

## *Seguridad ocupacional en producción de combustible alternativo mediante pirólisis de neumáticos reciclados: técnicas innovadoras*

### *Occupational safety in alternative fuel production by pyrolysis of recycled tires: innovative techniques*

Jefferson Llumiquinga<sup>1</sup> , Diego Pichoasamín<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Universidad Central del Ecuador, jllumiquinga@uce.edu.ec, Quito, Ecuador

<sup>2</sup> Instituto Superior Tecnológico Rumiñahui, diego.pichoasmin@ister.edu.ec, Sangolquí, Ecuador

Autor para correspondencia: jllumiquinga@uce.edu.ec

#### RESUMEN

La pirólisis de neumáticos usados ha surgido como una opción prometedora ante la creciente necesidad de encontrar soluciones sostenibles para la gestión de residuos. El objetivo principal de este estudio es analizar la seguridad ocupacional de la producción de combustible alternativo mediante la pirólisis de neumáticos usados en una planta piloto en la parroquia Sangolquí-Ecuador. La metodología incluyó la revisión de literatura, la realización de análisis de riesgos y la propuesta de medidas de mitigación específicas para cada etapa del proceso de pirólisis. Los principales resultados destacan la identificación de riesgos clave, como la exposición a altas temperaturas, la presencia de productos químicos tóxicos y el manejo de materiales inflamables. Mediante las medidas de mitigación adecuadas, como el uso de equipos de protección personal, la capacitación del personal en seguridad ocupacional y la implementación de procedimientos de trabajo seguro, se puede garantizar un entorno laboral seguro y saludable. Este estudio subraya la importancia de priorizar la seguridad ocupacional en la industria de la pirólisis de neumáticos usados. Se recomienda la promoción de una cultura de seguridad y cumplimiento normativo en todas las etapas del proceso de pirólisis para garantizar la sostenibilidad a largo plazo de esta industria.

**Palabras clave:** Gestión de residuos, Seguridad ocupacional, Pirólisis, Combustible alternativo, Sostenibilidad

#### ABSTRACT

Pyrolysis of used tires has emerged as a promising option in the face of the growing need to find sustainable solutions for waste management. The main objective of this study is to analyze the occupational safety of alternative fuel production by pyrolysis of used tires in a pilot plant in the parish of Sangolquí - Ecuador. The methodology included literature review, risk analysis and proposal of specific mitigation measures for each stage of the pyrolysis process. The main results highlight the identification of key risks, such as exposure to high temperatures, presence of toxic chemicals and handling of flammable materials. Appropriate mitigation measures, as

the use of personal protection equipment, the occupational safety training of personnel, and the implementation of safe work procedures, can ensure a safe and healthy work environment. This study highlights the importance of prioritizing occupational safety in the waste tire pyrolysis industry. The promotion of a culture of safety and regulatory compliance at all stages of the pyrolysis process is recommended to ensure the long-term sustainability of this industry.

**Key words:** Waste management, Occupational safety, Pyrolysis, Alternative fuels, Sustainability

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el manejo adecuado de los residuos sólidos representa un desafío importante para la sociedad, especialmente en lo que respecta a la gestión de neumáticos usados. Los neumáticos desechados son una fuente significativa de contaminación ambiental y un problema de salud pública debido a su lenta degradación y los riesgos asociados con su eliminación inadecuada. Frente a esta problemática, la pirólisis de neumáticos usados ha surgido como una alternativa prometedora para convertir estos desechos en recursos valiosos, particularmente en la producción de combustible alternativo (Gamboa et al., 2020).

La disposición inapropiada de neumáticos usados puede conducir a la contaminación del suelo, el agua y el aire, así como a la proliferación de enfermedades asociadas con vectores. Además, su incineración directa de neumáticos puede generar emisiones nocivas y contribuir al cambio climático. En este contexto, la pirólisis de neumáticos usados emerge como una solución innovadora que puede mitigar estos problemas, al convertir los desechos en valiosos productos y subproductos (Chew et al., 2021).

En los últimos años, ha habido un creciente interés en el desarrollo y la implementación de tecnologías de pirólisis para el tratamiento de neumáticos usados en todo el mundo. Varios estudios han investigado aspectos técnicos, económicos y ambientales, destacando sus potenciales beneficios y desafíos asociados. Sin embargo, aún existe la necesidad de abordar aspectos específicos relacionados con la seguridad ocupacional y la mitigación de riesgos en el proceso de producción de combustible alternativo mediante la pirólisis de neumáticos usados, aspecto que este estudio busca abordar de manera integral.

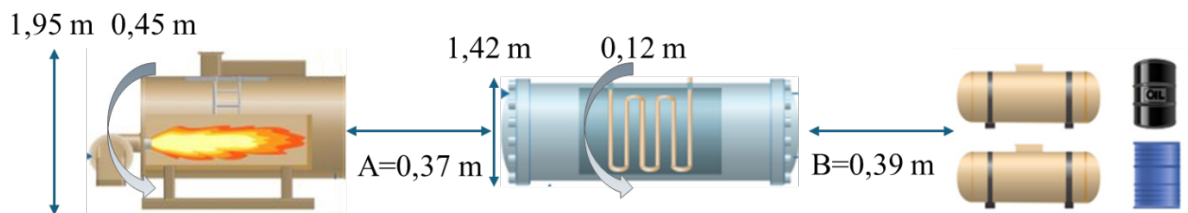
Este estudio reviste gran importancia en el ámbito de la seguridad ocupacional, dada la necesidad urgente de garantizar condiciones laborales seguras en la industria de la pirólisis de neumáticos usados. La manipulación de materiales inflamables, la exposición a altas temperaturas y la presencia de productos químicos tóxicos durante el proceso de producción de combustible alternativo representan riesgos significativos para la salud y la seguridad del personal involucrado. Por lo tanto, este estudio se justifica en su objetivo de identificar, analizar y mitigar los riesgos ocupacionales asociados con la pirólisis de neumáticos usados, con el fin de salvaguardar la integridad física y la salud de los trabajadores y promover un entorno laboral seguro y saludable.

