



**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
SEDE CONCEPCIÓN – REY BALDUINO DE BÉLGICA**

**TRANSFORMACIÓN Y REVALORIZACIÓN QUÍMICA DE NEUMÁTICOS  
COMO ESTRATEGIA SOSTENIBLE MEDIANTE TECNOLOGÍAS Y  
ECONOMÍA CIRCULAR**

Trabajo de Título para optar al Título de  
Ingeniería de Ejecución en QUÍMICA  
MENCIÓN CONTROL.

Alumna:

Fernanda Javiera Vega Muñoz.

Profesor Guía:

Dr. Daniel Moena Flandes.

2025

## **RESUMEN**

Los neumáticos en desuso están compuestos por material no biodegradable, estos pueden reciclarse, pero no deben ser tratados de la misma forma que un residuo común. El Impacto Ambiental de los neumáticos proviene de diversos factores, en particular de los polímeros utilizados en su fabricación, como el caucho, el acero, las fibras textiles, además de otras sustancias como negro de humo y aceites, estos se demoran mucho tiempo en degradarse. La mala gestión de acumulación de neumáticos en los vertederos puede ser un gran problema ya que ayudan a la proliferación de roedores, insectos, gases y tardan años en desaparecer.

Como otro punto a mencionar, éstos han sido diseñados para soportar condiciones mecánicas altas, lo que significa que al principio será difícil de romper, al igual que presenta una capacidad calorífica alta que dificulta su acabamiento en caso de quemarse. En el proceso de combustión, se generan productos tóxicos, como el monóxido de carbono (CO) y compuestos orgánicos volátiles (COVs), además de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en grandes cantidades, contribuyendo directamente al efecto invernadero.

Es necesario identificar las fases del ciclo de vida de los neumáticos (uso, fabricación, disposición) que producen un mayor impacto en el medio ambiente. Se deberá investigar tecnologías como el reciclaje mecánico o tratamientos que puedan reducir estos impactos.

La adecuada gestión y reciclaje de los neumáticos hace que la acumulación de los residuos en los vertederos, contaminación del suelo y agua se reduzca, éstos pueden ser reciclados y reutilizados en el contexto de la economía circular como, por ejemplo: El reciclaje Mecánico: éstos pasan por un proceso de trituración mecánica para reducir su tamaño, son cortados en trozos más pequeños o dependiendo del uso que se le quiera dar, estos trozos ya cortados se trituran aún más hasta obtener partículas más finas. Y durante el proceso de trituración se separan con un imán y corrientes de aire el metal y las fibras textiles del neumático. Esta creación de materiales se puede usar como productos nuevos. (asfaltos modificados). Lo cual se propondrá un plan integral para la gestión incorporando estrategias de su reutilización con sistemas de indicadores que permitan ver su impacto ambiental. Este proyecto presenta una buena factibilidad de desarrollo, ya que la normativa vigente en el reciclaje y gestión de residuos fomenta la promulgación de este proyecto, facilitando permisos, la implementación de estas tecnologías favorece a la reducción de desechos y sostenibilidad.

## ÍNDICE

RESUMEN

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

INTRODUCCIÓN .....	1
OBJETIVO GENERAL .....	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
ALCANCE DEL PROYECTO.....	3
1. CAPÍTULO I.....	4
ANÁLISIS TÉCNICO DEL CICLO DE VIDA DE LOS NEUMÁTICOS .....	4
1.1. ANTECEDENTES GENERALES.....	5
1.1.1. NEUMÁTICOS .....	5
1.1.2. ESTRUCTURA DE UN NEUMÁTICO .....	6
1.1.2.1. Revestimiento interno .....	6
1.1.2.2. Capa de la carcasa .....	6
1.1.2.3. Zona del talón inferior.....	6
1.1.2.4. Talones.....	6
1.1.2.5. Flanco .....	6
1.1.2.6. Capa de la carcasa .....	7
1.1.2.7. Cap Ply (o cinturón de “grado cero”).....	7
1.1.2.8. Capas superiores de la corona (o cinturones) .....	7
1.1.2.9. Banda de rodamiento.....	7
1.1.3. TIPOS DE NEUMÁTICOS .....	8
1.1.3.1. Según disposición de la llanta.....	8
1.1.3.2. Según la estructura interna .....	9
1.1.3.3. Según aplicaciones .....	9
1.1.4. CARACTERÍSTICAS DE LOS NEUMÁTICOS .....	12
1.1.4.1. Elasticidad.....	12
1.1.4.2. Adherencia.....	13
1.1.4.3. Capacidad de evacuación de agua.....	13
1.1.4.4. Capacidad de carga .....	13
1.1.4.5. Resistencia a la centrifugación .....	13
1.2. CICLO DE VIDA DE LOS NEUMÁTICOS .....	14
1.2.1 EXTRACCIÓN Y PRODUCCIÓN DE MATERIAS PRIMAS .....	14

1.2.1.1. Obtención Caucho Natural .....	14
1.2.1.2. Caucho Sintético .....	15
1.2.1.3. Acero .....	15
1.2.1.4. Fibras Textiles .....	15
1.2.1.5. Negro de humo .....	15
1.2.2. FABRICACIÓN .....	16
1.2.2.1. Mezclado .....	16
1.2.2.2. Calandrado.....	17
1.2.2.3. Extrusión .....	17
1.2.2.4. Conformado de aros de talón.....	18
1.2.2.5. Ensamblado .....	18
1.2.2.6. Vulcanizado .....	18
1.2.2.7. Control de calidad.....	18
1.2.3. DISPOSICIÓN DE LOS NEUMÁTICOS .....	19
1.2.3.1. La gestión correcta de los NFU tiene como objetivo: .....	19
1.2.3.2. Alternativas para la disposición de neumáticos .....	20
2.  CAPÍTULO II .....	21
TECNOLOGÍAS DE RECICLAJE Y REUTILIZACIÓN: PIRÓLISIS Y RECICLAJE MECÁNICO .....	21
2.1.  PROCESO DE PIRÓLISIS.....	22
2.1.1. OBTENCIÓN DE ACEITE PIROLÍTICO.....	24
2.1.2. OBTENCIÓN DEL CARBÓN BLACK .....	25
2.1.3. OBTENCIÓN DE GAS DE PIRÓLISIS .....	26
2.1.4. FACTORES INFLUYENTES EN EL PROCESO .....	26
2.1.4.1. Temperatura.....	26
2.1.4.2. Velocidad de calentamiento .....	27
2.1.4.3. Tamaño del material.....	27
2.1.4.4. Composición de los neumáticos .....	27
2.1.4.5. Tiempo en el reactor .....	28
2.1.4.6. Gas portador .....	28
2.1.4.7. Presión atmosférica.....	28
2.1.4.8. Catalizadores .....	28
2.1.5. TIPOS DE PROCESOS DE PIRÓLISIS APLICADOS EN LA GESTIÓN DE NEUMÁTICOS.....	29
2.1.6. REACTORES DE PIRÓLISIS.....	30
2.2. RECICLAJE MECÁNICO .....	31
2.2.1. ETAPAS DEL PROCESO.....	31
2.2.2. APLICACIONES DE LOS NEUMÁTICOS RECICLADOS .....	33
2.2.2.1. Asfalto modificado.....	33
2.2.2.2. Materiales para construcción.....	34
2.2.2.3. Pavimentos de seguridad.....	35
2.2.2.4. Jardinería y paisajismo.....	35

2.2.2.5. Sistema de drenajes y filtros.....	35
3.    CAPÍTULO III .....	37
PLAN INTEGRAL PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DE NEUMÁTICOS.....	37
3.1. SITUACIÓN ACTUAL DE LA GESTIÓN DE NEUMÁTICOS .....	38
3.1.1. MÉTODOS DE DISPOSICIÓN .....	39
3.1.2. IMPACTO AMBIENTAL DE LOS NFU .....	40
3.2. INCORPORAR LA ECONOMÍA CIRCULAR.....	40
3.3. PROPONER ESTRATEGIAS DE GESTIÓN SOSTENIBLES .....	43
3.3.1. Ubicación estratégica .....	43
3.3.2. Infraestructura adecuada .....	43
3.3.3. Cumplimiento de las normas.....	43
3.4. INDICADORES PARA EVALUAR EL IMPACTO AMBIENTAL .....	47
3.4.1. Reducción de residuos .....	47
3.4.2. Consumo de energías y recursos .....	47
3.4.3. Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).....	48
3.4.4. Calidad de los productos ya reciclados.....	48
3.4.5. Impacto ecológico.....	48
3.4.6. Valorización y reutilización .....	48
CONCLUSIONES .....	49
BIBLIOGRAFÍA.....	50

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Partes del neumático. ....	7
Figura 1-2: Estructura interna de una cubierta radial y diagonal. ....	9
Figura 1-3: Ejemplo de neumático de carretera.....	10
Figura 1-4: Ejemplo neumático todo terreno.....	11
Figura 1-5: Ejemplo neumático de invierno. ....	11
Figura 1-6: Ejemplo de neumático antipinchazos.....	12
Figura 1-7: Extracción del látex.....	14
Figura 1-8: Estructura molecular del caucho natural. ....	15
Figura 1-9: Negro de humo.....	16
Figura 1-10: Rodillos de calandrados. ....	17
Figura 1-11: Reciclaje de neumáticos, transformación de un residuo en recursos. ....	20
Figura 2-1: Proceso de pirólisis en neumáticos usados.....	23
Figura 2-2: Aplicaciones del aceite pirolítico.....	24
Figura 2-3: Aplicaciones de carbón. ....	25
Figura 2-4: Proceso de reciclaje mecánico .....	32
Figura 2-5: Proceso vía húmeda. ....	33
Figura 2-6: Proceso vía seca. ....	34
Figura 3-1: Categorías de neumáticos según el decreto N°8/2021.....	39
Figura 3-2: Etiquetas de las 3R.....	41
Figura 3-3: Estrategia propuesta por las 3R. ....	42
Figura 3-4: Normas ISO. ....	43
Figura 3-5: Estrategias de sostenibilidad.....	47

