. El número de pasos por el lado de los tubos suele ser uno, dos, cuatro o seis, pero puede llegar incluso a 16. Las pasadas múltiples por el lado de la coraza se logran dividiendo la carcasa con un deflector longitudinal o conectando dos o más carcasas de un solo paso juntas. El número de pasadas por el lado de la coraza suele oscilar entre uno y seis. [38].

Los fluidos generalmente fluyen a través del intercambiador de calor en direcciones opuestas, como se muestra en la figura 8, parte (b), tal patrón de flujo se llama flujo a contracorriente. En un diseño de flujo en paralelo la temperatura de salida del fluido frío, $T_c out$ es menor que la temperatura de salida del fluido caliente $Th out$, por lo tanto, la transferencia de calor está restringida por la temperatura de salida del fluido frío, $T_c out$. En un diseño de flujo a contracorriente por otro lado la temperatura de salida del fluido frío, $T_c out$ generalmente excede la temperatura de salida del fluido caliente, $Th out$, es decir que en este diseño la transferencia de calor está restringida por la temperatura de entrada del flujo frío $T_c in$ [38].

Por lo tanto, para lograr una mayor recuperación de calor, se prefiere un diseño de flujo a contracorriente.

Figura 8.

Perfiles de temperatura de intercambiadores de calor con flujo en paralelo y contracorriente



Nota: La siguiente figura muestra los esquemas de los intercambiadores de calor y los perfiles de temperatura para los diseños de flujo en paralelo (a) y en contracorriente (b). Tomado de Csi Designs, “Fouling in Heat Exchangers”. 2021. [En línea], disponible en <https://www.csidesigns.com/blog/articles/fouling-in-heat-exchangers#:~:text=Incrustation%3A%20the%20accumulation%20of%20a,surface%20of%20heat%20exchanger%20parts>

Hay aplicaciones particulares en las que un flujo en paralelo es la mejor opción, estas suelen ser cuando se desea que la temperatura resultante de ambos fluidos sea similar, o si se requiere que la temperatura del fluido frío o refrigerante no exceda una temperatura en particular [39]. Para lograr una transferencia de calor más rápida, sin buscar una condición de equilibrio es también buena opción un flujo en paralelo, ya que la diferencia de temperaturas del fluido frío y el fluido caliente al entrar al intercambiador es muy amplia y dado que la tasa de transferencia de calor es directamente proporcional a la diferencia de temperatura, la tasa de transferencia de calor también será máxima aquí [39].

4. RESTAURACIÓN Y REACONDICIONAMIENTO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR PARA QUE TRABAJE COMO SISTEMA DE CONDENSACIÓN DE GAS DE PIRÓLISIS DE NEUMÁTICOS USADOS

4.1 Condiciones iniciales del intercambiador de calor

En el año 2002 los entonces estudiantes de Ingeniería Mecánica de la Universidad de América, Henry García Esquivel y Gonzalo Ospina Mantilla optaron por el desarrollo de un proyecto titulado “*DISEÑO CÁLCULO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DIDÁCTICO MEDIANTE UN INTERCAMBIADOR DE TIPO TUBO Y CORAZA PARA PRÁCTICAS E IMPLEMENTACIÓN DEL LABORATORIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA LA FUA*”, el cual dio como resultado todo un sistema físico de enfriamiento que contaba con varias piezas, entre ellas un intercambiador de calor, lastimosamente en la figura 9 no se evidencia a detalle.

El resultado de este proyecto realizado por los ingenieros Henry García Esquivel y Gonzalo Ospina Mantilla en el 2002 hasta hace unos pocos meses se encontraba en las instalaciones de la FUA, en el espacio de bienestar universitario, a la intemperie debido a las obras estructurales a las que está siendo sometido el Campus Universitario y estaba destinado como material de reciclaje.

Inicialmente este proyecto de grado tenía por título “*DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE CONDENSACIÓN DE PRODUCTOS LÍQUIDOS GENERADOS EN LA PIRÓLISIS DE LLANTAS USADAS A NIVEL DE LABORATORIO PARA LA FUA*”, y siempre se tuvo en consideración que para la construcción de este sistema de condensación se hiciera uso de materiales reciclados y chatarra, debido al enfoque de economía circular bajo el que opera el proyecto. Gracias a las recomendaciones del Ingeniero Claudio Moreno, quien tenía presente la existencia de este sistema de enfriamiento didáctico, se determinó que era pertinente y apropiado el uso del intercambiador de calor con el que contaba el sistema de enfriamiento, en la figura 10 se evidencian las condiciones en las que se encontraba.

Figura 9.

Estado del Sistema de Enfriamiento didáctico previo al desarrollo de este proyecto



Nota. Fotografía tomada en el año 2021 de las condiciones en las que se encontraba el sistema de enfriamiento en ese entonces.

Figura 10.

Condiciones en las que se encontraba el intercambiador de calor del sistema de enfriamiento didáctico



Nota. Fotografía tomada en el año 2022 de las condiciones en las que se encontraba el intercambiador de calor del sistema de enfriamiento didáctico.

Una vez se desmontó el intercambiador de calor del banco de trabajo en el que se encontraba, se logró inspeccionar más a fondo la verdadera condición de este artefacto, se desatornillaron

las tapas laterales para tener acceso a los tubos interiores del intercambiador de calor y se evidencio la presencia de óxido superficial e incrustaciones (Figura 12) al interior de los tubos y hasta corrosión importante en algunas zonas de la coraza.

Figura 11.

Condiciones en las que se encontraba el intercambiador de calor



Nota. Fotografía tomada en el año 2022 de las condiciones en las que se encontraba el intercambiador de calor del sistema de enfriamiento didáctico una vez se desmontó del banco y se retiraron las tapas laterales.

Figura 12.

Incrustaciones, óxido y corrosión presente en el haz de tubos y la coraza del intercambiador de aceite.



Nota. Fotografía tomada en el año 2022 que evidencian las incrustaciones, óxido, corrosión al interior de los tubos y en la superficie de los flanges de la coraza, adicionalmente se evidencia que los empaque que sellaban las tapas ya no están presentes.

En las tapas laterales del intercambiador de calor se aprecia una marca que indica lo que pudo ser el nivel de agua que se alcanzó a acumular al interior de los tubos durante los años que el sistema de enfriamiento estuvo fuera de funcionamiento.

Figura 13.

Condición en la que se encontraban las tapas laterales que cubren el haz de tubos



Nota. Fotografía de las tapas laterales del haz de tubos del intercambiador de calor.

Figura 14.

Haz de tubos del intercambiador de calor



Nota. Fotografía del haz de tubos del intercambiador de calor.

4.2 Limpieza y restauración del intercambiador de calor

Para iniciar el proceso de limpieza inicialmente se removieron los empaques existentes entre la coraza del intercambiador de calor y las tapas laterales que cubren los tubos internos, los mismos se encontraban cristalizados y en muy malas condiciones. Posterior a esto todas las piezas fueron limpiadas con gasolina debido a que los dos fluidos que se manejaron este sistema de enfriamiento eran aceites, tanto por la coraza como por los tubos.

Para remover el óxido y las incrustaciones fue necesario sumergir cada una de las piezas que componen al intercambiador de calor en vinagre, allí permanecieron por 24 horas aproximadamente, transcurrido ese tiempo se hizo uso de diferentes cepillos de acero, con el fin de remover de manera efectiva el óxido presentes en las superficies. Se hizo uso de diferentes tipos de elementos abrasivos que agilizaron la tarea para la remoción de pintura, particularmente en la coraza ya que el óxido que presentaba era muy superficial.

Figura 15.