En base a lo anteriormente fundamentado el objetivo principal de este estudio es analizar la seguridad ocupacional de la producción de combustible alternativo mediante la pirólisis de neumáticos usados, con el fin de contribuir al rollo de prácticas sostenibles en la gestión de residuos. Concretamente, se realiza un análisis del proceso de pirólisis de neumáticos usados, identificando sus principales etapas y productos obtenidos. Se evalúa los riesgos potenciales asociados con la producción de combustible alternativo mediante pirólisis y se proponen medidas de mitigación y protocolos de seguridad específicos para garantizar un entorno laboral seguro durante todo el proceso.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se desarrolló en la parroquia Sangolquí, cantón Rumiñahui perteneciente a la provincia de Pichincha, ciudad de Quito, Ecuador. Las coordenadas del sitio fueron  $0^{\circ} 22' 0.3''$  S;  $78^{\circ} 28' 11.4''$  O. La planta piloto presentó las siguientes características: el reactor tiene una forma cilíndrica rectangular con una altura de 1,95 m y un diámetro de 0,45 m, mientras que el condensador tiene una altura de 1,42 m, un diámetro equivalente de 0,12 m. a una distancia A de 0,37 m y una distancia B de 0,39 m (ver Figura 1).

**Figura 1.** Alturas, diámetros y distancias de los componentes de la planta piloto



Fuente: *Elaboración propia, 2024*

Para el estudio se utilizaron varios instrumentos para medir y analizar gases, y para evaluar el riesgo ocupacional durante la producción de combustible alternativo mediante pirólisis de neumáticos reciclados. El equipamiento incluyó un analizador de gases de combustión y sonda industrial, ambos de marca Testo y modelo T350, un tren isocinético y sonda de acero inoxidable, ambos de marca Clean Air Express y modelo Cateco Sampling Train. Es importante indicar que los equipos para las mediciones cuentan con su certificación de calibración.

El analizador de gases Testo T350 se usó para medir la composición de los gases generados en el proceso de pirólisis, y las mediciones se realizaron en la etapa de pirólisis y en las fases posteriores para monitorear las emisiones y garantizar la seguridad del entorno laboral. El Tren Isocinético y Sonda de Acero Inoxidable se emplearon para recolectar muestras de partículas y compuestos químicos presentes en el aire durante el proceso de pirólisis.

Para evaluar el riesgo ocupacional, se utilizó una combinación de datos de las mediciones de gases y partículas, junto con parámetros de seguridad ocupacional establecidos por normativas

y estándares internacionales. Se aplicó una metodología de análisis de riesgo que incluyó la identificación de fuentes de riesgo, la evaluación de la exposición de los trabajadores a gases y partículas, y la comparación con límites permisibles establecidos por organizaciones, como la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA, por sus siglas en inglés) y el Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH, por sus siglas en inglés).

Primeramente, se llevó a cabo un análisis de los procesos involucrados en la producción de combustible alternativo mediante pirólisis de neumáticos usados. Se examinó detalladamente cada etapa del proceso, desde la introducción de los neumáticos usados en el reactor de pirólisis hasta la gestión de los productos y subproductos resultantes. Para este análisis se consideraron diversos estándares y regulaciones para guiar y garantizar que se cumpliera con las buenas prácticas en materia de seguridad industrial. Para los estándares de la Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés), se consideraron las normas ISO 45001:2018 e ISO 14001:2015, mientras que para las Regulaciones y Directrices Nacionales, se consideraron la NIOSH, OSHA y la Legislación Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo.

Posteriormente, se identificaron los posibles riesgos ocupacionales asociados con cada etapa del proceso, incluyendo riesgos relacionados con la manipulación de materiales peligrosos, exposición a altas temperaturas, generación de gases y productos químicos y manejo de equipos y maquinaria, entre otros. Para evaluar y priorizar los riesgos ocupacionales, se utilizó la metodología de Análisis de Riesgos y Operabilidad (HAZOP).

El análisis HAZOP se basó en un enfoque sistemático y estructurado que involucró a un equipo de trabajo para identificar posibles desviaciones en un proceso y evaluar sus consecuencias. Se comenzó definiendo el alcance del análisis HAZOP, identificando las etapas clave del proceso de pirólisis que requerían evaluación; el equipo revisó diagramas de proceso, procedimientos operativos y otros documentos relevantes para comprender completamente el proceso. El método HAZOP utilizó palabras guía, como “más”, “menos”, “ninguno”, “inverso”, para identificar posibles desviaciones del proceso normal y posibles causas subyacentes.

Una vez identificadas las desviaciones y peligros asociados, se evaluó cada riesgo en función de su probabilidad de ocurrencia y su impacto potencial en la seguridad de los trabajadores; esta evaluación permitió priorizar los riesgos en función de su nivel de gravedad y urgencia para la mitigación. Finalmente, con base en la evaluación y priorización de riesgos, el método HAZOP propuso medidas de mitigación para abordar los riesgos identificados.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se identificaron los aspectos clave del proceso de pirólisis y la producción de negro de humo, materia prima para la elaboración de carbón activado como subproducto. El proceso de producción de combustible alternativo a partir de neumáticos usados mediante pirólisis se desarrolló en una planta especializada que siguió los pasos acorde a la Figura 2.