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 de descripciones de las partes del neumático. ....	8
Tabla 2-1 de temperatura que afecta la velocidad de descomposición y productos obtenidos. ....	26
Tabla 2-2 de velocidad de calentamiento que influye en la ruptura molecular.....	27
Tabla 2-3 de la composición de los neumáticos. ....	27
Tabla 2-4 de gases portadores.....	28
Tabla 2-5 de catalizadores usados.....	29
Tabla 2-6 de los tipos de pirólisis que se aplican en la gestión de neumáticos.....	29
Tabla 2-7 sobre formas de incorporar el caucho al asfalto. ....	33
Tabla 3-1 de categorías de los neumáticos. ....	38
Tabla 3-2 de los métodos de disposición más utilizados de los NFU. ....	39
Tabla 3-3 de tecnologías para tratar el neumático. ....	44

## SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

C-C	: Enlace Carbono – Carbono.
C-H	: Enlace Carbono – Hidrógeno.
C-S	: Enlace Carbono – Azufre.
CH <sub>4</sub>	: Metano.
COVs	: Compuestos orgánicos volátiles.
CO	: Monóxido de carbono.
CO <sub>2</sub>	: Dióxido de carbono.
FBR	: Reactor de lecho fluidizado.
GEI	: Gases de efecto invernadero.
g/cm <sup>3</sup>	: Gramos por centímetro cúbico.
ISO 9001	: Normativa.
ISO 14001	: Normativa.
MJ/kg	: Megajulios por kilogramo.
mm	: Milímetros.
NFU	: Neumáticos fuera de uso.
PSI	: Libras por pulgada cuadrada.
REP	: Responsabilidad Extendida del Productor.
USD	: dólares
°C	: Grados Celsius.

## **INTRODUCCIÓN**

El problema de los neumáticos fuera de uso (NFU) es cada vez más crítico en base a su impacto ambiental. Sus residuos, fabricados con material no biodegradable como el caucho, acero y fibras textiles tardan años en degradarse, al igual que su acumulación en vertederos genera contaminación en el suelo y agua y su quema produce las emisiones tóxicas que afectan el medio ambiente [8]. Este proyecto abarcó el ciclo de vida completo de los neumáticos desde su fabricación, uso y disposición. Se enfocó en prácticas que redujeran la acumulación de los NFU en los vertederos y los transformaran en materiales útiles, tales como, materiales de construcción, asfalto o combustible [28]. La economía circular y las tecnologías de reciclaje brindaron alternativas para reducir aquellos impactos, así transformado los neumáticos en desuso en productos útiles y sostenibles [18]. Este proyecto busco una gestión sostenible de los NFU con el objetivo principal de minimizar el impacto ambiental durante su ciclo de vida. Dividiéndose en tres objetivos claves.

En el primer objetivo se realizó un análisis de producción y desechos de los neumáticos, identificando las etapas en las que más se produce un daño al ambiente.

Como segundo objetivo se evaluaron tecnologías de reciclaje como pirólisis y el reciclaje mecánico, ya que estas permitieron reutilizar los materiales de los neumáticos.

En el tercer objetivo se elaboró un plan de gestión integral orientado a promover el reciclaje y la reutilización, fomentando prácticas sostenibles y estableciendo indicadores para medir el impacto ambiental.

Se recopiló información sobre el ciclo de vida de los neumáticos y las tecnologías más utilizadas de reciclaje y reutilización, para ello se compararon los métodos de reciclaje mecánico y pirólisis en neumáticos, determinando su efectividad y viabilidad, tanto económica como ambiental. En base a estos análisis, se plantearon estrategias para el plan integral de gestión.

## **OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar un sistema de gestión sostenible para neumáticos que minimice su impacto ambiental a lo largo de su ciclo de vida, incorporando tecnologías y principios de economía circular.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar un análisis técnico del ciclo de vida de los neumáticos, identificando las etapas de mayor impacto ambiental y proponiendo tecnologías para optimizar su gestión.
- Evaluar tecnologías y métodos innovadores de reciclaje y reutilización de neumáticos en el contexto de la economía circular: Pirólisis y Reciclaje Mecánico.
- Proponer un plan integral para la gestión sostenible de neumáticos, incorporando estrategias específicas de reciclaje, reutilización y promoción de prácticas responsables, acompañado de un sistema de indicadores para evaluar su impacto ambiental y operacional.

### **ALCANCE DEL PROYECTO**

El proyecto “Transformación y revalorización química de neumáticos como estrategia sostenible mediante tecnologías y economía circular” tiene como objetivo principal desarrollar un sistema de gestión sostenible para neumáticos que minimice su impacto ambiental a lo largo de su ciclo de vida, incorporando tecnologías y principios de economía circular reciclando las materias primas. Este proyecto beneficiará directamente a los ciudadanos al mejorar la gestión de los neumáticos fuera de uso, incentivando su correcto reciclaje reduciendo así su acumulación en vertederos. Esto ayudará a disminuir la contaminación relacionada a su descomposición y promover su reutilización en productos sostenibles, nuevas aplicaciones industriales y contribuyendo al cuidado del medio ambiente. Las acciones principales en un futuro será fomentar la recolección y reciclaje, establecer puntos de recogidas, clasificar neumáticos (reciclables, reutilizables, desechables) y concientizar sobre las prácticas sostenibles. El proyecto se llevará a cabo en un periodo de 3 meses, utilizando información bibliográfica existente. Se espera como resultado reducir el impacto ambiental asociado a su desecho e innovar el tratamiento de los neumáticos.

1. CAPÍTULO I

ANÁLISIS TÉCNICO DEL CICLO DE VIDA DE LOS NEUMÁTICOS

## **1.1. ANTECEDENTES GENERALES**

El origen de los neumáticos data del siglo XIX cuando Charles Goodyear inventó la vulcanización en 1839, buscaba generar un proceso que mejorara la resistencia y plasticidad del caucho lo que hizo las llantas de goma maciza elaboradas con caucho procesado [1]. Posteriormente, en el año 1845 el escocés Robert W. Thomson ideó la primera llanta neumática. Aquella se compone de un tubo interno de goma lleno de aire que resguardaba la cubierta con conectores de cuero, este sistema amortiguaba los golpes y la irregularidad de los terrenos. El neumático marca Goodyear fue fundado en 1898 por Frank Seiberling, con el apellido en honor al descubridor del caucho (Charles Goodyear), al principio la empresa comenzó fabricando neumáticos para bicicletas, y en 1916 se convirtió en la empresa de neumáticos más grande del mundo. Desarrollaban neumáticos con talón con costados rectos o semirrectos [1].

La segunda década del siglo XX se desarrolla la estructura de capas radiales, los materiales se colocan en capas unas sobre otras en línea recta lo que mejoro la resistencia y la estabilidad, y sustituyo a la estructura de capas diagonales, este método se inventó en 1916, pero no se implementó hasta los años 50. Esta función permite una adherencia y fricción adecuada con el pavimento, permitiendo un buen arranque, conducción y frenado. Muchos vehículos utilizan neumáticos sin cámara, el aire a presión queda contenido por el neumático y la llanta. Llamado neumático de seguridad [1].

### **1.1.1. NEUMÁTICOS**

La parte física relacionada con el estado gaseoso es la neumática. Por eso a la banda elástica que tiene que guardar el colchón de aire que existe entre la llanta y el suelo se le llame neumático [2].

El neumático es el segmento de la rueda que interactúa con el suelo y que alberga, entre este y la llanta, el volumen de aire diseñado para optimizar las propiedades propias de la rueda [2].

### **1.1.2. ESTRUCTURA DE UN NEUMÁTICO**

La estructura del neumático consta nueve partes principales, conocer su diseño permite identificar formas más sostenibles de gestionarlos al llegar al final de su vida útil. A continuación, se describe su estructura y las funciones de cada componente principal.

#### 1.1.2.1. Revestimiento interno

Una capa hermética de goma sintética para garantizar la estanqueidad [3] [4].

#### 1.1.2.2. Capa de la carcasa

Es la capa de recubrimiento interno del neumático, conformada por cordones finos de fibra textil o cables adheridos a la goma [3] [4] [6].

#### 1.1.2.3. Zona del talón inferior

El neumático de goma se agarra a la llanta de metal. La fuerza del motor y el esfuerzo de frenado se distribuyen desde la llanta del neumático hasta el área de contacto con la superficie de la carretera [4] [6].

#### 1.1.2.4. Talones

Mantienen un firme soporte en la llanta del neumático para asegurar un ajuste hermético y mantener el neumático correctamente asentado en la misma. Está compuesto por aceros aislados con caucho, ayuda con la flexibilidad y la resistencia a la carga [4].

#### 1.1.2.5. Flanco

Protege el lateral de los neumáticos frente a los impactos con los bordillos y el asfalto. En el flanco se pueden encontrar información relevante acerca del neumático, tales como el tamaño del neumático y el índice de velocidad [3].

#### 1.1.2.6. Capa de la carcasa

Capa que absorbe todo tipo de golpes del exterior del neumático a través de su resistencia que la conforman los cordones de acero muy finos unidos a la goma [3] [6].

#### 1.1.2.7. Cap Ply (o cinturón de “grado cero”)

Esta importante capa de protección contribuye a preservar la forma del neumático cuando se conduce a alta velocidad. Para prevenir la expansión centrífuga del neumático, se insertan cordones de nailon reforzados en una capa de goma y se sitúan alrededor de la circunferencia del neumático [4] [6].

#### 1.1.2.8. Capas superiores de la corona (o cinturones)

Proporcionan la base rígida para la banda de rodadura [4] [6].