Tapas laterales que cubren el haz de tubos y tornillos sumergidos en vinagre



Nota. Componentes y accesorios del intercambiador de calor sumergidos en vinagre.

La figura 16 evidencia a la perfección el resultado del uso del vinagre en las superficies afectadas por el óxido y la corrosión, ya que esta pieza se sumergió hasta la mitad únicamente y con el uso de un cepillo de acero por pocos minutos fue evidente la diferencia en la superficie que estuvo sumergida en vinagre (parte derecha de la imagen) respecto a la que no, sin duda un agente que facilitó ampliamente la tarea de limpieza. El vinagre funciona debido a un proceso de neutralización, ya que este contiene entre un 5%-8% de ácido acético, $\text{CH}_3\text{-COOH}$

con pH de 2.4 aproximadamente, que al reaccionar con óxidos como el FeOOH presentes en la superficie de elementos afectados produce una reacción química que forma una sal insoluble en agua con el óxido de hierro, de esa forma se “desmorona” este óxido, además el ácido oxida la capa superior del metal debajo del óxido para formar una capa de óxido que es resistente a la penetración del óxido [40].

Figura 16.

Resultado obtenido al sumergir la pieza en vinagre y



Nota. Comparación del resultado de haber sumergido la mitad de la pieza en vinagre por aproximadamente 24 horas.

Figura 17.

Limpieza del interior de los tubos



Nota. Limpieza del interior de los tubos del intercambiador de aceite, con la ayuda de un cepillo tipo churrusco de unos 40 cm de largo aproximadamente.

Finalmente, las tapas laterales del intercambiador de calor evidencian que no hay rastros de óxido, sin embargo, en la figura 34 se ven claramente las consecuencias de la corrosión, pues la superficie se encuentra “picada”, afortunadamente esta superficie no afecta el sellado hermético requerido, pues para eso se hizo uso de unos empaques de 90 mm de diámetro que coinciden perfectamente con la superficie que sobresale en las tapas laterales.

Figura 18.

Condición de las tapas que cubren los tubos una vez realizada la limpieza con vinagre



Nota. Fotografías que evidencian el estado en el que estaban las tapas laterales del intercambiador de calor.

Figura 19.

Consecuencias de la corrosión en algunas superficies del intercambiador de calor



Nota. Corrosion presente en la superficie de las tapas laterales del intercambiador de calor.

La corrosión es una reacción electroquímica que se da en una superficie por ejemplo de hierro, se forman dos regiones, anódica y catódica, en la primera se da el proceso de oxidación al perder electrones propios del metal, en la segunda región se da el proceso de reducción, es decir

la ganancia de electrones; para que este fenómeno se dé se requiere de la presencia de un electrolito como el agua, que provea iones reactantes para la formación de productos de corrosión, y que permita el flujo de electrones. La inestabilidad termodinámica del metal produce electrones que se transportan hasta la región catódica para la reacción de reducción para la formación de agua líquida, los elementos de la oxidación en el ánodo se encuentran ahora en el electrolito como solución acuosa, estos iones de hierro reaccionan con el agua para la formación de la herrumbre, es decir ese exceso de material que se evidencia en la superficie del metal en la figura 34 [41].

Figura 20.

Coraza del intercambiador completamente limpia



Nota. La coraza del intercambiador se encuentra sin pintura y sin rastros de óxido, lista para aplicar capas de pintura.

Finalmente, para concluir la etapa de restauración se aplicó pintura en las superficies externas del intercambiador de calor para proteger el material del óxido y mejorar su apariencia.

Figura 21.

Tapas laterales del intercambiador pintadas



Nota. Tapas laterales del intercambiador de calor tras aplicar capas de pintura plateada.

4.3 Reacondicionamiento del intercambiador de calor

Hasta este punto el intercambiador de calor solo ha sido restaurado, y estaría en perfectas condiciones para satisfacer el proceso para el que fue diseñado hace 20 años, sin embargo, para la aplicación de pirólisis de neumáticos fuera de uso aun hace falta una serie de consideraciones y modificaciones que permitan que este intercambiador de calor de tubos y coraza trabaje como un condensador de gas pirolítico.

Una de las decisiones tomadas hasta este punto es que el flujo del fluido caliente circulará por la coraza del condensador, mientras que por el interior de los tubos circula en contracorriente el agua que actuará como fluido refrigerante, por esa razón se decide realizar un agujero en el centro de la coraza con el fin de que los gases condensados sean recolectados por ahí, en el taller de máquinas y herramientas de la Universidad de América se hizo uso de un taladro de banco con una broca anular de 1 pulgada para realizar el agujero.

Figura 22.

Broca de 1 Pulgada realizando un agujero en la coraza



Nota. Agujero realizado en el taller de máquinas y herramientas de la Universidad de América.

Una vez realizado el agujero fue evidente que se había cometido un error pues el agujero estaba justo en el extremo de uno de los deflectores al interior de la coraza (Figura 40) y a partir de este momento se determinó que debido a cuestiones de diseño no era apropiado realizar la purga del producto condensado por el lado de la coraza del intercambiador de calor, debido a que se tenía claro que la ubicación del condensador en toda la estructura del proceso de pirólisis sería de forma horizontal y en ese momento se encontraba en construcción la base en la que reposará el condensador de forma horizontal (Figura 43).

Figura 23.

Agujero de 1 pulgada de diámetro realizado



Nota. Imagen propia. Agujero realizado en el extremo inferior de la coraza hizo contacto con uno de los deflectores al interior de esta.

Por tal razón se determinó apropiado taponar el agujero que se había realizado, el tapón se hizo en uno de los tornos con los que cuenta la Universidad de América en las instalaciones del taller de máquinas y herramientas, se mecaniza y se soldó para evitar que exista la presencia de fugas en un futuro.

Adicionalmente con la consideración de que el flujo de gas irá por el interior de los tubos del intercambiador de calor y no por la coraza, se realizó un agujero de purga en un extremo de una de las tapas que cubren los tubos, por el cual el condensado será recolectado en un recipiente, el agujero se realizó con una broca de 5/16" para que al interior del agujero repose una manguera del mismo diámetro como se muestra en la figura 42 la cual estará conectada en el otro extremo al tanque de condensado.

Figura 24.

Manguera de 5/16" al interior del agujero realizado en el extremo inferior de una de las tapas que cubre el haz de tubos



Nota. En la imagen se está comprobando que una manguera de 5/16" entre de manera justa en el agujero recién realizado en el extremo inferior de una de las tapas que cubre el haz de tubos del intercambiador de calor.

4.3.1 Construcción de la base del condensador

Como fue mencionado en el capítulo anterior, durante la etapa de planeación se determinó que el condensador del gas pirolítico resultante de la pirólisis de neumáticos usados estaría ubicado de forma horizontal, esto debido a que la base en la cual estaría montado todo el proceso de

pirólisis era muy baja y la distancia al piso del reactor de pirólisis y el hogar en el que este estaba soportado era de aproximadamente unos 45 cm, debido al diseño previsto y al comportamiento del gas se consideró más eficiente hacer provechoso uso de la gravedad para que el gas pirolítico y los productos que se condensaban antes del entrar al condensador alcanzaran a llegar a este de forma efectiva, por tal razón la tubería que sale del reactor de pirólisis y que llega al costado del condensador debería presentar algún nivel de inclinación y la base que sostendría el condensador tendría una altura máxima de 23 cm, lo que imposibilita la ubicación del condensador de forma vertical.