Figura 2. Diagrama de los datos



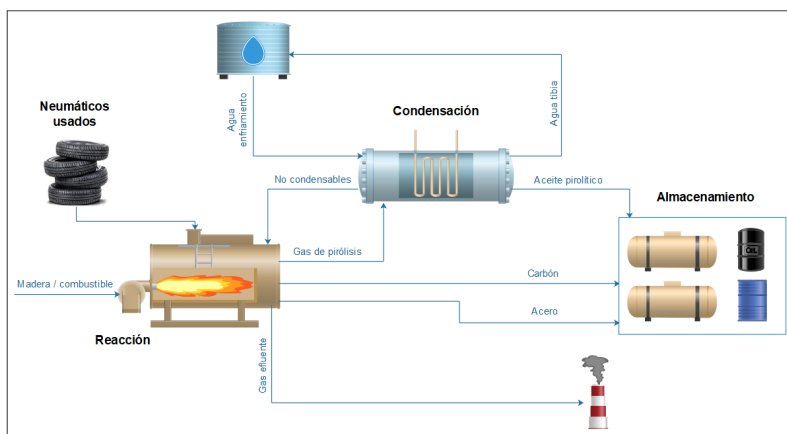
Fuente: Elaboración propia, 2024

En detalle, en el paso *a.) Pirólisis*, la introducción de neumáticos usados en el reactor de pirólisis, los cuales fueron sometidos a altas temperaturas, generando un gas de pirólisis como resultado de la reacción. *b.) Condensación del gas* de pirólisis, ocurre a través de un sistema de refrigeración. *c.) Recolección y recuperación del aceite* de pirólisis, se almacena en un tanque designado para su posterior uso como combustible alternativo. Los gases no condensables se dirigen a un sistema de recuperación para ser utilizados como combustible adicional para el calentamiento del reactor de pirólisis. Finalmente, *d.) Gestión de subproductos*, como el hollín, producido durante la pirólisis se emitió a través de una chimenea, mientras que el carbón y el alambre de acero resultantes, se almacenaron para su posible reutilización o disposición adecuada. Este proceso de transformación ofrece una solución innovadora para la gestión de neumáticos usados, convirtiéndolos en un recurso valioso y reduciendo así los desechos.

La planta de pirólisis se alimenta principalmente de tres tipos de entradas: neumáticos usados, madera/energía/combustible, y agua (ver Figura 3). Los neumáticos usados constituyen la materia prima principal para el proceso de pirólisis, mientras que la madera, la energía o el combustible se utilizan para alimentar el reactor y proporcionar el calor necesario para desencadenar la reacción de pirólisis. Se emplea agua como refrigerante en el condensador.

Por otro lado, la planta produce una variedad de salidas o productos resultantes del proceso de pirólisis. Entre estos está el aceite pirolítico, que se recolecta como un combustible alternativo aprovechable. Además, se obtiene carbón residual, que puede ser utilizado en diversas aplicaciones, como el carbón activado. El alambre de acero, otro subproducto, puede ser reciclado y utilizado en otras industrias, como acerías. Los gases no condensables, ricos en hidrocarburos, pueden ser empleados como combustible para diversas aplicaciones industriales, e incluso para calentar el propio reactor de pirólisis. Finalmente, el gas efluente, que se desprende del proceso, debe ser gestionado adecuadamente para minimizar su impacto ambiental (ver Figura 3).

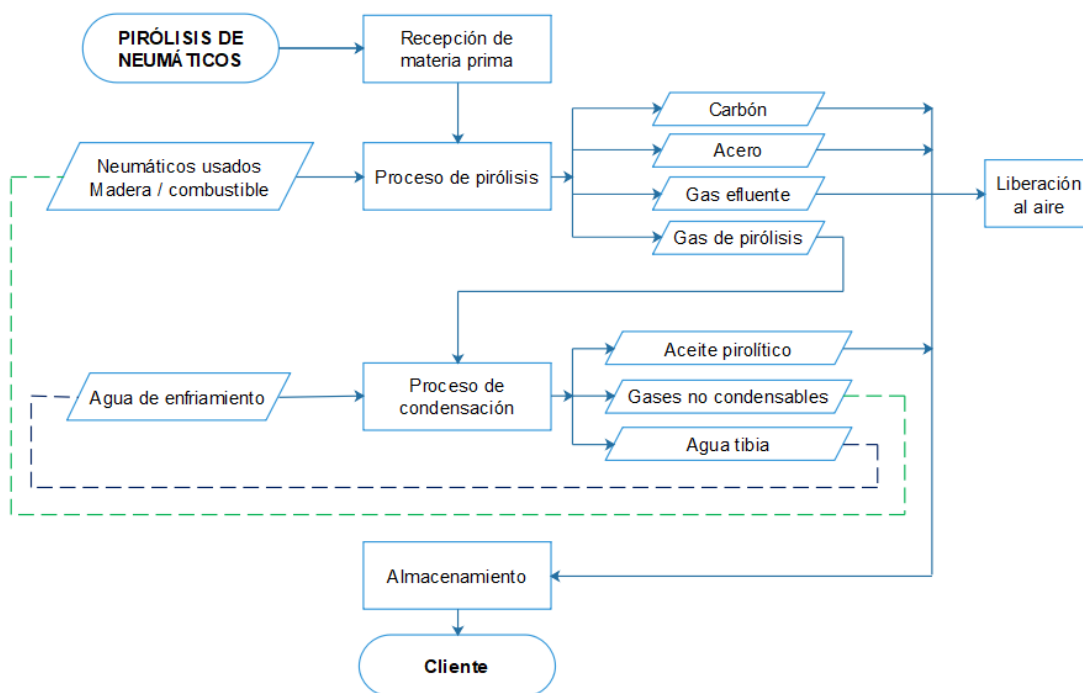
Figura 3. Proceso de producción de combustible alternativo



Fuente: Elaboración propia, 2024

En la Figura 4, se muestra un diagrama de flujo, de manera clara y comprensible el proceso de pirólisis.