#### 1.1.2.9. Banda de rodamiento

Está compuesta por caucho natural y sintético, es la parte externa baja del neumático que está en contacto con la superficie, proporciona agarre en la carretera, estabilidad direccional, resistencia al desgaste y evacúa el agua en condiciones de mojado [3] [6].

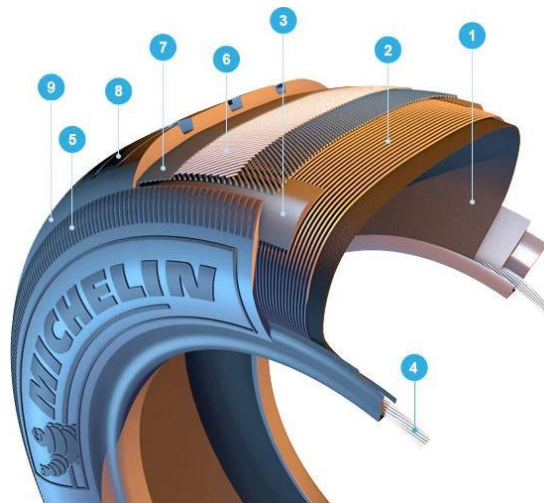


Figura 1-1: Partes del neumático.

Fuente: Michelin

Tabla 1-1 de descripciones de las partes del neumático.

1	Revestimiento interno
2	Capa de la carcasa
3	Zona del talón inferior
4	Talones
5	Flanco
6	Capa de la carcasa
7	Cap Ply
8	Capas superiores de la corona
9	Banda de rodamiento

Fuente: Elaboración propia basada en la investigación.

### **1.1.3. TIPOS DE NEUMÁTICOS**

Los neumáticos pueden clasificarse en base a tres factores; su disposición en la llanta, estructura interna y según sus aplicaciones, este último factor se determina principalmente por el diseño de su banda de rodamiento, que está directamente vinculado con la estructura de su carcasa. [2] [15] [16] [17].

#### **1.1.3.1. Según disposición de la llanta**

- Con cámara

Se utiliza para inflar el neumático, esta se encuentra entre la llanta y la cubierta, si cualquier objeto con punta o filoso llegase a traspasar el neumático el aire se sale muy rápido y esto provoca que se reviente el neumático. Se usa en vehículos pesados o de carga [2].

- Sin cámara

No contiene el aire presurizado ya que no tiene cámara, entre la llanta y el neumático se forma un recipiente para guardar el aire, si un objeto con punta o filoso llegase a traspasar el neumático este se desinflaría muy lento solo por el

agujero que se hizo, así evitando más el riesgo que cuando se revienta el neumático [2].

### 1.1.3.2. Según la estructura interna

- **Diagonales**

Son rígidos, pero pueden soportar más peso que el radial, son aptas para vehículos que andan en velocidad más prudente ya que en velocidades altas pueden deformarse, en este caso su ventaja es que puede soportar más carga. Las capas de nylon forman un ángulo de  $45^\circ$ , éstas van de forma diagonal.

- **Radiales**

La lona se coloca desde el centro del neumático, las capas forman un cinturón, es el neumático más utilizado en la actualidad ya que ofrece más comodidad en velocidades altas.

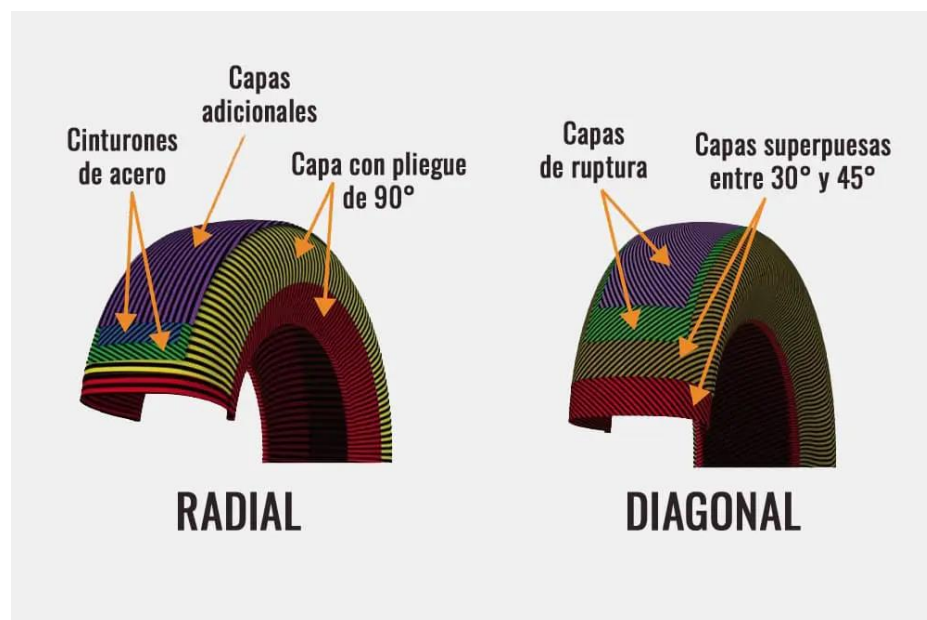


Figura 1-2: Estructura interna de una cubierta radial y diagonal.

Fuente: muchoneumatico.

### 1.1.3.3. Según aplicaciones

Los neumáticos tienen características específicas según el uso que se les dará, las diferencias externas son evidentes, como la banda de rodadura. Existen también

distinciones más profundas en la estructura interna del neumático. Hay muchos tipos, se agrupan y se pueden clasificar en categorías generales como:

- Neumáticos de Carretera

Una de sus principales características es que soporta altas velocidades, al igual tiene una adherencia y estabilidad direccional. Estos disponen de canales de evacuación de agua en pavimentos mojados. (aquaplaning). Mismo tienen propiedades direccionales.



Figura 1-3: Ejemplo de neumático de carretera.

Fuente: Cambiatuneumático.

- Neumáticos de todo terreno

Estos cuentan con grandes canales de evacuación que le permiten adherirse mejor a superficies no asfaltadas, como tierra suelta, arena o barro. Igualmente tienen un mayor grosor para prevenir daños como desgarros o pinchazos debido a las irregularidades del terreno. Su banda de rodadura es más blanda, lo que ayuda a mejorar la tracción en las condiciones en las que se utiliza. La desventaja de estos neumáticos es que tienen menor velocidad, menos duración y estabilidad direccional. Estos neumáticos son utilizados en vehículos agrícolas.



Figura 1-4: Ejemplo neumático todo terreno.

Fuente: noticias.coches.

- Neumáticos de uso mixto

Estos se usan principalmente en carretera, se potencia en su rendimiento en asfalto, aunque se realizan algunas adaptaciones para su uso en terrenos de campo, como un dibujo más profundo y ancho, así como una mayor altura o perfil, con el fin de mejorar su capacidad de carga y flexibilidad.

- Neumáticos de invierno

Incrementan la seguridad al conducir en climas fríos, ya sea en asfalto seco, mojado o bajo lluvia o heladas. También proporcionan mejor tracción en nieve o hielo. Disponen una banda de rodadura que su estructura es más blanda que la de los neumáticos tradicionales, poseen un dibujo con mayor volumen de evacuación de agua [16].



Figura 1-5: Ejemplo neumático de invierno.

Fuente: noticias.coche.

- Neumáticos antipinchazos

Estos neumáticos antipinchazos es un neumático diseñado para seguir funcionando, aunque pierda aire o quede pinchado. Está reforzado con flancos especiales que permiten continuar circulando de forma segura hasta 80 km a una velocidad máxima de 80 km/h, incluso si la presión disminuye. Su diseño se basa en flancos robustos que pueden soportar un peso significativo, incluso cuando no hay presión en el neumático. Permite tener la estabilidad del vehículo [17].



Figura 1-6: Ejemplo de neumático antipinchazos.

Fuente: noticias.coche.

#### **1.1.4. CARACTERÍSTICAS DE LOS NEUMÁTICOS**

Independientemente del modelo o del propósito para el cual se vaya a utilizar, todo neumático debe cumplir con una serie de características fundamentales, estas propiedades son cruciales para asegurar un rendimiento confiable y seguro en diversas condiciones, adaptándose a las diferentes condiciones de la carretera y al tipo de vehículo [2].

##### **1.1.4.1. Elasticidad**

La elasticidad es esencial para adaptarse a los cambios del terreno proporcionando comodidad y estabilidad al vehículo junto con la suspensión. Esto se logra ya que el aire comprimido dentro del neumático y a la flexibilidad del caucho que lo forma.

La histéresis es la capacidad del material para volver a su forma original después de ser deformado. Esto ayuda al neumático a manejar cambios persistentes en peso y dirección [2].

#### 1.1.4.2. Adherencia

Es la capacidad del neumático para mantenerse en contacto con el pavimento y garantizar el control del vehículo, especialmente al frenar o tomar curvas. Depende de la composición y anchura de la banda de rodadura. Bandas más blandas y anchas ofrecen mejor adherencia, aunque esto reduce la vida útil del neumático. También influye el tamaño de la huella, que depende de la presión y la carga sobre la rueda [2].

#### 1.1.4.3. Capacidad de evacuación de agua

Es la capacidad del neumático para drenar el agua en pavimentos inundados, evitando que el vehículo pierda contacto con el suelo (hidroplaneo). Esto se logra gracias a las huellas en el diseño del neumático, que canalizan el agua hacia afuera, asegurando un mejor agarre. Además, este diseño también afecta el ruido y el consumo de combustible [2].