Una vez más considerando el enfoque de economía circular y ambiental del proyecto se hizo uso de unos perfiles de aluminio que habían sido desechados en la Universidad de América resultado de las recientes obras estructurales y remodelaciones que se estaban presentando en las instalaciones del campus, estos perfiles eran de 40 mm x 40 mm. Al momento del ensamble fue muy difícil lograr que la Soldadura de Arco funcionara para este perfil de aluminio, al no tener disponibilidad de otro tipo de soldadura o del electrodo apropiado para la aplicación se hizo uso de una remachadora que permitió el ensamble, como se evidencia en la figura 44.

Figura 25.

Ensamble de la base del condensador



Nota. Ensamble haciendo uso de un taladro y una remachadora

Finalmente se aplicó pintura negra a la estructura, la base del condensador ya se encontraba lista, el paso a seguir fue montarla en la base general en la que irían montados todos los elementos que componen el proceso de pirólisis de neumáticos usados, el cual también fue realizado con un perfil de acero reciclado y fue soldado y ensamblado en el taller de máquinas y herramientas de la Universidad de América.

Figura 26.

El condensador montado en su base



Nota. Soporte o base del condensador ya ensamblado junto con el condensador.

Figura 27.

Banco de prueba de pirólisis de neumáticos usados



Nota. El banco de pruebas de pirólisis de neumáticos usados con todos sus componentes listos y conectados, estos son el tanque de agua, la motobomba encargada de recircular el fluido refrigerante (Agua), el reactor de pirólisis, el lanzallamas diésel, y otros elementos de apoyo.

4.4 Pruebas

4.4.1 Pruebas preliminares

Antes de partir con las pruebas operacionales, es importante verificar la correcta operación y funcionamiento de los dispositivos que comprenden el proceso de pirólisis de neumáticos usados, verificar que los criterios de operación sean los apropiados, debido a que pueden ser indicadores de fallas imprevistas o aspectos a corregir que no habrían sido tenidos en cuenta hasta el momento de operación definitivo.

La primera prueba que se hizo fue comprobar que los aparatos como la motobomba eléctrica y el lanzallamas diésel funcionaran adecuadamente, este último estaba funcionando a la perfección, sin embargo la motobomba eléctrica no funcionaba, se escuchaba que el motor estaba funcionando pero no generaba ningún tipo de flujo, por lo que se purgo y en ese momento fue evidente que había rastros de óxido y unas pequeñas partículas de contaminantes en el eje impulsor del motor que impedían que este girara, para solucionarlo se procedió a limpiar el eje y se solucionó el problema, la motobomba eléctrica ya estaba funcionando.

Uno de estos aspectos, y es muy importante en el condensador de gas de pirólisis es verificar la hermeticidad del intercambiador de calor, ya que este fue diseñado de manera que el haz de tubos puede ser removido del interior de la coraza, con fines de mantenimiento como también con el fin de alternar el arreglo y la configuración de los tubos, es un problema que existan problemas de fugas debido a que implicaría la combinación y mezcla de ambos fluidos, arruinando la transferencia de calor y las muestras y propiedades de ambos fluidos.

Para comprobar la hermeticidad del condensador se hizo uso de la motobomba con la que se va a suministrar el fluido refrigerante, con el fin de evitar el desperdicio de agua, esta será recirculada de la salida de la coraza nuevamente al tanque de suministro de la motobomba, la cual tiene 0.5 HP y un caudal máximo Q_{max} de 28 L/min cuando la tubería es de 1", que no es el caso de la operación de este condensador, ya que desde motobomba se hizo una reducción de 1" a 3/4" con el fin de poder usar la manguera de jardín convencional por su conveniencia y posteriormente para conectar la manguera a la entrada y salida de la coraza fue necesario usar un racor de 3/4" a 1/2" debido a que la tubería de entrada del fluido a la coraza es de 1/2", tras

hacer el cálculo resulta ser que el caudal bajo el que está operando la motobomba corresponde a $Q_{max} = 16,39 \text{ L/min}$.

Una vez realizada la prueba de hermeticidad fue evidente que se estaban presentando fugas importantes en los sellos térmicos que separan el haz de tubos y la coraza de ambos extremos, como se evidencia en la figura 47.

Para solucionar estas fugas fue necesario hacer uso de masilla epóxica, con la cual se rellenó la unión de los extremos en donde se encuentran el haz de tubos y la coraza, se hizo nuevamente la prueba y se confirmó que no había presencia de fugas.

Figura 28.

Fugas de agua presentes en cada extremo de la unión entre la coraza y el haz de tubos



Nota. Fugas de agua presentes en el sistema de refrigeración al realizar pruebas de hermeticidad.

4.4.2 Pruebas operacionales

Sin ningún otro aspecto preliminar a revisar o corregir se procedió a realizar la primera prueba piloto en la que se haría uso del condensador de gas de pirólisis, sin embargo se presentó una falla pronta, debido a la alta temperatura a la que estaba saliendo el gas de pirólisis del interior del reactor la manguera encargada de transportar y direccionar los gases de pirólisis hasta el interior de condensador se derritió y rompió, lo que generó una fuga de todo este gas de pirólisis como se evidencia en la figura 48.

Figura 29.

Fuga de gas de pirólisis a la salida del reactor



Nota. Debido a las altas temperaturas del gas de pirólisis la manguera que se encontraba a la salida del reactor se derritió generando una fuga de todo el producto.

4.4.2.a Primera prueba concluida. Nuevamente se inicia otra prueba, esta vez con una manguera reforzada a la que tocaba refrigerar con agua durante la prueba para que no se derritiera, lo que afectó sin duda la naturaleza de las muestras de datos presentados en la tabla 2.

Tabla 2.

Datos tomados durante la 1er prueba concluida

Tiempo transcurrido [Min]	Temperatura reactor [°C]	Nivel condensado [ML]
0	22	0
5	210	0
10	280	35
15	370	75
20	395	120
25	415	155
30	420	180
35	418	205
40	400	220
45	410	260

Nota. Datos obtenidos cada 5 minutos, en el transcurso de la prueba.

La prueba tuvo lugar en las instalaciones del Bienestar Universitario en la Universidad de América, algunos aspectos claves de esta prueba piloto fue que el flujo de refrigerante, agua, al interior de la coraza fue en flujo paralelo con la dirección del gas de pirólisis que circulaba por el interior de los tubos.

Una vez concluida la prueba se determinó lo expuesto en la tabla 3

Tabla 3.

Parámetros finales obtenidos de la 1er prueba concluida

Parámetros finales	Valor
Producto sólido, negro de humo [gr]	459.10
Aceite de pirólisis [ml]	260
Fracción gas de pirólisis, [% volumen]	30,82
Fracción negro de humo [% volumen]	42,35
Fracción Aceite de pirólisis [% volumen]	21,83
Fugas, pérdidas [% volumen]	5
Tiempo total de la prueba [min]	45
Consumo de Diesel [L]	2,3

Nota. Resultados y parámetros obtenidos al finalizar la prueba.

Figura 30.

Primera prueba de pirolisis de neumáticos usados concluida



Nota. Planta de pirolisis de neumáticos usados concluida.

Figura 31.

Muestras de productos resultantes de la primer prueba concluida de pirólisis



Nota. En las fotografías se evidencia la producción de producto líquido o líquido de pirólisis, y 459,10 gr de negro de humo.

4.4.2.b Segunda prueba concluida. En esta oportunidad se realizan algunas modificaciones con el fin de lograr un proceso mucho más controlado y efectivo, en vista de que la manguera era un limitante se decidió optar por usar tubería galvanizada de 1/2" con el fin de controlar de mejor manera la temperatura del proceso, esta tubería se aprovechó pues era chatarra próxima a ser descartada, en la figura 51 se evidencia el uso de esta en el proceso de pirólisis.