Figura 4. Diagrama de flujo de proceso de producción de combustible alternativo



Fuente: Elaboración propia, 2024

Este diagrama representa los recursos necesarios para cada subproceso que abarca la transformación de neumáticos usados en productos y subproductos útiles. Además, identifica las entradas, como los neumáticos usados, madera/energía/combustible y agua, así como los productos finales, subproductos y residuos generados durante el proceso.

En este contexto, se puede maximizar el aprovechamiento de los productos generados en planta, particularmente, la producción de carbón activado mediante un método de activación química,

en cumplimiento con los requisitos establecidos en la normativa NTE INEN 1991.

El proceso de obtención de carbón activado mediante activación química implicó varias etapas clave y requirió el uso de ciertos materiales y maquinaria específica. Inicialmente, el carbón se sometió a un proceso de molienda para reducir su tamaño a una malla 20, lo que facilitó la absorción del ácido fosfórico durante la etapa de impregnación. A continuación, al carbón se le impregnó con una solución de ácido fosfórico al 85 %, dejándolo reposar por al menos 12 horas para garantizar una saturación adecuada. Posteriormente, se llevó a cabo un tratamiento térmico, en un horno a 550 °C, durante 1 hora, para activar el carbón.

El siguiente paso implicó el proceso de recuperación, donde el carbón se sumergió en una solución de ácido clorhídrico al 37 %, por 1 hora, a 30 °C; seguido de un período de agitación por 2 horas. Posteriormente, el carbón se lavó meticulosamente con agua potable para eliminar cualquier residuo de la solución. Finalmente, se secó en un horno a 105 °C, durante 1 hora, y se almacenó en tanques o costales plásticos en un entorno libre de humedad y agua.

En la Tabla 1 se presentan los potenciales riesgos y medidas de mitigación en el proceso de producción de combustible alternativo mediante pirólisis de neumáticos usados.

**Tabla 1.** Procesos, riesgos y medidas de mitigación en el proceso de producción de combustible alternativo

Etapa del proceso	Riesgos identificados	Medidas de mitigación
Combustión de neumáticos en el reactor de pirólisis	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exposición a altas temperaturas</li> <li>- Posible liberación de gases tóxicos durante la pirólisis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uso de equipos de protección personal (EPP) adecuados</li> <li>- Capacitación del personal en manejo seguro de neumáticos</li> <li>- Uso permanente de protección respiratoria</li> </ul>
Condensación del gas de pirólisis	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Riesgo de quemaduras por contacto con equipos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Análisis de Trabajo Seguro (ATS) antes de iniciar actividades</li> <li>- Permiso de trabajo para trabajos en caliente</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exposición a productos químicos durante la condensación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mantenimiento preventivo de equipos</li> <li>- Uso permanente de protección respiratoria</li> </ul>
Recolección del aceite de pirólisis	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Posible derrame de aceite</li> <li>- Riesgo de resbalones y caídas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uso de recipientes herméticos para el almacenamiento</li> <li>- Capacitación en manejo seguro de sustancias químicas</li> <li>- Uso permanente de protección respiratoria</li> </ul>
Gestión de subproductos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exposición al hollín durante la emisión por chimenea</li> <li>- Riesgo de lesiones por manipulación del carbón y acero</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementación de sistemas de control de emisiones</li> <li>- Entrenamiento en manipulación segura de subproductos</li> <li>- Uso permanente de protección respiratoria</li> </ul>

Fuente: *Elaboración propia, 2024*

Las medidas de mitigación propuestas están diseñadas para abordar los riesgos identificados en cada etapa del proceso de producción de combustible alternativo mediante la pirólisis de neumáticos usados. Estas medidas buscan garantizar un entorno de trabajo seguro y saludable para el personal involucrado, así como minimizar el impacto en el medioambiente.

En primer lugar, se prioriza la protección del personal mediante el uso de equipos de protección personal (EPP) adecuados. Todos los equipos de protección utilizados están certificados y homologados para actividades de alto riesgo, garantizando que cumplen con las normas internacionales y nacionales de seguridad industrial. Entre estos equipos se incluyen trajes ignífugos y guantes resistentes al calor, diseñados para reducir el riesgo de lesiones por exposición a altas temperaturas durante la manipulación de los neumáticos y otros materiales.

Además, la capacitación del personal en el manejo seguro de neumáticos y sustancias químicas es fundamental para prevenir accidentes y garantizar prácticas laborales seguras. Esto incluye la identificación y gestión adecuada de riesgos, así como el conocimiento de los procedimientos de emergencia.

En cuanto al mantenimiento preventivo de equipos y la implementación de procedimientos de trabajo seguro, estas medidas contribuyen a prevenir accidentes relacionados con el funcionamiento de la maquinaria y la exposición a productos químicos, reduciendo así la probabilidad de incidentes y lesiones. Por otro lado, el uso de recipientes herméticos para el almacenamiento de aceite de pirólisis y la implementación de sistemas de control de emisiones ayudan a prevenir la contaminación del entorno de trabajo y minimizar el impacto ambiental.

En la Tabla 2 se presentan los resultados del análisis de riesgos potenciales en el proceso de producción de combustible alternativo mediante pirólisis de neumáticos usados.