#### 1.1.4.4. Capacidad de carga

La capacidad de carga de un neumático indica el peso máximo que puede soportar [2]. Depende de la resistencia y altura de su estructura (carcasa), así como del diseño del perfil:

- Neumáticos de perfil alto: Soportan más peso, son más cómodos y resistentes al desgaste, pero consumen más combustible y tienen menos estabilidad en curvas.
- Neumáticos de perfil bajo: Son más estables, ofrecen mejor maniobrabilidad y consumen menos, pero soportan menos peso y son menos cómodos.

Además, la presión del aire en el neumático es crucial: a mayor presión, mayor capacidad de carga, pero un exceso puede reducir la adherencia. Es importante respetar las recomendaciones del fabricante para evitar problemas de rendimiento.

#### 1.1.4.5. Resistencia a la centrifugación

Los neumáticos tienen un límite de velocidad máxima que pueden soportar sin dañarse, llamado código de velocidad, que se indica con una letra en su nomenclatura [2]. Este

límite depende de cómo están hechos los neumáticos: los materiales, las capas internas y su rigidez. Además, el uso a mayores velocidades hace que los neumáticos se desgasten más rápido. Por ejemplo, éstos se desgastan el doble a 120 km/h en comparación a 70 km/h de velocidad.

## **1.2. CICLO DE VIDA DE LOS NEUMÁTICOS**

### **1.2.1 EXTRACCIÓN Y PRODUCCIÓN DE MATERIAS PRIMAS**

#### **1.2.1.1. Obtención Caucho Natural**

Se obtiene de los árboles de caucho, que son cultivados en los países de Asia, África y América Latina. El proceso de extracción del látex de estos árboles es menos intensivo en el caso de las emisiones de gases de efecto invernadero, pero provoca un impacto ambiental a causa de la deforestación. Grandes cantidades de bosques tropicales son talados con el objetivo de plantar caucho lo que disminuye la biodiversidad y ecosistemas locales [8].

Es una larga cadena de unidades repetidas de Hidrocarburo Isopreno ( $C_5H_8$ ), cada uno tiene un doble enlace.



Figura 1-7: Extracción del látex.

Fuente: [tecnologiadelosplasticos.blogspot.com](http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com).

- El caucho es prácticamente el único polímero constituido por un hidrocarburo que se encuentra en la naturaleza.

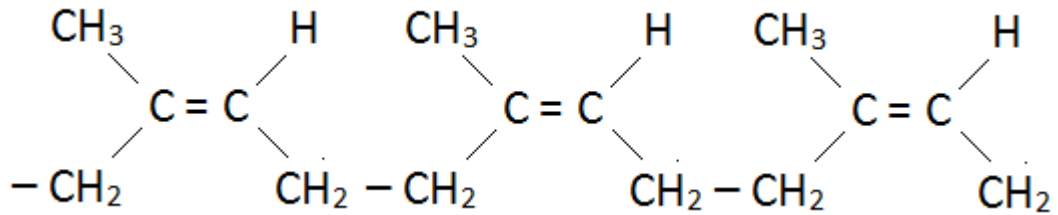


Figura 1-8: Estructura molecular del caucho natural.

Fuente: arteagafisica.wordpress.com.

#### 1.2.1.2. Caucho Sintético

La mayoría del caucho sintético empleado en los neumáticos proviene de productos derivados del petróleo, como el butadieno y el estireno. Estos materiales necesitan de grandes cantidades de energía para su obtención, refinamiento y transformación.

El proceso de fabricación de éste libera contaminantes atmosféricos, entre ellos los compuestos orgánicos volátiles (COV) y otros gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el metano (CH<sub>4</sub>). Estas emisiones aportan de manera directa al cambio climático [8] [11].

#### 1.2.1.3. Acero

La industria siderúrgica provee acero de gran durabilidad, este se utiliza como material para la producción de cables de acero y alambre de acero [11].

#### 1.2.1.4. Fibras Textiles

Fibras artificiales, normalmente de rayón [11].

#### 1.2.1.5. Negro de humo

Es fundamental en la fabricación de neumáticos (22% de su composición). Se genera a través de la combustión de hidrocarburos en ausencia de oxígeno y aceite. Un refuerzo de carbono que proporciona resistencia y durabilidad al neumático, el aceite hace que la mezcla sea blanda. Este proceso libera partículas de carbono que impactan de manera negativa en el medio ambiente, ya que favorece a la contaminación del aire y calentamiento global [11].



Figura 1-9: Negro de humo.

### **1.2.2. FABRICACIÓN**

Un neumático se fabrica mediante la combinación de diversos elementos, adquiridos a través de distintos procedimientos, y finalmente montados en una máquina. Este se forma por varias etapas, las cuales serían: mezclado, calandro, extrusión, conformado de aros de talón, ensamblado, vulcanización y control de calidad [4] [5] [12] [15] [18].

#### **1.2.2.1. Mezclado**

En la primera etapa, en esta fase se procesa las materias primas, para producir el caucho y otros elementos del neumático. Éstos se fabrican mezclando caucho natural y sintético, negro de humo para su resistencia, aceites y otros compuestos, en mezcladores Bandury. Para lograr una mezcla homogénea. En este proceso se consume mucha energía porque se necesitan altas temperaturas para vulcanizar el caucho, es decir un proceso químico que al neumático le da la elasticidad y resistencia. Lo que genera emisiones de compuestos volátiles (COV), el negro de humo se hace mediante la quema de petróleo pesado, lo que ocasiona una huella de carbono [5].

Luego de que el caucho este mezclado, pasa a través de rodillos que lo estira en láminas delgadas. Aquí se agregan los materiales: Acero o nailon para hacer que el neumático sea más fuerte y dar su estructura (capas, cinturones banda de rodadura, etc.).

### 1.2.2.2. Calandrado

En esta fase se fabrican las telas de cuerpo, que son fibras textiles revestidas de goma con el objetivo de formar la estructura del neumático, y resistir la carga del automóvil y la presión del aire interno. Se emplea un material de caucho (extraído de la fase de mezcla) y una tela fabricada con un tejido de poliéster, los dos materiales son introducidos en una máquina donde, mediante un procedimiento complicado, la goma se presiona contra el poliéster para conseguir un extenso rollo de tela enrollada. Después, para concluir, el material adquirido es transportado a maquinarias llamadas cortadoras, a las que se les proporciona el ancho requerido para su uso [4] [5] [12].



Figura 1-10: Rodillos de calandrados.

### 1.2.2.3. Extrusión

En este caso, el objetivo es fabricar bandas o tiras de goma, con distintas formas y características, que posteriormente se montarán en diferentes componentes del neumático. En esta etapa, el material de goma es procesado en máquinas conocidas como extrusoras, donde es obligado a atravesar piezas metálicas que moldearán su forma, generando tres elementos esenciales del neumático: las paredes laterales, las bandas de rodamiento o una sección de los talones [5] [12].

#### 1.2.2.4. Conformado de aros de talón

Los talones son los componentes del neumático que interactúan con las llantas del vehículo, se emplea alambre de acero, que se enrolla para formar un aro, y posteriormente se introduce una pieza de goma generada durante el proceso de extrusión [4] .

#### 1.2.2.5. Ensamblado

En esta fase se utilizan equipos complejos de alta precisión y se encuentran reunidos todos los materiales obtenidos en cada una de las fases anteriores. Todos estos elementos son colocados, cortados y unidos de manera adecuada con el fin de obtener lo que se denomina como "neumático verde", ya que tiene la forma de uno, pero todavía no está preparado para transportar un vehículo. Aún faltan dos etapas cruciales [12] [18].

#### 1.2.2.6. Vulcanizado

Al finalizar el procedimiento de montaje, los neumáticos verdes son transportados a máquinas conocidas como prensas. En estas se sitúan los moldes, que son un tipo de recipientes de metal, que poseen todos los estampados, formas y diseños propios del neumático tal como lo conocemos. El molde imprimirá todas las anotaciones laterales y la configuración de la banda de rodamiento en el neumático verde, aún en condición termoplástico. Cada clase, forma y tamaño del neumático se corresponde con un molde diferente [12] [18].

Los neumáticos verdes se exponen a elevadas presiones y temperaturas (aproximadamente de 300 PSI y 170°C) por un periodo establecido, que puede variar entre 15 minutos para un neumático de tamaño reducido y hasta 60 minutos para uno diseñado para maquinaria agrícola. En términos químicos, ocurre un proceso molecular donde el azufre, presente en los compuestos de caucho, establece conexiones o "puentes" entre sus moléculas, transformando un material termoplástico en uno que pueda resistir el calor, el caucho obtiene dureza, resistencia y estabilidad, manteniendo al mismo tiempo su elasticidad. Finalmente, el resultado definitivo es el neumático terminado.

#### 1.2.2.7. Control de calidad

Cada etapa específica de la producción desde la revisión de las materias primas hasta la distribución de los neumáticos finalizados está sujeta a un control de calidad constante [5].

Los neumáticos pasan por pruebas de calidad tales como:

- Revisiones de uniformidad de los neumáticos.

- Balance.
- Resistencia.
- Rayos X.
- Inspección visual.

### **1.2.3. DISPOSICIÓN DE LOS NEUMÁTICOS**

Los neumáticos en desuso son uno de los principales problemas en la gestión de residuos a nivel global, debido a su gran volumen, larga durabilidad y su resistencia a la descomposición natural. Se calcula que cada año se producen aproximadamente 1,500 millones de neumáticos desechados en todo el mundo, los cuales, si no se manejan de manera adecuada, pueden causar serios impactos negativos en el medio ambiente.

Chile produce anualmente cerca de 140 mil toneladas de neumáticos fuera de uso, lo que la mayoría termina en vertederos. Los impactos ambientales que generan son la contaminación al suelo y agua, esto hace que la acumulación de neumáticos en estos vertederos libere sustancias tóxicas. Al igual que favorece la proliferación de roedores e insectos. [19].

También otro impacto sería la emisión tóxica por la incineración de los neumáticos apilados.