En esta oportunidad el flujo del agua que actúa como fluido refrigerante al interior de la coraza corre en contracorriente con contra el flujo de gas de pirólisis que fluye por los tubos, más adelante se profundizará en la implicación de esta configuración de los flujos.

Y por último otro cambio que se hizo fue el sellar el recipiente de llenado del gas condensado de la pirólisis, esto con el fin de que todos los gases no condensados fueran recirculados nuevamente para aportar energía al reactor, esto se evidencia en la figura 52.

Figura 32.

Reemplazo de mangueras por tuberías galvanizadas



Nota. En las fotografías se evidencia el reemplazo de mangueras por tubos galvanizados, estos van desde la salida del reactor hasta la entrada del condensador, y desde el condensador hasta la recirculación de los gases no condensables para alimentar la fase de calentamiento del reactor.

Figura 33.

Recirculación de los gases no condensables



Nota. Los gases de pirólisis no condensables son nuevamente aprovechados al ser recirculados para apoyar el proceso de calentamiento del reactor, sin embargo, la cantidad de energía aportada no es la suficiente para sustituir por completo la energía aportada por el lanzallamas Diesel.

Para esta prueba se introdujeron al interior del reactor 1891,9 gr de neumáticos cortados, como se muestra en la figura 53, una vez inició el proceso de pirólisis se tomaron lecturas cada 5 minutos de las diferentes temperaturas y el nivel de líquido condensado, estas lecturas se encuentran expuestas en la tabla 4.

Una vez concluida la prueba que duro 50 minutos los resultados fueron muy reconfortantes, al ver que se condenso una cantidad de 620 ml de aceite de pirólisis, más del doble de producto liquido obtenido en la primer prueba concluida y la producción de negro de humo también mejoro en una gran medida.

Figura 34.

Cortes de neumáticos usados siendo introducidos al interior del reactor de pirólisis



Nota. Cortes de neumáticos usado siendo introducidos al interior del reactor de pirólisis para iniciar la prueba de funcionamiento y operación.

Tabla 4.

Datos tomados durante la segunda prueba concluida

Tiempo [Min]	Temperatura reactor[°C]	Temperatura entrada condensador [°C]	Temperatura salida condensador [°C]	Temperatura refrigerante [°C]	Nivel condensado [ML]
0	0	0	0	15	0
5	280	42	28	19	30
10	310	58	35	23	95
15	395	195	27	28	190
20	360	138	23	24	285
25	400	194	27	29	370
30	400	186	25	32	520
35	400	86	25	32	590
40	380	64	23	33	610
45	390	53	29	34	615
50	400	52	35	34	620

Nota. Datos tomados en intervalos de 5 minutos durante el desarrollo de la segunda prueba.

Figura 35.

Muestras de productos obtenidos de la segunda prueba concluida



Nota. En las fotografías se evidencia la producción de producto líquido o líquido de pirólisis, y 757,69 gr de negro de humo.

5. CÁLCULO DE UN SISTEMA DE CONDENSACIÓN DE GAS DE PIRÓLISIS DE NEUMÁTICOS USADOS

En este capítulo se respalda con cálculos el uso del intercambiador de calor usado en el proceso de pirólisis de neumáticos usados con el fin de condensar el gas de pirólisis para la producción de bioaceite pirolítico.

5.1 Cálculos y consideraciones

Tabla 5.

Propiedades de los fluidos

Propiedades del fluido	Agua	Gas de pirolisis	
		Vapor	Liquido
C _p (J/kg-k)	4185,85	6,43e6	3200 [28]
μ (kg/m-s)	7,20e-4	8,45e-6	4e-3
k (W/m-k)	0,64	0,128[29]	0,39 [27]
ρ (kg/m ³)	1000	13,45	68,673
λ (Kj/kg)			15500
P _c (atm)			2199,39

Nota. Propiedades de los fluidos presentes en la operación del proceso de pirólisis de neumaticos usados.

Tabla 6.

Flujo masico y temperaturas de operación de Agua y gas de pirolisis

	Agua	Gas de pirolisis
m (kg/s)	0,27	0,027
T1 (°C)	15	194
T2 (°C)	20	60

Nota. Temperaturas de operación del agua y gas de pirolisis usados para la realización de los cálculos pertinentes.

Ecuación 7.

Balace de energía del agua

$$Q = mC_p\Delta T$$

$$Q = 0,27 \frac{kg}{s} * 4185,85 \frac{J}{kg \cdot K} * (20 \text{ } ^\circ\text{C} - 15 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$Q_{agua} = 5717,17 \frac{J}{s}$$

Donde:

Q = Flujo de calor del agua.

m = Flujo másico del agua.

Cp = Calor específico del agua.

Ecuación 8.

Calor específico del gas de pirólisis

$$Cp = \frac{Q_{\text{Agua}}}{m * \Delta T}$$

$$Cp = \left(\frac{5717,17 \frac{J}{s}}{0,027 \frac{kg}{s} * (194^{\circ}C - 60^{\circ}C)} \right) / 0,2389 * 1000$$

$$Cp = 6,43e^6 \frac{J}{kg^{\circ}C}$$

Donde:

Q = Flujo de calor del agua.

m = Flujo másico del gas de pirólisis.

Cp = Calor específico gas de pirólisis

Ecuación 9.

Factor de corrección F

$$R = \frac{Ta - Tb}{tb - ta}$$

$$R = \frac{15^{\circ}C - 20^{\circ}C}{60^{\circ}C - 194^{\circ}C}$$

$$R = 0,037$$

Donde:

Ta = Temperatura de entrada del fluido del lado de la coraza.

Tb = Temperatura de salida del fluido del lado de la coraza.

ta = Temperatura de entrada del fluido del lado de los tubos.

tb = Temperatura de salida del fluido del lado de los tubos.

$$P = \frac{tb - ta}{Ta - ta}$$

$$P = \frac{60^{\circ}\text{C} - 194^{\circ}\text{C}}{15^{\circ}\text{C} - 194^{\circ}\text{C}}$$

$$P = 0,75$$

Como la variable $R \neq 1$, entonces:

$$\alpha = \left(\frac{1 - RP}{1 - P}\right)^{1/N}$$

$$\alpha = \left(\frac{1 - 0,037 * 0,75}{1 - 0,75}\right)^{1/1}$$

$$\alpha = 3,87$$

Donde:

N = Numero de pasos por la coraza.

$$S = \frac{\alpha - 1}{\alpha - R}$$

$$S = \frac{3,87 - 1}{3,87 - 0,037}$$

$$S = 0,75$$

$$F = \frac{\sqrt{R^2 + 1} \ln\left(\frac{1 - S}{1 - RS}\right)}{(R - 1) \ln\left[\frac{2 - S(R + 1 - \sqrt{R^2 + 1})}{2 - S(R + 1 + \sqrt{R^2 + 1})}\right]}$$

$$F = 0,986$$

Factor de seguridad ≈ 0.99 , debido a que solo hay un paso de tubos al interior de la coraza.

Ecuación 10.

Diferencia de temperatura media logarítmica

$$LMTD = \frac{(t_a - T_b) - (t_b - T_a)}{\log \frac{t_a - T_b}{t_b - T_a}}$$

$$LMTD = \frac{(194^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}) - (60^{\circ}\text{C} - 15^{\circ}\text{C})}{\log \frac{194^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}}{60^{\circ}\text{C} - 15^{\circ}\text{C}}}$$

$$LMTD = 95,4^{\circ}\text{C}$$

Ecuación 11.