**Tabla 2.** Análisis de riesgos y priorización de medidas de mitigación

Etapa del proceso	Riesgos identificados	Medidas de mitigación
Combustión de neumáticos en el reactor de pirólisis	- Exposición a altas temperaturas	- Uso de equipos de protección personal (EPP) adecuados
	- Posible liberación de gases tóxicos durante la pirólisis	- Capacitación del personal en manejo seguro de neumáticos - Uso permanente de protección respiratoria
Condensación del gas de pirólisis	- Riesgo de quemaduras por contacto con equipos	- Análisis de Trabajo Seguro (ATS) antes de iniciar actividades - Permiso de trabajo para trabajos en caliente
	- Exposición a productos químicos durante la condensación	- Mantenimiento preventivo de equipos - Uso permanente de protección respiratoria



Etapa del proceso	Riesgos identificados	Medidas de mitigación
Recolección del aceite de pirólisis	- Posible derrame de aceite	- Uso de recipientes herméticos para el almacenamiento
	- Riesgo de resbalones y caídas	- Capacitación en manejo seguro de sustancias químicas - Uso permanente de protección respiratoria
Gestión de subproductos	- Exposición al hollín durante la emisión por chimenea	- Implementación de sistemas de control de emisiones
	- Riesgo de lesiones por manipulación del carbón y acero	- Entrenamiento en manipulación segura de subproductos
		- Uso permanente de protección respiratoria

Fuente: Elaboración propia, 2024

En la etapa de combustión de neumáticos en el reactor de pirólisis, el riesgo de exposición a altas temperaturas tiene una alta probabilidad y un alto impacto, dando como resultado un nivel de gravedad crítico y una prioridad de mitigación muy alta; esto sugiere que el contacto con superficies calientes u otras fuentes de calor intenso es una amenaza seria para la seguridad de los trabajadores. La mitigación requiere medidas inmediatas, como el uso de EPP resistentes al calor y la implementación de barreras térmicas para reducir la exposición.

En la misma etapa, se identificó el riesgo de liberación de gases tóxicos durante la pirólisis y, aunque la probabilidad es media, el impacto es alto, resultando en un nivel de gravedad mayor y una prioridad de mitigación alta. Esto implica que, aunque los gases tóxicos pueden no ser siempre liberados, cuando ocurre, el peligro para la salud es significativo. Para abordar este riesgo, se requiere la instalación de sistemas de extracción y ventilación adecuados, así como el uso de monitores de gases y mascarillas certificadas para los trabajadores.

De igual manera el riesgo de quemaduras por contacto con equipos en la etapa de condensación del gas de pirólisis presenta una probabilidad alta y un impacto medio, con un nivel de gravedad mayor y una prioridad de mitigación alta. Esto indica que el equipo utilizado en esta etapa puede ser peligroso si no se toman las precauciones adecuadas. Por ello, la mitigación implica medidas como señalización clara, uso de EPP, y procedimientos de trabajo seguros.

La mayoría de los riesgos identificados recaen en la categoría de nivel de gravedad moderada, con prioridad de mitigación media. Por ejemplo, el riesgo de exposición a productos químicos durante la condensación tiene baja probabilidad e impacto medio, pero aun así requiere atención para evitar complicaciones a largo plazo. También, se incluyen riesgos como posible derrame de aceite en la recolección, riesgo de resbalones y caídas, exposición al hollín en la gestión de subproductos y riesgo de lesiones por manipulación del carbón y acero.

Aunque estos riesgos tienen una probabilidad o impacto menor, requieren medidas de mitigación para evitar accidentes y garantizar la seguridad de los trabajadores. Se recomienda el uso de equipos de protección personal, señalización clara, y procedimientos de trabajo seguros para mitigar estos riesgos.

Finalmente, se propusieron medidas de seguridad y protocolos operativos específicos para garantizar un entorno laboral seguro en el transcurso de la producción y comercialización de combustible alternativo (ver Tabla 3). Estas medidas se basaron en los resultados del análisis de riesgos y las buenas prácticas en seguridad industrial.

**Tabla 3.** Medidas de seguridad y protocolo operativo en el proceso de producción de combustible alternativo

Medida de Seguridad / Protocolo Operativo	Descripción
Uso de equipos de protección personal (EPP)	Todos los trabajadores deberán usar EPP adecuado, incluyendo trajes ignífugos, guantes resistentes al calor y gafas de protección durante todas las etapas del proceso. Uso permanente de protección respiratoria.
Capacitación en seguridad ocupacional	Se proporcionará capacitación regular sobre seguridad ocupacional a todo el personal, incluyendo la identificación y gestión de riesgos, procedimientos de emergencia y uso seguro de equipos.
Implementación de procedimientos de trabajo seguro	Se establecerán y documentarán procedimientos de trabajo seguro para cada etapa del proceso, con énfasis en la manipulación segura de materiales y el uso adecuado de equipos. Antes de realizar actividades de alto riesgo, se requerirá un Análisis de Riesgo y un Permiso de Trabajo, especialmente para trabajos en caliente o con materiales peligrosos.
Inspecciones y mantenimiento preventivo de equipos	Se llevarán a cabo inspecciones periódicas de equipos y maquinaria, y se realizará mantenimiento preventivo de manera regular para garantizar su correcto funcionamiento y seguridad.
Monitoreo de emisiones y control ambiental	Se instalarán sistemas de monitoreo de emisiones y se establecerán controles ambientales para minimizar el impacto en el medioambiente y garantizar el cumplimiento de regulaciones.
Plan de respuesta a emergencias	Se desarrollará un plan detallado de respuesta a emergencias que incluya procedimientos para manejar situaciones como incendios, fugas químicas o accidentes laborales. El plan también debe incluir ejercicios de simulacros regulares para evaluar la eficacia de los procedimientos y asegurarse de que el personal esté preparado para responder adecuadamente a las emergencias.