Los neumáticos están hechos de materiales como caucho, acero y fibras textiles, que pueden ser recuperados y reutilizados, lo que es esencial para una economía circular. Una gestión adecuada no solo ayuda a reducir el impacto ambiental, sino que también ofrece oportunidades económicas a través del reciclaje y el aprovechamiento de sus componentes.

La ley de responsabilidad extendida del productor (REP) establece que los generadores de los neumáticos deben hacerse responsable de la recolección y reciclaje de éstos al final de su vida útil.[38].

#### **1.2.3.1. La gestión correcta de los NFU tiene como objetivo:**

- Reducir los impactos negativos en el medio ambiente mediante acciones de reutilización, reciclaje y valorización.
- Impulsar la economía circular al reincorporar estos materiales en nuevos ciclos productivos.
- Maximizar el aprovechamiento de los materiales que componen los neumáticos.

### 1.2.3.2. Alternativas para la disposición de neumáticos

- **Reciclaje mecánico:** Este es uno de los métodos más comunes, el proceso involucra triturar los neumáticos para separar sus componentes, así obteniendo gránulo o polvo de caucho, para darles un nuevo uso como pavimentos o césped sintético. [18].
- **Reciclaje químico:** Este proceso descompone los neumáticos a nivel molecular para así generar material útil, permite recuperar más componentes eficientes. [18].
- **Reutilización o recauchado:** los neumáticos que están en buen estado se renueva su banda de rodadura y así se alarga su vida útil. [18].



Figura 1-11: Reciclaje de neumáticos, transformación de un residuo en recursos.

Fuente: TNU.

2. CAPÍTULO II

TECNOLOGÍAS DE RECICLAJE Y REUTILIZACIÓN: PIRÓLISIS Y  
RECICLAJE MECÁNICO

## **2.1. PROCESO DE PIRÓLISIS**

La pirólisis es un proceso en el que los neumáticos fuera de uso se calientan a altas temperaturas de 400 a 800° C sin oxígeno, rompiendo sus cadenas moleculares para obtener productos reutilizables como aceite, gases y negro de carbón. Este método no solo permite reducir los residuos de caucho, sino que también genera materiales de alto valor energético y económico, contribuyendo a la sostenibilidad [18]. La pirólisis de neumáticos se ha enfocado en áreas como:

- Diseño y mejora de reactores.
- Modelos matemáticos para optimizar el proceso.
- Uso de catalizadores para mejora la calidad de los productos.
- Modificación del negro de carbón para aplicaciones industriales.

La eficiencia de este proceso depende de varios factores claves como la temperatura y composición de los productos obtenidos. Estos materiales tienen una gran capacidad para sus aplicaciones industriales después de su procesamiento.

En la pirólisis, los compuestos orgánicos volátiles de los neumáticos como el polímero de caucho se descomponen en productos de baja masa molecular, como líquidos o gases, que se pueden usar como combustibles o materias primas químicas. Los materiales inorgánicos como el acero y el negro de carbón permanecen como residuos sólidos casi sin cambios y pueden ser reciclados en aplicaciones más útiles. Es una técnica altamente eficiente para gestionar residuos de caucho, ya que recupera materiales valiosos, regenera recursos y mitiga el impacto ambiental. [21] [22] [25].

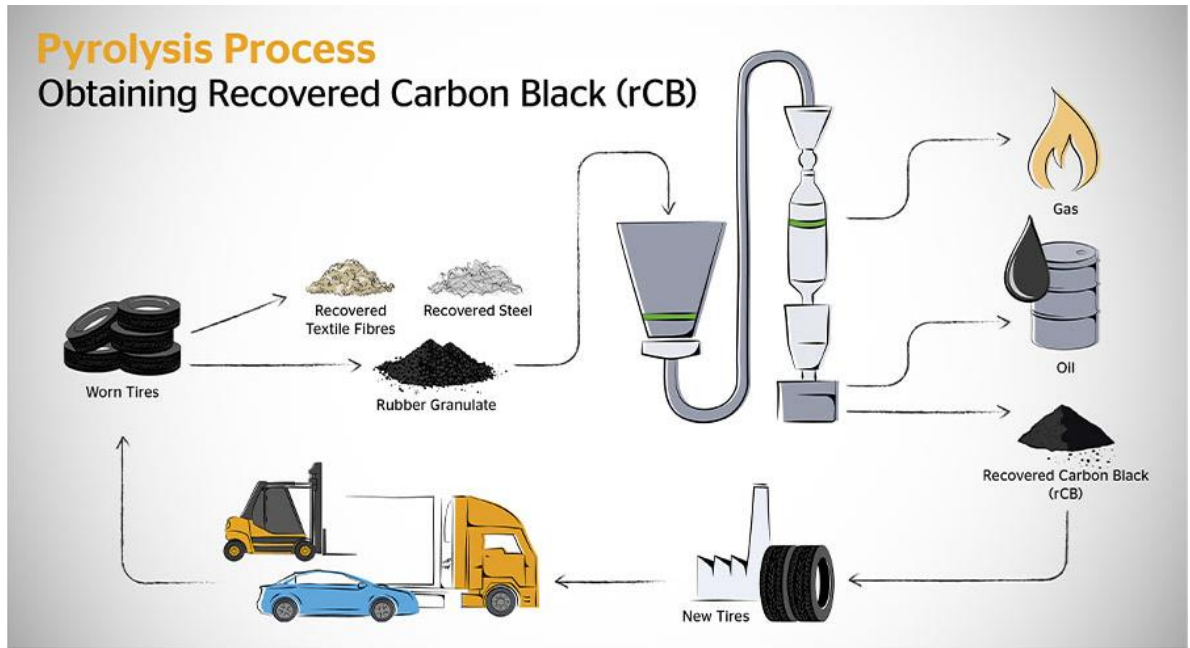


Figura 2-1: Proceso de pirólisis en neumáticos usados.

Fuente: Revista magazine

Este proceso es un método eficiente para reciclar ya que genera bajas emisiones de CO<sub>2</sub>. [34]. Por cada 10.000 toneladas de neumáticos tratados, se producen:

- Aceite pirolítico (43%): 4.300 toneladas.
- Negro de carbón (41%): 4.100 toneladas.
- Gas de proceso (15-16%): 1.500 - 1.600 toneladas.

En el proceso de pirólisis de neumáticos fuera de uso, se producen dos reacciones clave: la ruptura de la cadena principal y la ruptura de los enlaces cruzados, generando segmentos de cadena activos. Primero, los enlaces carbono-carbono (CC) se rompen, lo que reduce el peso molecular de la cadena debido a la transferencia de hidrógeno. Luego, los fragmentos con radicales de azufre pueden recombinarse, formando una nueva red. Los productos de pirólisis, como los monómeros y dímeros de polímero, muestran que los enlaces CC se rompen más fácilmente que los enlaces carbono-hidrógeno (CH). A medida que se calientan, los enlaces CC tienden a fracturarse, generando radicales libres que reaccionan entre sí, produciendo varios productos. A temperaturas de 280-300 °C, la fractura de los enlaces de azufre y los enlaces reticulados es más frecuente, seguida de la degradación de la cadena principal. A medida que aumenta la temperatura, la eficiencia del proceso mejora, ya que los enlaces de azufre se rompen más fácilmente que los enlaces carbono-azufre (CS). El proceso de pirólisis del caucho se basa principalmente en la

ruptura de la cadena principal y los enlaces reticulados, con una baja probabilidad de recombinación. [22].

### 2.1.1. OBTENCIÓN DE ACEITE PIROLÍTICO

Este aceite es una mezcla de los compuestos orgánicos, principalmente de hidrocarburos aromáticos (benceno, tolueno, naftalenos) y alifáticos (compuestos lineales de cadenas como hexano u octano), también contienen pocas cantidades de compuestos nitrogenados, oxigenados (fenol, nitrilos) y sulfurados (sulfuro de hidrógeno). Estos tienen propiedades que son la densidad con  $0,9 - 11 \text{ g/cm}^3$  y el poder calorífico de  $38 - 42 \text{ MJ/kg}$ .

Las moléculas del caucho se rompen en moléculas más pequeñas por las rupturas de los enlaces C-C Y C-H. Los productos volátiles (hidrocarburos) se enfrían para condensar y así se forma el aceite pirolítico. Este producto puede ser revalorizado ya que convierte el desecho en un producto útil [26] [31] [32] [33].

- Usos:
  - Energía.
  - Materia prima.

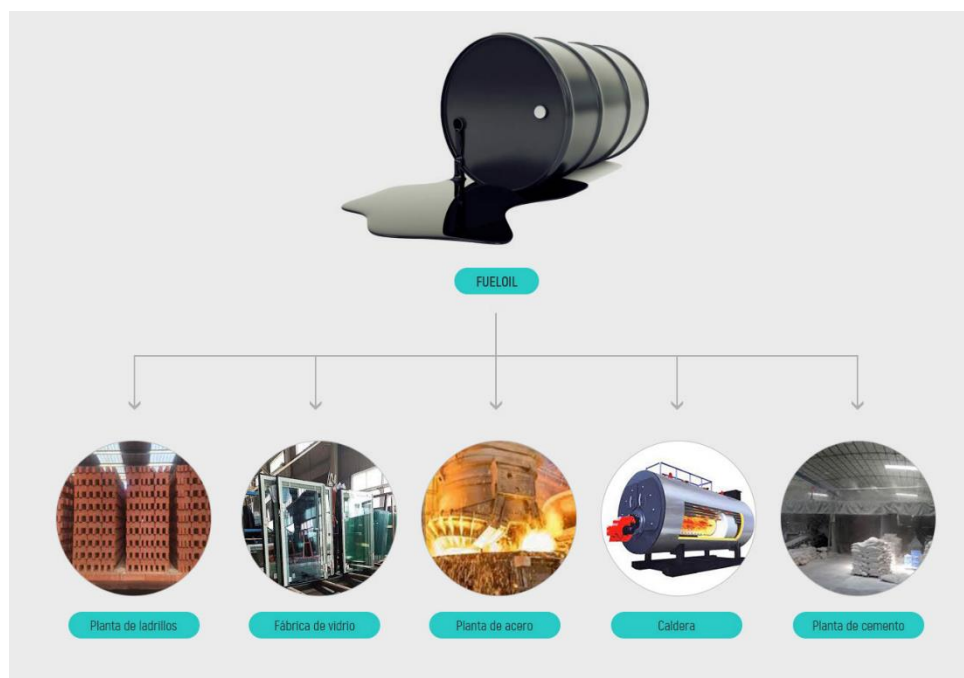


Figura 2-2: Aplicaciones del aceite pirolítico.