Área del haz de tubos

$$A = \pi * D * l$$

$$A = \pi * 7,94e^{-3} \text{ m} * 0,483 \text{ m}$$

$$A = 1,20 e^{-2} m^2$$

Donde:

D = Diámetro del tubo de cobre.

l = Largo de los tubos que componen el haz de tubos.

$$A = 1,20 e^{-2} m^2 * 21 \text{ tubos}$$

$$A_{\text{tubos}} = 0,25 m^2$$

Ecuación 12.

Coficiente global de transferencia de calor requerido

$$Q = UA_s LMTD$$

$$U = \frac{Q}{A_s F LMTD}$$

$$U = \frac{342,87 \frac{kJ}{min} * 0,0166 KW}{0,25 m^2 * 0,99 * 95,4 ^\circ C}$$

$$U = 240 \frac{W}{m^2 ^\circ C}$$

Donde:

U = Coeficiente global de transferencia de calor.

LMTD = Temperatura media logarítmica.

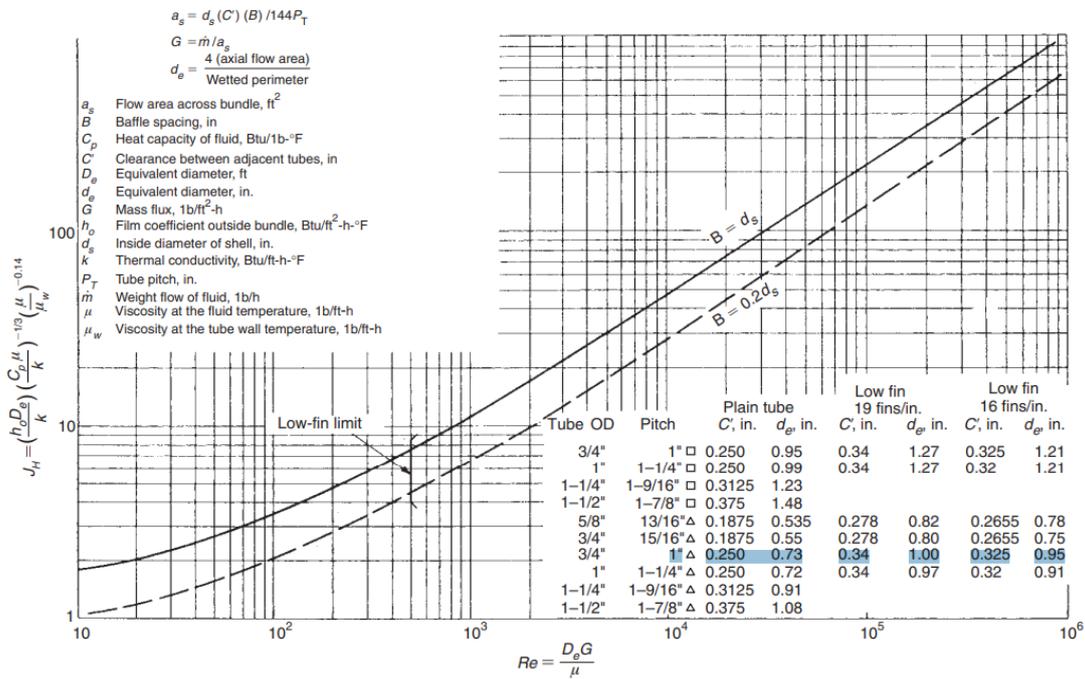
A_s = Área de transferencia de calor.

F = Factor de corrección.

Una vez se calcula el coeficiente global de transferencia de calor requerido para lograr la obtención del producto condensado, se procede a verificar y calcular el coeficiente global de transferencia de calor bajo el cual opera el sistema de condensación de la planta de pirolisis de neumaticos usados.

Figura 36.

Correlación para el coeficiente de transferencia de calor del lado de la carcasa



Nota. Tomado de R. Serth. Process Heat Transfer Principles and Applications. Elsevier. 2007 [PDF]

En la figura se determina el diámetro equivalente, d_e , y la holgura que debe haber entre los tubos adyacentes del haz de tubos del sistema de refrigeración, C' , se obtiene lo siguiente gracias a datos de entrada como el tipo de arreglo entre tubos y el paso.

$$C' = 0.25 \text{ in}$$

$$d_e = 0.95 \text{ in}$$

Ecuación 13.

Coefficiente de convección de la coraza

$$De = \frac{d_e}{39,37}$$

$$De = \frac{0.95}{39,37}$$

$$De = 2,41e^{-2} m$$

$$a_s = \frac{d_d C' B}{P_T}$$

$$a_s = \frac{6,631e^{-2} m * 6,35e^{-3} m * 0,099m}{9,92e^{-3} m}$$

$$a_s = 4,20^{-3} m^2$$

Donde,

d_d =Diámetro de la coraza.

B = Espaciado entre los deflectores.

P_T = Paso entre tubos, del haz de tubos.

C' = Holgura entre tubos en haz de tubos.

$$G = \frac{m}{a_s}$$

$$G = \frac{0,27 \frac{kg}{s}}{4,20e^{-3} m^2}$$

$$G = 65,01 \frac{kg}{s m^2}$$

Donde:

m = Flujo másico del fluido que va por la coraza, agua.

Ecuación 14.

Número de Reynolds para la coraza

$$Re = \frac{D_e G}{\mu}$$

$$Re = \frac{2,41e^{-2} m * 65,01 \frac{kg}{s m^2}}{7,20^{-4} \frac{kg}{m s}}$$

$$Re = 2178,2$$

Donde,

μ = Viscosidad dinámica del fluido.

Ecuación 15.

Cálculo del Factor Colburn modificado para la transferencia de calor del lado de la carcasa

$$j_H = 0.5(1 + B/d_s)(0.08Re^{0.6821} + 0.7Re^{0.1772})$$

$$j_H = 0.5 \left(1 + \frac{0,099m}{6,631e^{-2} m} \right) (0.08 * 2178,2^{0.6821} + 0.7 * 2178,2^{0.1772})$$

$$j_H = 22,28$$

Donde:

d_s =Diámetro interno de la coraza.

Ecuación 16.

Cálculo del coeficiente de trans. De calor para el flujo de la coraza

$$h_o = j_H \left(\frac{k}{De} \right) Pr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

$$h_o = 22,28 \left(\frac{0,64 \frac{W}{m K}}{2,41e^{-2} m} \right) 4,70^{\frac{1}{3}} \left(\frac{7,21e^{-4} \frac{kg}{m s}}{7,21e^{-4} \frac{kg}{m s}} \right)^{0.14}$$

$$h_o = 990,82 \frac{W}{m K}$$

Donde:

j_H =Factor Colburn modificado.

Ecuación 17.

Coficiente de convección de los tubos

$$G = \frac{m}{n_t \left(\frac{\pi}{4} \right) D_i^2}$$

$$G = \frac{0,027 \text{ kg/s}}{21 \text{ tubos} * \left(\frac{\pi}{4} \right) * (4,5^{-3} m)^2}$$

$$G = 83,10 \frac{kg}{s m^2}$$

Donde:

m = Flujo másico del fluido que va por los tubos.

n_t = Numero de tubos.

D_i = Diámetro interno de los tubos.

Ecuación 18.

Calculo del flujo de masa de vapor adimensional

$$j^* = xG/[D_{ig}\rho V (\rho_L - \rho V)]^{0.50}$$

$$j^* = 0.09 * 83,10 \frac{kg}{s m^2} / [4,50^{-3} * 9,80 \frac{m}{s^2} * 13,45 \frac{kg}{m^3} \left(17619,73 \frac{kg}{m^3} - 13,45 \frac{kg}{m^3} \right)]^{0.50}$$

$$j^* = 0.0731$$

Donde:

j^* =Flujo de masa de vapor adimensional.

x =Calidad del fluido.