Fuente: *Elaboración propia, 2024*

Estas medidas y protocolos se basaron en los resultados del análisis de riesgos, así como en las medidas de mitigación realizadas previamente. Su implementación integral posterior puede garantizar un entorno laboral seguro y la minimización de riesgos laborales en todas las etapas de producción y comercialización de combustible alternativo.

Numerosos estudios respaldan la viabilidad y eficacia de la pirólisis de neumáticos usados como una forma efectiva de gestionar residuos y aprovechar su valor potencial (Samolada & Zabaniotou, 2012) (Hoang et al., 2020). Por ejemplo, estudios han demostrado que el aceite pirolítico obtenido a partir de neumáticos reciclados puede ser utilizado como una fuente de combustible viable para la generación de electricidad en plantas de energía (Yaqoob, Teoh, Sher, et al., 2021) (Gamboa et al., 2020) (Toteva & Stanulov, 2020). Por tanto, este hallazgo sugiere que la pirólisis de neumáticos usados no solo contribuye a la gestión sostenible de residuos, sino que también

puede servir como una fuente alternativa de energía limpia y renovable.

Además, otras investigaciones han explorado las aplicaciones del carbón producido durante el proceso de pirólisis (Xia et al., 2017) (Pan et al., 2022), en las que han demostrado que el carbón derivado de neumático reciclado puede ser utilizado como un material de construcción sostenible (Abdulfattah et al., 2022). El carbón activado, en particular, ha demostrado ser efectivo en la purificación de agua, eliminando contaminantes y sustancias no deseadas (Rivera-Utrilla et al., 2011) (Bhatnagar et al., 2013) (Jjagwe et al., 2021), lo que lo convierte en una herramienta valiosa para abordar los desafíos de la calidad del agua en diversas comunidades.

A pesar de los beneficios potenciales asociados con la pirólisis de neumáticos usados, es importante tener en cuenta algunas limitaciones y desafíos. Por ejemplo, Chen et al. (2017), Ravindra et al. (2019) which will exert pressure on crop production and likely increase the agricultural crop residue. The present study estimates atmospheric emissions of various pollutants from crop residue burning using the Intergovernmental Panel on Climate Change guidelines. In India 488 Mt of total crop residue was generated during 2017, and about 24% of it was burnt in agricultural fields. This resulted in emissions of 824 Gg of Particulate Matter (PM<sub>2.5</sub>, Zhang et al. (2019) a comprehensive understanding of its function in the fragile earth environment is urgently needed. The study on the relationship between biochar properties and potential applications requires continuing research. This review provides new insights into the state-of-the-art accomplishments in the utilization of biochar in environmental management and covers three perspectives: firstly, mitigation of greenhouse gas (GHG señalan preocupaciones sobre posibles emisiones contaminantes durante el proceso de pirólisis y la necesidad de implementar medidas adecuadas de control de emisiones para mitigar cualquier impacto negativo en la calidad del aire y el medioambiente circundante.

A pesar de ello, la producción de combustible alternativo mediante pirólisis de neumáticos reciclados presenta una perspectiva prometedora para abordar múltiples desafíos en el panorama energético y medioambiental actual. Estudios respaldan la idea de que esta tecnología no solo contribuye a la diversificación de fuentes de energía, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles, sino que también ofrece beneficios significativos en términos de sostenibilidad y gestión de residuos (Babajó et al., 2019), (Chew et al., 2021), (Yaqoob et al., 2021).

Investigaciones recientes destacan que la pirólisis de neumáticos usados puede generar un combustible alternativo de alta calidad que puede sustituir parcial o totalmente a los combustibles fósiles convencionales, en diversas aplicaciones industriales y de transporte (dos Santos et al., 2020), (Mavukwana & Sempuga, 2022). Esta capacidad para aprovechar los recursos renovables disponibles, como los neumáticos desechados, para producir energía, representa un avance importante hacia la transición a una economía más verde y sostenible.

Además, el uso de gases no condensables como combustible para alimentar el proceso de pirólisis, como se indica en el presente estudio, ofrece una solución ingeniosa para cerrar el ciclo de energía y maximizar la eficiencia del sistema. Estudios como los de Nasir et al. (2013), Rozzi et

al. (2020) including hydrogen and natural gas, are considered viable alternatives to fossil fuels. Indeed, they play a fundamental role in those sectors that are difficult to electrify (e.g., road mobility or high-heat industrial processes, Sahoo et al. (2021), Sharma et al. (2021) han demostrado que esta práctica no solo reduce los costos operativos y energéticos asociados con la producción de combustible alternativo, sino que también minimiza las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos.

Sin embargo, a pesar de los beneficios potenciales asociados con la pirólisis de neumáticos usados, existen desafíos y consideraciones importantes que deben abordarse. Estudios han señalado preocupaciones sobre posibles impactos ambientales y de salud, asociados con la gestión de residuos derivados de la pirólisis, como la emisión de compuestos orgánicos volátiles (COV) y la generación de residuos sólidos (He et al., 2015) (Barabad et al., 2018), (Jayawardhana et al., 2019).

Estudios recientes han identificado la necesidad de desarrollar e implementar medidas efectivas de control de emisiones y manejo de residuos para mitigar los impactos negativos en la calidad del aire y el medioambiente circundante (Czajczyńska et al., 2017) (Das et al., 2019) (Ławińska et al., 2022). Además, se ha destacado la importancia de evaluar cuidadosamente el ciclo de vida completo de la tecnología de pirólisis, desde la recolección de neumáticos usados hasta la disposición final de los productos y subproductos generados.