Fuente: Bestoneco.

### 2.1.2. OBTENCIÓN DEL CARBÓN BLACK

Los neumáticos durante la pirólisis se descomponen térmicamente con la ausencia del oxígeno, lo que el material orgánico se rompe en fracciones de gases y aceites pirolíticos al igual que en un residuo sólido lo que está compuesta principalmente por carbón black. Este proceso reduce la necesidad de hacer carbón virgen lo que es más intensivo en energías y emisiones [27] [31] [33].

- Usos:
  - Pigmentos.
  - Mejora suelos.
  - Caucho.

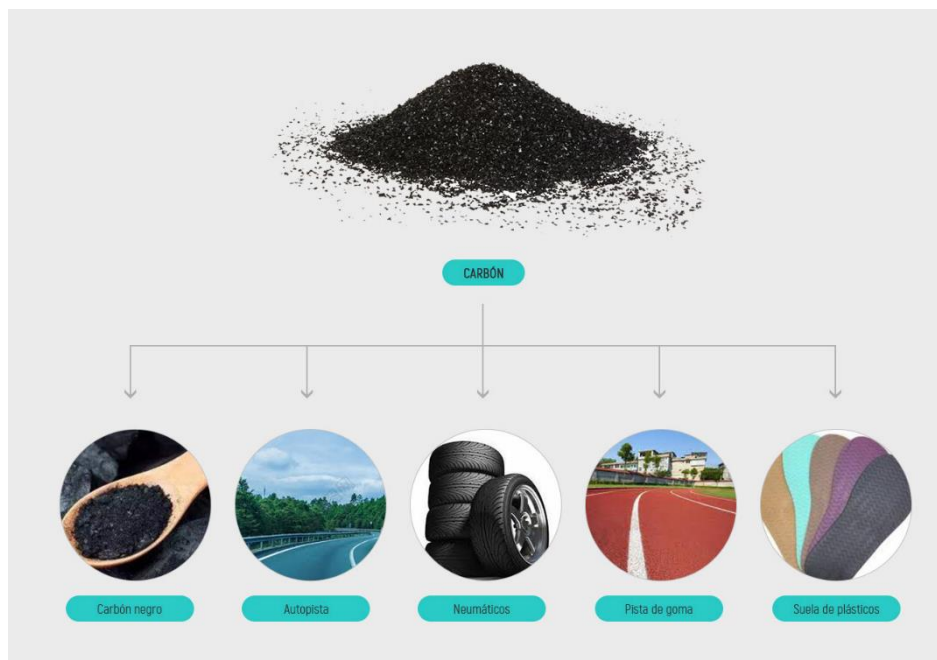


Figura 2-3: Aplicaciones de carbón.

Fuente: Bescone.

### **2.1.3. OBTENCIÓN DE GAS DE PIRÓLISIS**

El gas se produce cuando los compuestos orgánicos se descomponen térmicamente con la ausencia del oxígeno así generando la mezcla de los gases ligeros con un alto contenido energético. [31] [43].

### **2.1.4. FACTORES INFLUYENTES EN EL PROCESO**

El proceso de pirólisis en neumáticos depende principalmente de la temperatura ya que define como se distribuyen los productos obtenidos de este en fase sólida, líquida y gaseosa y sus propiedades físicas y químicas. Además, existen otros factores como la rapidez de calentamiento, el tamaño del material, composición de los neumáticos, el tiempo que permanecen en el reactor, la velocidad del gas portador, presión del sistema y el uso de catalizadores. Éstos influyen en la eficiencia del proceso y en la calidad de los resultados. [23].

#### **2.1.4.1. Temperatura**

La temperatura de pirólisis debe ser alta para descomponer los neumáticos, pero si es demasiado elevada o el tiempo de residencia de gas es largo, el petróleo puede convertirse en gas. Por ello, es crucial encontrar una temperatura óptima que aumente la producción de petróleo, ya que es el producto más valioso del proceso.

Tabla 2-1 de temperatura que afecta la velocidad de descomposición y productos obtenidos.

Bajas temperaturas	Altas temperaturas
300-400°C. Produce más sólidos (carbón) y líquidos (aceites).	500-700°C. Favorece la producción de los gases.

Fuente: Elaboración propia basada en la investigación.

#### 2.1.4.2. Velocidad de calentamiento

La velocidad de calentamiento afecta cómo y a qué temperatura los neumáticos se descomponen, influye en la producción de gases y líquidos, y determina cuánta energía y tiempo se necesitan. Calentamientos más rápidos generan más gases y reacciones secundarias, mientras que calentamientos más lentos consumen menos energía, pero requieren más tiempo. También depende del tipo de reactor utilizado.

Tabla 2-2 de velocidad de calentamiento que influye en la ruptura molecular.

Velocidad Rápida	Velocidad Lenta
Favorece la producción de los líquidos y gases debido a la descomposición.	Favorece la producción de carbón sólido.

Fuente: Elaboración propia basada en la investigación.

#### 2.1.4.3. Tamaño del material

Las partículas pequeñas permiten un calentamiento uniforme, lo que facilita que todo el material pase a fases líquida y gaseosa durante la pirólisis. En cambio, las partículas grandes se calientan más lentamente, dejando el interior en estado sólido. Para obtener más petróleo como producto, es mejor utilizar partículas pequeñas. [23].

#### 2.1.4.4. Composición de los neumáticos

Tabla 2-3 de la composición de los neumáticos.

Composición química de los neumáticos	Presencia de aditivos
- La composición del caucho natural y el sintético.	- Aceites.
- La concentración de azufre.	- Resinas.
	- Metales.

Fuente: Elaboración propia basada en la investigación.

#### 2.1.4.5. Tiempo en el reactor

El tiempo de pirólisis depende del tamaño de las partículas esto quiere decir que, las partículas más grandes requieren más tiempo para completar su conversión. Esto implica reactores más grandes y costosos.

#### 2.1.4.6. Gas portador

Incrementar el caudal del gas portador facilita la expulsión de productos gaseosos, acortando el tiempo que los compuestos volátiles permanecen en el sistema. Esto reduce las reacciones secundarias y mejora la producción de petróleo.

Tabla 2-4 de gases portadores.

Gases inertes: Minimiza la oxidación	Gases reactivos: Favorece la Hidrogenación
- N <sub>2</sub> . - Ar.	- H <sub>2</sub> .

Fuente: Elaboración propia basada en la investigación.

#### 2.1.4.7. Presión atmosférica

Aumentar la presión incrementa la viscosidad del petróleo, mientras que reducirla disminuye las reacciones secundarias en fase gaseosa, mejorando el rendimiento del petróleo y reduciendo depósitos sobre el carbón sólido. Esto hace al carbón más valioso como absorbente en su forma de carbón activado. También al reducir la presión, baja la temperatura del proceso, lo que disminuye la demanda de energía según la ley de los gases ideales.

#### 2.1.4.8. Catalizadores

Los catalizadores bajan la temperatura necesaria para la reacción y facilitan la formación de productos específicos.

Tabla 2-5 de catalizadores usados.

Zeolitas	Óxidos metálicos
Favorecen la producción de hidrocarburos aromáticos.	Incrementan la conversión de gases.

Fuente: Elaboración propia basada en la investigación.

### **2.1.5. TIPOS DE PROCESOS DE PIRÓLISIS APLICADOS EN LA GESTIÓN DE NEUMÁTICOS**

Los tipos de pirólisis tienen aplicaciones específicas dependiendo del producto final deseado [24]. Los cuales son:

Tabla 2-6 de los tipos de pirólisis que se aplican en la gestión de neumáticos.

Pirólisis convencional	Pirólisis catalítica	Pirólisis rápida	Pirólisis lenta	Pirólisis al vacío	Pirólisis con microondas
Descompone los neumáticos a altas temperaturas en ausencia de oxígeno.	Utiliza catalizadores para reducir la temperatura de reacción y esto hace que mejore la selectividad del producto final.	Calienta los neumáticos de manera brusca a altas temperaturas para aumentar la producción de los aceites líquidos.	El calentamiento ocurre de manera gradual, esto favorece a la formación de los productos sólidos.	Este proceso se hace bajo presión reducida para así reducir la degradación térmica de los productos obtenidos y mejorar la calidad del aceite igual obtenido.	Este proceso utiliza la radiación electromagnética para así calentar los neumáticos, esto hace que la distribución de calor sea más uniforme.

Fuente: Elaboración propia basada en la investigación.

### 2.1.6. REACTORES DE PIRÓLISIS

Existen varios tipos de reactores de pirólisis, pero los más comunes son los de lecho fijo, lecho fluidizado y hornos rotatorios. [23].