G = Flujo másico total de vapor y líquido en toda la sección transversal del tubo.

Ecuación 19.

Número de Reynolds para las fracciones de líquido que fluyen solas al interior de los tubos

$$Re_L = D_i G_L / \mu_L$$

$$Re_L = \frac{4,5^{-3} m * 83,10 \frac{kg}{s m^2}}{4e^{-3} \frac{kg}{m s}}$$

$$Re_L = 85.9$$

Donde:

D_i = Diámetro interno de los tubos.

G_L = Flujo másico total de líquido en toda la sección transversal del tubo.

Ecuación 20.

Número de Reynolds para las fracciones de vapor que fluyen solas al interior de los tubos

$$Re_V = D_i G_V / \mu_V$$

$$Re_V = \frac{4,5^{-3} m * 0.09 * 83,10 \frac{kg}{s m^2}}{8.45e^{-3} \frac{kg}{m s}}$$

$$Re_V = 3982,95$$

Donde:

D_i = Diámetro interno de los tubos.

G_L = Flujo másico total de vapor en toda la sección transversal del tubo.

Ecuación 21.*Parámetro Lockhart-Martinelli para flujo turbulento en ambas fases*

$$X_{tt} = \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0.9} (\rho_V / \rho_L)^{0.5} (\mu_L / \mu_V)^{0.1}$$

$$X_{tt} = \left(\frac{1-0.09}{0.09} \right)^{0.9} (13,45 \frac{kg}{m^3} / 17619,73 \frac{kg}{m^3})^{0.5} (4e^{-3} \frac{kg}{m \cdot s} / 8.45e^{-3} \frac{kg}{m \cdot s})^{0.1}$$

$$X_{tt} = 0,41$$

Donde:

 X =Parámetro de correlación Lockhart–Martinelli x =Calidad del fluido.**Ecuación 22.***Correlación simple de Chisholm para la relación de deslizamiento*Para $X_{tt} > 1$

$$SR = (\rho_L / \rho_{hom})^{0.5}$$

$$SR = [17619,73 \frac{kg}{m^3} / \left(\frac{0,09}{13,45 \frac{kg}{m^3}} + \frac{1-0,09}{17619,73 \frac{kg}{m^3}} \right)^{-1}]^{0.5}$$

$$SR = 10,89$$

Donde:

 ρ_{hom} = Densidad bifásica homogénea.Para $X_t \leq 1$

$$SR = (\rho_L / \rho_V)^{0.25}$$

$$SR = (17619,73 \frac{kg}{m^3} / 13,45 \frac{kg}{m^3})^{0.25}$$

$$SR = 6,01$$

Se calcula con el valor de la correlación SR, la fracción del volumen total que ocupa la fase de vapor, mediante la Void Fraction, ϵ_V .

Ecuación 23.*Correlación SR mediante Void Fraction*

$$\varepsilon V = \frac{x}{x + SR(1 - x) \frac{\rho V}{\rho L}}$$

$$\varepsilon V = \frac{0.09}{0.09 + 6,01(1 - 0.09) \frac{13,45 \frac{kg}{m^3}}{7619,73 \frac{kg}{m^3}}}$$

$$\varepsilon V = 0.96$$

Tabla 7.*Criterios de Régimen de Flujo para Condensación en Tubos Horizontales*

Zone	Criterion
I	$j^* > 1.5$ and $X < 1.0$
II	$j^* < 0.5$ and $X < 1.0$
III	$j^* < 0.5$ and $X > 1.5$
IV	$j^* > 1.5$ and $X > 1.5$
Transition (I, II)	$0.5 \leq j^* \leq 1.5$ and $X < 1.0$
Transition (II, III)	$j^* < 0.5$ and $1.0 \leq X \leq 1.5$

Nota. Tomado de R. Serth. Process Heat Transfer_Principles and Applications. Elsevier. 2007.

El régimen del flujo según la tabla 7 corresponde a la zona II, considerando los valores de J^* y X_{tt} .

Ecuación 24.*Coefficiente de fracción vacía*

$$\Omega = 0.728 \varepsilon_v^{0.75}$$

$$\Omega = 0.728 * 0.96^{0.75}$$

$$\Omega = 0.7036$$

Para condiciones de flujo estratificado, la condensación se controla por gravedad y se puede usar un análisis tipo Nusselt para derivar una ecuación para el coeficiente de transferencia de calor.

Ecuación 25.

Derivación del coeficiente de transferencia de calor al interior de los tubos durante la condensación

$$h = 0.7036 \left[\frac{k^3 L \rho_L (\rho_L - \rho_V) g \lambda}{\mu_L (T_v - T_w) D_I} \right]^{1/4}$$

$$h = 0.7036 \left[\frac{0,39 \frac{W}{m K}^3 * 7619,73 \frac{kg}{m^3} \left(7619,73 \frac{kg}{m^3} - 13,45 \frac{kg}{m^3} \right) 9,8 \frac{m^2}{s} * 15500 \frac{kJ}{kg}}{4e^{-3} \frac{kg}{m s} (194^\circ C - 189^\circ C) * 4,5e^{-3} m} \right]^{1/4}$$

$$h = 9,34e^3 \frac{W}{m^2 K}$$

Donde:

Ecuación 26.

Coficiente global de transferencia de calor calculado

$$U = \left[\frac{D_o}{h_i D_i} + \frac{D_o * (\ln (D_o / D_i))}{2k} + \frac{1}{h_o} \right]^{-1}$$

$$U = \left[\frac{7,94e^{-3} m}{9344,82 \frac{W}{m^2 K} * 4,5e^{-3} m} + \frac{7,94e^{-3} m * (\ln (7,94e^{-3} m / 4,5e^{-3} m))}{2 * 83 \frac{W}{m K}} + \frac{1}{990,82 \frac{W}{m^2 K}} \right]^{-1}$$

$$Uc = 816,17 \frac{W}{m^2 K}$$

Ecuación 27.

Coficiente global de transferencia de calor calculado con incrustaciones.

$$Ud = \left[\frac{D_o}{h_i D_i} + \frac{D_o (\ln (D_o / D_i))}{2k} + \frac{1}{h_o} + \frac{RD_i D_o}{D_i} + RD_o \right]^{-1}$$

$$Ud = \left[\frac{1}{Uc} + \frac{1,76e^{-4} m^2 K / W * 7,94e^{-3} m}{4,5e^{-3} m} + 1,76e^{-4} m^2 K / W \right]^{-1}$$

$$Ud = 584,1 \frac{W}{m^2 K}$$

Donde:

$RD_i = RD_o =$ Factor de ensuciamiento.

$Uc =$ Coeficiente global de transferencia de calor calculado.

5.2 Análisis de resultados

El valor del coeficiente global de transferencia de calor calculado, aun considerando las incrustaciones, es mayor que el coeficiente global de transferencia de calor requerido, por lo que el diseño es funcional para la condensación de pirolisis de neumaticos usados, aunque esta sobredimensionado y sobreespecificado.

$$\frac{Ud}{Ureq} = \left[\frac{584,1 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}}{240,2 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}} \right]^{-1} = 143,20 \%$$

Adicionalmente el tiempo de residencia del agua es muy bajo, y el diseño podría mejorar pues se está recirculando el mismo fluido refrigerante en todo momento, por lo que este solo sube de temperatura, cada vez entra con una temperatura mayor al interior del intercambiador reduciendo su efectividad, es por eso que vemos en la toma de temperaturas que hay un punto en el que la curva de temperatura es más plana, reduciendo así la cantidad de gas condensado,

6. CONCLUSIONES

Las pruebas realizadas tuvieron finalmente un buen resultado, se logró el objetivo de adaptar un sistema de enfriamiento, diseñado con otros parámetros y para otra aplicación; se obtuvieron los tres productos principales generados por este proceso de pirolisis, en buenas cantidades todo ellos, adicionalmente gracias a que fue un proyecto en conjunto, debido a que paralelamente otros dos compañeros estaban realizando lo relacionado con el reactor de pirolisis, se presentaron oportunidades de profundizar otros conceptos de la pirolisis de neumaticos usados y de biomasa en general, como el recirculamiento de los gases no condensables o la producción de negro de humo; y no solo eso, el proyecto permitió el refuerzo de otras competencias de construcción y manejo de herramientas.