En definitiva, la implementación efectiva de las medidas de mitigación recomendadas juega un papel fundamental en el éxito y la sostenibilidad de la pirólisis de neumáticos usados como método para la producción de combustible alternativo. Estas medidas no solo abordan los posibles riesgos asociados con el proceso, como la exposición a altas temperaturas, la liberación de gases tóxicos y el manejo seguro de los subproductos, sino que también garantizan un entorno laboral seguro y saludable para el personal involucrado.

Al priorizar la protección del personal, mediante el uso de equipos de protección personal adecuados y la implementación de protocolos operativos específicos, se puede reducir significativamente la probabilidad de incidentes y lesiones en el lugar de trabajo. Además, el monitoreo constante de las emisiones y el control ambiental son esenciales para minimizar el impacto en el medioambiente circundante y cumplir con las regulaciones ambientales. En última instancia, la adopción de medidas de seguridad y protocolos operativos recomendados no solo garantiza la seguridad y la salud de los trabajadores, sino que también contribuye a la viabilidad y la aceptación pública de la tecnología de pirólisis de neumáticos usados como una solución innovadora y sostenible para la gestión de residuos y la producción de energía alternativa.

#### 4. CONCLUSIONES

El proceso de pirólisis de neumáticos usados, si bien es una solución innovadora para la gestión de residuos y la producción de combustible alternativo, presenta desafíos significativos en términos de seguridad ocupacional. Este estudio ha puesto de manifiesto la importancia de implementar medidas

rigurosas para garantizar la protección del personal y reducir el riesgo de accidentes y la exposición a sustancias peligrosas durante la producción de combustible mediante pirólisis.

Una de las conclusiones principales es que la seguridad ocupacional debe ser la máxima prioridad en todos los aspectos del proceso de pirólisis. Las medidas de seguridad recomendadas incluyen el uso de EPP certificados y homologados, la capacitación constante en seguridad ocupacional, la implementación de procedimientos de trabajo seguro, el mantenimiento preventivo de equipos, y la realización de análisis de riesgo, ante actividades de alto riesgo, como trabajos en caliente. Además, la gestión de uso de permisos de trabajo y los ejercicios de simulacros forman parte integral de un entorno seguro.

El estudio también destaca la necesidad de monitorear continuamente las emisiones y mantener un ambiente de trabajo seguro, minimizando la exposición a gases tóxicos, productos químicos, y altas temperaturas. El plan de respuesta a emergencias y la creación de protocolos detallados para situaciones críticas, como incendios o fugas químicas, son esenciales para garantizar la seguridad del personal.

Por último, se recomienda que las empresas y organizaciones que implementen procesos de pirólisis establezcan una cultura de seguridad fuerte, donde todos los trabajadores estén comprometidos con prácticas seguras y la protección de su salud. Este compromiso debe ser sostenido mediante auditorías internas, revisiones regulares de procedimientos y la incorporación de mejoras continuas con base en lecciones aprendidas y avances tecnológicos.

Si bien el enfoque de este estudio fue la seguridad ocupacional en el proceso de pirólisis de neumáticos usados, se reconoce que este enfoque puede aplicarse a otros procesos similares en diferentes industrias. La seguridad debe ser un pilar fundamental para cualquier empresa que busque adoptar tecnologías innovadoras para la gestión de residuos y la producción de recursos alternativos.

## REFERENCIAS

- Abdulfattah, O., Alsurakji, I. H., El-Qanni, A., Samaaneh, M., Najjar, M., Abdallah, R., & Assaf, I. (2022). Experimental evaluation of using pyrolyzed carbon black derived from waste tires as additive towards sustainable concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00938. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00938>
- Babajo, S. A., Enaburekhan, J. S., & Rufai, I. A. (2019). Review on production of liquid fuel from co-pyrolysis of biomass with scrap/waste tire. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 23(8), Article 8. <https://doi.org/10.4314/jasem.v23i8.10>
- Barabad, M. L. M., Jung, W., Versoza, M. E., Lee, Y., Choi, K., & Park, D. (2018). Characteristics of Particulate Matter and Volatile Organic Compound Emissions from the Combustion of Waste Vinyl. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/ijerph15071390>
- Bhatnagar, A., Hogland, W., Marques, M., & Sillanpää, M. (2013). An overview of the modification methods of activated carbon for its water treatment applications. *Chemical Engineering Journal*, 219, 499-511. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.12.038>