- Los reactores de lecho fijo (FBR) se emplean principalmente para realizar procesos de pirólisis lenta por lotes. El material se somete a calentamiento con velocidades bajas, tiempos prolongados de residencia que pueden durar minutos hasta horas, lo que significa que requiere largos periodos de tiempo para completar la reacción y operan frecuentemente a temperaturas menores, también incorporan catalizadores frecuentemente de pellets colocados en posiciones fijas.
- Los lechos fluidizados realizan un proceso de pirólisis rápida, su tiempo de reacción es de milisegundos a segundos. Utilizan un flujo de gas para mantener las partículas sólidas suspendidas, lo que mejora la transferencia de calor y masa. Estos también ofrecen una distribución uniforme de temperatura.
  - Ventajas:
    - Ideales para procesar grandes cantidades de residuos.
    - Proporcionan productos de alta calidad, como el negro de carbón.
  - Desventajas:
    - Necesitan de un alto consumo de energía para mantener el flujo de gas.
    - Su operación es más compleja.
- El horno rotatorio consiste en un cilindro inclinado revestido con material refractario para proteger el acero de las altas temperaturas que gira lentamente mientras los neumáticos se descomponen, con la rotación es más fácil llegar a una mezcla homogénea y una mejor transferencia de calor.
  - Ventajas:
    - Tratan grandes residuos sólidos y eso facilita el manejo para los neumáticos completos.
    - Tienen una vida útil larga.
  - Desventajas:
    - Tienen un costo de operación más alto.
    - Tienen una transferencia térmica menos eficiente.

## **2.2. RECICLAJE MECÁNICO**

Es un método físico que convierte los neumáticos fuera de uso (NFU) en productos reutilizables mediante su reducción en trozos más pequeños, sin alterar su composición química. Estos se pueden utilizar para fabricar nuevos productos. [18] [19].

- Productos reutilizables:
  1. Caucho.
  2. Polvo fino.

Este método de reciclaje maximiza el aprovechamiento del caucho al mantener sus propiedades, como su durabilidad y resistencia, lo que permite que se reutilice de manera efectiva [18] [30].

### **2.2.1. ETAPAS DEL PROCESO**

#### **1. Recolección**

Los neumáticos son recogidos y limpiados para eliminar toda clase de residuos como la tierra y los residuos orgánicos, esto hace que sea más fácil manipularlo después. [29].

#### **2. Trituración**

Los neumáticos enteros se cortan en trozos más pequeños utilizando trituradoras industriales. Estos trozos tienen un tamaño entre 20 y 400 mm [29].

#### **3. Granulación**

En esta etapa se reducen progresivamente los trozos de neumáticos a partículas más pequeñas utilizando tecnologías como molinos de cuchillas, molinos de impacto o prensas. En este proceso se separan el acero y las fibras textiles para obtener caucho limpio de diferentes tamaños, dependiendo de los tamices utilizados en el cribado final. [29].

El caucho reciclado puede clasificarse en granulado (0.8-20mm) o polvo (menos de 0.8mm) Para producir el polvo de caucho existen dos métodos principales:

1. *Molienda criogénica*: Se enfría el material con nitrógeno líquido antes de triturarlo, facilitando la obtención de partículas finas.
2. *Granulación a temperatura ambiente*: Es el método más común, realizado sin enfriamiento adicional.
3. Separación de los componentes secundarios (Acero y fibra textil)

Para extraer el acero se utilizan imanes y para la separación de fibras textiles se puede hacer de dos maneras.

1. *Cintas balísticas o vibrantes*: Permiten que las fibras más ligeras, se separen del caucho y el acero debido a su movimiento vibratorio y la inclinación de la cinta.
2. *Mesas vibratorias*: Combinan el tamizado con corrientes de aire para mejorar la separación del caucho.

#### 4. Clasificación

En esta etapa en granulado o polvo de caucho obtenido se clasifica por sus tamaños, para sus aplicaciones posteriores. [29].



Figura 2-4: Proceso de reciclaje mecánico

Fuente: Signus.

## 2.2.2. APLICACIONES DE LOS NEUMÁTICOS RECICLADOS

Los neumáticos reciclados luego de pasar por su proceso tienen varias aplicaciones en varios sectores, estos se clasifican según el producto final obtenido [25] [30].

### 2.2.2.1. Asfalto modificado

El caucho reciclado se incorpora en el asfalto mediante el proceso de modificación de asfalto con caucho, lo que significa que se mezcla el caucho triturado con asfalto caliente [28] [30].

Tabla 2-7 sobre formas de incorporar el caucho al asfalto.

Proceso seco	Proceso húmedo
El caucho triturado se mezcla directamente con el asfalto caliente sin aditivos, lo que lo hace más económico, pero con propiedades limitadas.	El caucho se disuelve completamente en el asfalto utilizando un agente químico, lo que hace un asfalto de mejor calidad y más duradero, pero a un costo más alto.

Fuente: Elaboración propia basada en la investigación.



Figura 2-5: Proceso vía húmeda.

Fuente: Ligante asfáltico.

### Proceso Adición Polvo NFU al Asfalto por Via Seca



Figura 2-6: Proceso vía seca.

Fuente: Ligante asfáltico.

- Ventajas:
  - Mayor durabilidad y resistencia.
  - Reducción de la huella de carbono.
  - Mejora la resistencia al deslizamiento.
  - Reducción del ruido.
  - Sostenibilidad.

#### 2.2.2.2. Materiales para construcción

La incorporación de los neumáticos en estos materiales mejora las propiedades térmicas y acústicas. [28].

Algunos de los principales usos incluyen:

- Bloques y ladrillos.
  - Adoquines y pavimentos.
  - Mezclas para cimentación.
  - Elementos de jardinería.
- Ventajas:
    - Ahorro de recursos naturales.
    - Reducción de residuos.

### 2.2.2.3. Pavimentos de seguridad

Se utiliza como pavimento de seguridad para evitar lesiones por las caídas, al ser un pavimento que absorbe los impactos y tener una superficie amortiguadora.

Los gránulos del caucho se mezclan con resina especial formando una superficie continua lo que hace una capa flexible y resistente, este material se aplica en capas sobre el pavimento. [28].

Aplicaciones comunes:

- Parques infantiles.
- Pistas deportivas.
- Áreas de recreo y senderos.
  
- Ventajas:
  - Amortigua impactos.
  - Propiedades antideslizantes.
  - Mejora estética.
  - Fácil mantenimiento.

### 2.2.2.4. Jardinería y paisajismo

Se utiliza como material de relleno ya que es resistente a la intemperie. [28].

Algunas aplicaciones:

- Bordes de jardín.
- Césped artificial.
- Superficies de senderos.
- Almohadillas para jardinería.
- Material para patios y caminos.
  
- Ventajas:
  - Durabilidad.
  - Bajo mantenimiento.
  - Propiedades de amortiguación.

### 2.2.2.5. Sistema de drenajes y filtros

Con las propiedades de los neumáticos (durabilidad, resistencia, flexibilidad) se pueden utilizar para crear materiales que filtren el agua de las infraestructuras. [28].

Aplicaciones comunes:

- Drenaje para carreteras y caminos.
  - Filtros para tratamientos de agua.
  - Drenajes para jardines y techos verdes.
  - Barreras para retener el agua en áreas urbanas.
- 
- Ventajas:
    - Mejora el drenaje y filtración.
    - Absorción y retención.

3. CAPÍTULO III

PLAN INTEGRAL PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DE NEUMÁTICOS

La adecuada gestión de los neumáticos en desuso es fundamental para reducir su impacto ambiental y fomentar las prácticas sostenibles. Este plan integral propone acciones específicas para el reciclaje, reutilización y la promoción de conductas responsables en su manejo. También incluye un sistema de indicadores que permita evaluar el impacto ambiental, social y operativo de las estrategias establecidas, así garantizar una gestión más eficiente y alineada con los principios de sostenibilidad para evitar los efectos negativos asociados a este tipo de residuos. [35].

### **3.1. SITUACIÓN ACTUAL DE LA GESTIÓN DE NEUMÁTICOS**

En Chile se generan alrededor de 6,6 millones de neumáticos anualmente, lo que significa aproximadamente 140 mil toneladas de desechos. De este total solo el 17% se gestiona correctamente. La ley REP busca promover la recolección y reutilización de residuos para reducir su impacto ambiental [36] [37].

#### **- LEY REP**

Ley de responsabilidad extendida del productor establece que las empresas que generan residuos deben encargarse de su recolección, reciclaje y transformación en nuevos materiales y energía, las empresas que importan neumáticos deberán reciclar el 25% de los neumáticos y recolectar el 50%, el porcentaje va subiendo progresivamente hasta llegar al 90% en el año 2030, ya que esta Ley busca reducir la cantidad de residuos promoviendo el cuidado del medio ambiente. Impulsa a la economía circular lo que hace que vuelvan a tener valorización al final de su vida útil los productos [38] [39]. Se establecen dos categorías de neumáticos. [40].

Tabla 3-1 de categorías de los neumáticos.

Categoría A - Neumáticos comunes	Categoría B - Neumáticos mineros
Incluye a los neumáticos que tengan un aro inferior a 57 pulgadas, con excepción los que tengan un aro igual a 45 pulgadas, a 49 pulgadas y a 51 pulgadas.	Incluye neumáticos que tengan un aro igual a 45 pulgadas, a 49 pulgadas, a 51 pulgadas y aros iguales o mayores a 57 pulgadas.

Fuente: Elaboración propia basada en la investigación.



Figura 3-1: Categorías de neumáticos según el decreto N°8/2021.

Fuente: reciclaje.emprendamosjuntos.cl

### 3.1.1. MÉTODOS DE DISPOSICIÓN

Los métodos de disposición son varios, los cuales algunos no son sostenibles. [43].

Tabla 3-2 de los métodos de disposición más utilizados de los NFU.

Acumulación en vertederos	Quema	Reciclaje mecánico	Recauchaje	Reciclaje energético
Los neumáticos terminan en vertederos formando acumulación, estos tardan años en degradarse.	Son quemados para así poder deshacerse de ellos, pero esto causa emisiones tóxicas.	Se tritura el caucho para así obtener pavimentos asfálticos, lo que se hacen pisos de gomas, suelos para parques, etc.	Se busca extender la vida útil de los neumáticos renovando su banda de rodadura.	Los neumáticos se utilizan para combustible, como en la industria cementera, así se reducen los combustibles fósiles.