Se evidencio la posibilidad que existe de reaprovechar residuos de poco valor y que están generando un impacto ambiental importante, los neumaticos usados tienen el potencial de ser transformados en productos de valor y provecho, todo el trabajo investigativo que se realizó a lo largo de este documento permitió entender que hay muchos otros tipos de recursos y residuos por aprovechar, así como hay muchas otras estrategias y procesos de aprovechamiento.

El aceite producto de la condensación de gases de pirolisis cuenta con buen poder calorífico y es más denso y viscoso que otros combustibles, por lo que existe la posibilidad de refinar este producto y aprovecharlo al máximo como una fuente de combustible alternativo.

En Colombia aún existe una amplia ventana de desarrollo para el aprovechamiento de biomasa mediante el uso de procesos de conversión termoquímicos, la industria está enfocada más en el aprovechamiento mecánico por ahora.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. semana, “*En Colombia, cada año 950.000 llantas usadas van a parar a la basura,*” 2021 [En línea]. Disponible: <https://www.semana.com/economia/inversionistas/articulo/en-colombia-cada-ano-950000-llantas-usadas-van-a-parar-a-la-basura/202129/>
- [2] Alcaldía de Bogotá, “*¿Conoces el proceso para reciclar llantas usadas en Bogotá?*,” 2020 [En línea]. Disponible: <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/ambiente/control-la-disposicion-de-llantas-usadas-en-bogota>
- [3] J. D. Martinez, “*Pirólisis de neumáticos fuera de uso (NFU): Acercamiento a las oportunidades y los desafíos en Latinoamérica,*” p. 32, 2020 [En línea]. Disponible: <https://www.sltcaucho.org/revista-035?page=32>
- [4] Khanal, Samir K. Surampalli, Rao Y. Zhang, Tian C. Lamsal, Buddhi P. Tyagi, R. D. Kao, C. M. “*Bioenergy and Biofuel from Biowastes and Biomass - 1.1 Introduction*”. American Society of Civil Engineers .ASCE. 2010 [En línea] Disponible: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00AEHJ01/bioenergy-biofuel-from/bioenergy-biofuel-introduction>
- [5] A. Romero, “*Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles*”, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Complutense de Madrid. Madrid. 2010. [En línea] Disponible: <https://rac.es/ficheros/doc/00979.pdf>
- [6] Basu, Prabir. “*Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction - Practical Design and Theory (3rd Edition). 1.1 Biomass and its Products*”. Elsevier. 2018. [En línea] Disponible: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpBGPTPDT1/biomass-gasification/biomass-gasification>
- [7] Kim, Jin Kuk Saha, Prosenjit Thomas, Sabu Haponiuk, Józef T. Aswathi, M. K... “*Rubber Recycling - Challenges and Developments*” Cap. 5 Tire Composition, Tire Parts and End-of-Life Tires. Royal Society of Chemistry (RSC) 2019. [En línea] Disponible: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpRRCD0003/rubber-recycling-challenges/rubber-recycling-challenges>

- [8] B. Rodgers and W. Waddell, “14 - Tire Engineering”. Burlington: Academic Press, 2005, pp. 619–II [En línea] Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124647862500171>
- [9] P. T. Williams, “Pyrolysis of waste tyres: A review,” vol. 33, no. 8, pp. 1714–1728, doi: 10.1016/j.wasman.2013.05.003. 2013. [En línea] Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X13002122>
- [10] L. Kokko, “Greenhouse gas emissions from tyre production – case Nokian Tyre, mast”, Tampere University, Finlandia, 2017. [En línea] Disponible: <https://core.ac.uk/download/pdf/196556605.pdf>
- [11] U.S. Environmental Protection Agency. (1993). “Scrap Tire Technology and Markets - Recycling Alternatives”. William Andrew Publishing/Noyes. [En línea] Disponible: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt005TCRI8/scrap-tire-technology/recycling-alternatives>
- [12] T Sabu Rane, A Vasudeo Kanny, K Krishnan, V. Thomas, M George. “Recycling of Polyurethane Foams - 1.14.5 Applications of Waste Rubber”. Elsevier. 2018 [En línea] Disponible: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011PCTQ5/recycling-polyurethane/applications-waste-rubber>
- [13] Alcaldia de Bogota, “Asiste a la jornada de Llantatón en Engativá este miércoles 30 de marzo”, mar, 2022, [En línea] Disponible: <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/ambiente/cuando-es-la-proxima-jornada-de-recoleccion-de-llantas-en-bogota>
- [14] L.M Guevera, “Con Rueda Verde, Andi y empresas de la industria reciclarán 2,5 millones de llantas”, oct, 2017, [En línea] Disponible: <https://www.larepublica.co/responsabilidad-social/con-rueda-verde-andi-y-empresas-de-la-industria-reciclaran-2-5-millones-de-llantas-2558218>
- [15] Observatorio ambiental de Colombia, “Más de 2000 toneladas de llantas han sido aprovechadas en Bogotá durante 2021”, jul, 2021 [En línea] Disponible:

<https://oab.ambientebogota.gov.co/mas-de-2000-toneladas-de-llantas-han-sido-aprovechadas-en-bogota-durante-2021/#:~:text=M%C3%A1s%20de%202000%20toneladas%20de%20llantas%20han%20sido%20aprovechadas%20en%20Bogot%C3%A1%20durante%202021,-Publicado%3A%2030%20julio&text=La%20Secretar%C3%ADa%20de%20Ambiente%20es,que%20hay%20en%20la%20ciudad>

- [16] M.V Vega Dueñas, “*Iniciativas nacionales para el reciclaje de llantas usadas en colombia*”, tesis esp., Facultad de Educación Permanente Y Avanzada. Universidad de America, 2020, [En línea] Disponible: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7844/1/233203-2020-I-GA.pdf>
- [17] SLTC, “*Pirolisis de NFU Webinar #7*”, May, 2020. Acceso: 09, Nov, 2022. [En línea] Disponible: <https://www.youtube.com/watch?v=O-Y0y4OOBdo>
- [18] Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, “*Empresa procesadora de llantas usadas, hacía vertimientos inadecuados cerca a humedal en Mosquera*”, nov, 2019. [En línea] Disponible: <https://www.car.gov.co/saladeprensa/empresa-procesadora-de-llantas-usadas-hacia-vertimientos-inadecuados-cerca-a-humedal-en-mosquera>
- [19] Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, “*Decreto 3573 de 2011*”, art. 2, sep, 2011, [En línea] Disponible: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=64920>
- [20] Basu, Prabir. “*Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction - Practical Design and Theory (3rd Edition) - 5.1.1 Historical Background*”. Elsevier. 2018. . [En línea] Disponible: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00CYVHO1/biomass-gasification/biomass-ga-historical>
- [21] Basu, Prabir. “*Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction - Practical Design and Theory (3rd Edition) - 5.2 Pyrolysis*”. Elsevier. 2018. . [En línea] Disponible: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00CYVHP2/biomass-gasification/biomass-ga-pyrolysis-2>