- Chen, J., Li, C., Ristovski, Z., Milic, A., Gu, Y., Islam, M. S., Wang, S., Hao, J., Zhang, H., He, C., Guo, H., Fu, H., Miljevic, B., Morawska, L., Thai, P., Lam, Y. F., Pereira, G., Ding, A., Huang, X., & Dumka, U. C. (2017). A review of biomass burning: Emissions and impacts on air quality, health and climate in China. *Science of The Total Environment*, 579, 1000-1034. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.025>
- Chew, K. W., Chia, S. R., Chia, W. Y., Cheah, W. Y., Munawaroh, H. S. H., & Ong, W.-J. (2021). Abatement of hazardous materials and biomass waste via pyrolysis and co-pyrolysis for environmental sustainability and circular economy. *Environmental Pollution*, 278, 116836. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116836>
- Czajczyńska, D., Anguilano, L., Ghazal, H., Krzyżyńska, R., Reynolds, A. J., Spencer, N., & Jouhara, H. (2017). Potential of pyrolysis processes in the waste management sector. *Thermal Science and Engineering Progress*, 3, 171-197. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2017.06.003>
- dos Santos, R. G., Rocha, C. L., Felipe, F. L. S., Cezario, F. T., Correia, P. J., & Rezaei-Gomari, S. (2020). Tire waste management: An overview from chemical compounding to the pyrolysis-derived fuels. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22(3), 628-641. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-00986-8>
- Gamboa, A. R., Rocha, A. M. A., dos Santos, L. R., & de Carvalho, J. A. (2020). Tire pyrolysis oil in Brazil: Potential production and quality of fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 109614. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109614>
- He, Z., Li, G., Chen, J., Huang, Y., An, T., & Zhang, C. (2015). Pollution characteristics and health risk assessment of volatile organic compounds emitted from different plastic solid waste recycling workshops. *Environment International*, 77, 85-94. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.01.004>
- Hoang, A. T., Nguyen, T. H., & Nguyen, H. P. (2020). Scrap tire pyrolysis as a potential strategy for waste management pathway: A review. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-18. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1745336>
- Jayawardhana, Y., Gunatilake, S. R., Mahatantila, K., Ginige, M. P., & Vithanage, M. (2019). Sorptive removal of toluene and m-xylene by municipal solid waste biochar: Simultaneous municipal solid waste management and remediation of volatile organic compounds. *Journal of Environmental Management*, 238, 323-330. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.097>
- Jjagwe, J., Olupot, P. W., Menya, E., & Kalibbala, H. M. (2021). Synthesis and Application of Granular Activated Carbon from Biomass Waste Materials for Water Treatment: A Review. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 6(4), 292-322. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2021.03.003>
- Ławińska, O., Korombel, A., & Zajemska, M. (2022). Pyrolysis-Based Municipal Solid Waste Management in Poland—SWOT Analysis. *Energies*, 15(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/en15020510>
- Mavukwana, A., & Sempuga, C. (2022). Recent developments in waste tyre pyrolysis and gasification processes. *Chemical Engineering Communications*, 209(4), 485-511. <https://doi.org/10.1080/00986445.2020.1864624>
- Nasir Uddin, Md., Daud, W. M. A. W., & Abbas, H. F. (2013). Potential hydrogen and non-condensable gases production from biomass pyrolysis: Insights into the process variables. *Renewable*

- and *Sustainable Energy Reviews*, 27, 204-224. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.031>
- Pan, X., Lian, W., Yang, J., Wang, J., Zhang, Z., Hao, X., Abudula, A., & Guan, G. (2022). Downer reactor simulation and its application on coal pyrolysis: A review. *Carbon Resources Conversion*, 5(1), 35-51. <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2021.12.003>
- Ravindra, K., Singh, T., & Mor, S. (2019). Emissions of air pollutants from primary crop residue burning in India and their mitigation strategies for cleaner emissions. *Journal of Cleaner Production*, 208, 261-273. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.031>
- Rivera-Utrilla, J., Sánchez-Polo, M., Gómez-Serrano, V., Álvarez, P. M., Alvim-Ferraz, M. C. M., & Dias, J. M. (2011). Activated carbon modifications to enhance its water treatment applications. An overview. *Journal of Hazardous Materials*, 187(1), 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.01.033>
- Rozzi, E., Minuto, F. D., Lanzini, A., & Leone, P. (2020). Green Synthetic Fuels: Renewable Routes for the Conversion of Non-Fossil Feedstocks into Gaseous Fuels and Their End Uses. *Energies*, 13(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/en13020420>
- Sahoo, K., Kumar, A., & Chakraborty, J. P. (2021). A comparative study on valuable products: Bio-oil, biochar, non-condensable gases from pyrolysis of agricultural residues. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23(1), 186-204. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01114-2>
- Sharma, A., Khatri, D., Goyal, R., Agrawal, A., Mishra, V., & Hansdah, D. (2021). Environmentally Friendly Fuel Obtained from Pyrolysis of Waste Tyres. En D. Tripathi & R. K. Sharma (Eds.), *Energy Systems and Nanotechnology* (pp. 185-204). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-1256-5\\_11](https://doi.org/10.1007/978-981-16-1256-5_11)
- Toteva, V., & Stanulov, K. (2020). Waste tires pyrolysis oil as a source of energy: Methods for refining. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, 36(2), 143-158. <https://doi.org/10.1177/1477760619895026>
- Xia, W., Niu, C., & Ren, C. (2017). Enhancement in floatability of sub-bituminous coal by low-temperature pyrolysis and its potential application in coal cleaning. *Journal of Cleaner Production*, 168, 1032-1038. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.119>
- Yaqoob, H., Teoh, Y. H., Jamil, M. A., & Gulzar, M. (2021). Potential of tire pyrolysis oil as an alternate fuel for diesel engines: A review. *Journal of the Energy Institute*, 96, 205-221. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2021.03.002>
- Yaqoob, H., Teoh, Y. H., Sher, F., Jamil, M. A., Murtaza, D., Al Qubeissi, M., UI Hassan, M., & Mujtaba, M. A. (2021). Current Status and Potential of Tire Pyrolysis Oil Production as an Alternative Fuel in Developing Countries. *Sustainability*, 13(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/su13063214>
- Zhang, C., Zeng, G., Huang, D., Lai, C., Chen, M., Cheng, M., Tang, W., Tang, L., Dong, H., Huang, B., Tan, X., & Wang, R. (2019). Biochar for environmental management: Mitigating greenhouse gas emissions, contaminant treatment, and potential negative impacts. *Chemical Engineering Journal*, 373, 902-922. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.05.139>