- [22] You, Siming. “*Waste-to-Resource System Design for Low-Carbon Circular Economy - 3.3 Pyrolysis*”. Elsevier. 2022. [En línea] Disponible: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0131FJC3/waste-resource-system/pyrolysis>
- [23]. C. Wu et al., “*Conventional and microwave-assisted pyrolysis of biomass under different heating rates*” vol. 107, pp. 276–283, 2014, [En línea] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237014000710>
- [24] A. Khosravanipour Mostafazadeh, O. Solomatnikova, P. Drogui, R.D. Tyagi, “*A review of recent research and developments in fast pyrolysis and bio-oil upgrading, Biomass Conversion and Biorefinery*”. 2018 . [En línea] Disponible: <https://doi.org/10.1007/s13399-018-0320-z>
- [25] You, Siming. “*Waste-to-Resource System Design for Low-Carbon Circular Economy - 3.4 Gasification*”. Elsevier. 2022. [En línea] Disponible: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0131FJD1/waste-resource-system/gasification>
- [26] Basu, Prabir. “*Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction - Practical Design and Theory (3rd Edition) - 5.7.1 Production of Liquid Through Pyrolysis*”. Elsevier. 2018. [En línea] Disponible: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00CYVIII1/biomass-gasification/fixed-bed-pyrolyzer>
- [27] S. Seidelt, M. Müller-Hagedorn, and H. Bockhorn, “*Description of tire pyrolysis by thermal degradation behaviour of main components,*” vol. 75, no. 1, pp. 11–18, 2006, [En línea] Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237005000744>
- [28] X. Dai, X. Yin, C. Wu, W. Zhang, and Y. Chen, “*Pyrolysis of waste tires in a circulating fluidized-bed reactor*”, vol. 26, no. 4, pp. 385–399, 2001. [En línea] Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544201000032>
- [29] P. T. Williams and D. T. Taylor, “*Aromatization of tyre pyrolysis oil to yield polycyclic aromatic hydrocarbons,*” vol. 72, no. 11, pp. 1469–1474, 1993, [En línea] Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/001623619390002J>

- [30] Jeswani, H., Krüger, C., Russ, M., Horlacher, M., Antony, F., Hann, S., & Azapagic, A. “*Life cycle environmental impacts of chemical recycling via pyrolysis of mixed plastic waste in comparison with mechanical recycling and energy recovery*”. *Science of The Total Environment*, 769, 2021. [En línea] Disponible: doi:10.1016/j.scitotenv.2020.144
- [31] Coates, G.W., Getzler, Y.D.Y.L. “*Chemical recycling to monomer for an ideal, circular polymer economy*”. *Nat Rev Mater* 5, 501–516 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41578-020-0190-4>
- [32] M. Gear, J. Sathukhan, R. Thorpe, R. Clift, J. Seville, and M. Keast, “*A life cycle assessment data analysis toolkit for the design of novel processes – A case study for a thermal cracking process for mixed plastic waste,*” vol. 180, pp. 735–747, 2018, [En línea] Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618300155>
- [33] S. Papari and K. Hawboldt, “*A review on condensing system for biomass pyrolysis process,*” vol. 180, pp. 1–13, 2018, [En línea] Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382018310142>
- [34] Salvi, B.L., Soni, T., Jindal, S. *et al.* “*Design improvement and experimental study on shell and tube condenser for bio-oil recovery from fast pyrolysis of wheat straw biomass*”. *SN Appl. Sci.* 3, 173. 2021 [En línea] Disponible: <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04165-8>
- [35] Savree. “*Shell and tube type heat exchangers*” [En línea] Disponible: [https://savree.com/en/encyclopedia/shell-and-tube-type-heat-exchanger#:~:text=A%20shell%20and%20tube%20heat,as%20'tube%20stacks'\)](https://savree.com/en/encyclopedia/shell-and-tube-type-heat-exchanger#:~:text=A%20shell%20and%20tube%20heat,as%20'tube%20stacks'))
- [36] Csi Designs, “*Fouling in Heat Exchangers*”. 2021. [En línea] Disponible: <https://www.csidesigns.com/blog/articles/fouling-in-heat-exchangers#:~:text=Incrustation%3A%20the%20accumulation%20of%20a,surface%20of%20heat%20exchanger%20parts.>
- [37] Cornelissen T, Yperman Y, Reggers GS, Carleer R, “*Flash copyrolysis of biomass with polylactic acid. Part 1: influence on bio-oil yield and heating value*”. 2008, *Fuel Proc Technol* 87:1031–1041].

- [38] R. Serth. Process Heat Transfer Principles and applications, cap 3.3 Shell-and-Tube Equipment. 2007.
- [39] N. Sarang. “*Why is a counter flow heat exchanger better than a parallel flow heat exchanger?*” 2014 [En línea] Disponible: <https://www.quora.com/What-is-cross-flow-heat-exchanger>
- [40] Techie Scientist. “*Does Vinegar Remove Rust?*”. [En línea] Disponible: <https://techiescientist.com/does-vinegar-remove-rust/>
- [41] Ingeniería química desde cero!. “*El proceso de corrosión*”. Jul 2021. [Video en línea] Disponible: <https://www.youtube.com/watch?v=KG62VYtwD6g>

ANEXO 1

RECOMENDACIONES

Tras haber consultado diferentes fuentes bibliográficas y entender diferentes formas de abordar un proceso de pirolisis es claro que hay varias oportunidades de mejora en el proyecto, tanto de la parte del condensador como de la parte del reactor y el proceso en general. Es importante buscar una forma más eficiente y rentable de calentar el reactor, en este proyecto se hizo uso de un lanzallamas que funcionaba con diésel, consumía mucho combustible y era imposible controlar la intensidad de la llama, o el flujo del diésel al interior del reactor, por lo que el calentamiento no era el más apropiado ni la opción con menos impacto ambiental. El secado previo de los neumaticos y los cortes son un proceso muy tedioso, sin embargo, vale la pena, los cortes muy pequeños de neumaticos hacen que el proceso sea más eficiente en un panorama general. En el apartado del condensador un par de termómetros en los extremos habrían sido de gran ayuda, así como un sistema más sofisticado de recolección del líquido condensado, debido a que había perdidas considerables de gas y de líquido al no contar con un recipiente que no permitiera escapes y fugas del gas y el líquido.

Se pueden caracterizar todos los productos de la pirolisis, en un laboratorio, realizar un estudio cromatográfico para tener claras sus propiedades y que los cálculos sean más precisos.

Para solucionar las fugas que se mencionaron en el documento, presentes en el espacio entre la coraza y el haz de tubos, se debe remover la masilla epóxica usada para sellar este espacio, y se debe implementar algún otro sellante, como silicona de alta temperatura, que no permita fugas y el combinado de los diferentes fluidos, adicional a eso, al ser implementada esta solución se puede acceder al haz de tubos, con el fin de lograr su extracción para tareas de limpieza y de mantenimiento. Referente al tema del sellado, el haz de tubos cuenta en sus extremos con unos colectores, los cuales cuentan con unas muescas, las mismas están destinadas para el uso de empaques sellantes de anillo que permitirán tener control de fugas.

Con el fin de controlar la temperatura del liquido refrigerante es importante implementar un sistema de refrigeración, similar a un radiador que funcione con aire, que permita que este fluido sea enfriado una vez fluya por el interior de la coraza, con el fin de este a su vez ingrese con una menor temperatura en su próximo paso por la coraza del intercambiador, haciendo que el condensado del aceite pirolítico al interior del intercambiador de calor sea más eficiente.