Fuente: Elaboración propia basada en la investigación.

- Existen varias tecnologías y centros de reciclajes para los NFU, está la planta Arrigoni Ambiental. Lo que tiene una capacidad de reciclar hasta el 7% de los neumáticos generados anualmente en el país, por medio del proceso de pirólisis. [35].

### **3.1.2. IMPACTO AMBIENTAL DE LOS NFU**

- Contaminación de suelo y aguas

Los neumáticos fuera de uso liberan toxinas que pueden contaminar el suelo y el agua, así afectando los ecosistemas y la calidad de las fuentes de agua. [41]

- Emisiones de gases de efecto invernadero

La acumulación de los NFU genera metano en los vertederos y si estos se queman, liberan los gases contaminantes.

- Problemas de acumulación

Ocupan grandes volúmenes en vertederos, que contribuyen a su saturación y genera los focos de proliferación de insectos.

- Riesgo de incendios

Son fácilmente inflamables, lo que puede provocar incendios difíciles de controlar, afectando al aire y salud.

### **3.2. INCORPORAR LA ECONOMÍA CIRCULAR**

Un sistema de gestión sostenible debe enfocarse en la reutilización, el reciclaje y la recuperación de los materiales de los neumáticos. Las tecnologías emergentes, como la pirólisis y el reciclaje mecánico, son claves para maximizar su uso y reducir su impacto ambiental. La integración de estas soluciones con políticas y normativas adecuadas impulsará una gestión más eficiente y ecológica.

Las 3R son fundamentales para una gestión eficiente de los residuos, especialmente para los NFU, que tienen un alto impacto ambiental.

- Reducir: Minimizar la cantidad de neumáticos generados, por ejemplo, a través de mejoras en el diseño para que sean más duraderos y fáciles de reciclar, también implica reducir el consumo de neumáticos innecesarios o de mala calidad.
- Reutilizar: Los neumáticos pueden encontrar nuevas aplicaciones antes de ser reciclados. Se pueden usar en la fabricación de otros productos. Como pavimentos, mobiliarios urbanos y recauchando neumáticos viejos para prolongar su vida útil.
- Reciclar: Permite recuperar materiales valiosos como el caucho, acero y aceites, que se pueden utilizar nuevamente en otros productos industriales.



Figura 3-2: Etiquetas de las 3R.

Fuente: aseca.com

Fomentar el diseño sostenible de neumáticos consiste en ver su fabricación para reducir su impacto ambiental, algunas estrategias podrían ser:

- Uso de materiales reciclables y renovables.
- Mayor vida útil.
- Facilitar el reciclaje.



Figura 3-3: Estrategia propuesta por las 3R.

Fuente: empresasporelclima.es

En Chile hay varias normativas que regulan la gestión con el fin de reducir el impacto ambiental y así promover su manejo adecuado. [38] [39].

- Ley REP.
- Decreto 8: Regula la gestión ambiental de los neumáticos fuera de uso cubriendo aspectos como almacenamiento, reciclaje y valorización, describe el procedimiento para manejar los residuos de manera que no afecte negativamente al medio ambiente.
- Norma ISO internacional: Chile sigue normativas internacionales como la ISO 14001 que es para la gestión ambiental y la ISO 9001 que es para la gestión de calidad. Estas normas aseguran que las empresas implementan prácticas responsables. [44].



Figura 3-4: Normas ISO.

Fuente: sustratosextremadura.com

### **3.3. PROPONER ESTRATEGIAS DE GESTIÓN SOSTENIBLES**

- El establecer puntos de acopio para los NFU es una estrategia para la correcta gestión y reciclaje.

#### 3.3.1. Ubicación estratégica

Los puntos de acopio deben estar cerca de los lugares donde generen neumáticos, como los talleres mecánicos o estaciones de servicios. Esto puede facilitar la recolección.

#### 3.3.2. Infraestructura adecuada

Es importante contar con espacios bien organizados y seguros para almacenar los neumáticos, asegurándose que no les afecte los factores como la lluvia y los incendios.

#### 3.3.3. Cumplimiento de las normas

Los puntos de acopio deben seguir las leyes y regulaciones ambientales, asegurando que los neumáticos serán gestionados de forma segura. [44].

- También establecer una red de logística de transporte de los neumáticos hacia las plantas que lo están tratando es una buena estrategia, se deben emplear vehículos apropiados para asegurar que no se dañen en el traslado, esto podría ser como la gestión de recoger la basura, tener días específicos para poder desecharlos y pase el transporte. Así uno evita tirarlos en los vertederos y acumular los neumáticos.

- Identificar tecnologías adecuadas de los NFU para su reciclaje y reutilización es una buena alternativa para aprovechar al máximo sus materiales la final de su vida útil.

Tabla 3-3 de tecnologías para tratar el neumático.

Reutilización	Reciclaje mecánico	Reciclaje químico	Valorización energética
Se restaura la banda de rodadura del neumático usado, así prolongando su vida útil.	Se trituran los neumáticos en trozos o polvo, sirven para hacer pistas deportivas, suelos de parques, asfaltos y rellenos.	1. Pirólisis: se descomponen los neumáticos en ausencia de oxígeno para obtener productos como aceite, carbón, gas o como energía. 2. Desvulcanización: Se recupera el caucho de los neumáticos para crear nuevos productos.	Los neumáticos se queman en hornos para generar calor así se usa para reemplazar otros combustibles. También se incineran de forma controlada para producir electricidad o calor.

Fuente: Elaboración propia basada en la investigación.

De estas cuatro tecnologías las más utilizadas es la pirólisis y el reciclaje mecánico, por lo tanto, se hará un análisis comparativo de costos en base a las máquinas/plantas que fabrican y los beneficios medioambientales de estas dos técnicas. Estos datos son investigados de Henan Doing Maquinaria S.L, un fabricante líder de reciclaje de neumáticos, caucho/polvo y en pirolisis de neumáticos. También de la empresa Tire recycling machines. [45] [46] [47].

**Pirólisis:** La inversión inicial es mayor debido a los equipos que se utilizan, ya que esta opera a altas temperatura, puede variar ya que pueden ser plantas pequeñas y plantas grandes, esta puede generar productos de mayor valor comercial, pero aun así su costo de operación es alto.

- Planta pequeña: 5.000 a 10.000 toneladas/año puede costar \$3.000.000 USD.
- Planta grande: 50.000 a 100.000 toneladas/años puede costar \$15.000.000 USD.

Los productos ya obtenidos del proceso tienen un impacto de valor alto al nivel comercial

- Aceite pirolítico: \$1000 USD por tonelada esto varía por la pureza.
- Carbón negro: \$700 USD por tonelada.
- Gas pirolítico: \$150 USD por tonelada, este sirve como combustible para la misma planta.

Beneficios medioambientales:

- Genera aceites que pueden ser refinados y así utilizados como combustible.
- El carbón negro se utiliza para la fabricación de caucho.
- Evita la liberación de contaminantes al medioambiente.
- Reduce la cantidad de residuos sólidos finales.

**Reciclaje mecánico:** La inversión inicial depende de los procesos y las máquinas que se utilizaran, como las trituradoras o el proceso de separación del caucho y polvo, sus costos son bajos ya que este proceso no necesita altas temperaturas como la pirólisis.

- Planta grande: 80.000 toneladas/año puede costar \$900.000 USD.

Los productos reciclados varían según el comercio.

- Caucho: \$250 USD por tonelada.
- Acero: \$150 USD por tonelada.
- Fibras textiles: \$40 USD este suele ser más bajo el valor.

Beneficios medioambientales:

- Reduce la cantidad de los neumáticos en los vertederos.
- Con la separación de los materiales se pueden reutilizar en construcciones de carreteras o productos de caucho.
- No emite gases tóxicos.

## Resumen de un análisis de costos de estas tecnologías.

Reutilización	Reciclaje mecánico	Reciclaje químico	Valorización energética
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relativamente bajo, ya que no necesitan instalaciones complejas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es más accesible ya que los equipos son más simples, los gastos operativos son bajos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto, requiere equipos especializados y con mucha energía para funcionar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo, utiliza infraestructura existente, se aprovecha el poder calorífico del caucho</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia basada en la investigación.

## Resumen impacto ambiental

			
Requiere menos energías	Disminuye el volumen en los vertederos y evita los problemas de proliferación e incendios	Genera baja emisión de gases y la reutilización de los subproductos	Emisiones minimizadas mediante la tecnología de filtrado

Fuente: Elaboración propia basada en la investigación.

- Fomentar prácticas responsables es lo ideal para poder impulsar acciones serias, mediante la educación que se informa sobre los efectos negativos de la mala disposición de los neumáticos. Además, incentivar la utilización de materiales reciclados en sectores como la construcción o fabricación de nuevos productos, promoviendo la economía circular y el aprovechamiento de los recursos. Informar sobre el uso de puntos de acopio de los neumáticos es esencial para que no terminen acumulados en cualquier parte provocando acumulación o basureros.

### **3.4. INDICADORES PARA EVALUAR EL IMPACTO AMBIENTAL**

Los indicadores ambientales son herramientas que proporcionan información clave sobre el estado y la evolución de los elementos como el agua, el aire, la biodiversidad, los recursos naturales y los residuos. Su propósito es ayudar a analizar la situación ambiental de un lugar, conectándola con factores económicos. Éstos facilitan la toma de decisiones más informadas promoviendo cambios y gestión mejoradas. Para los NFU se deben enfocar en los aspectos del ciclo de vida y los procesos de reciclaje. [14] [44].



Figura 3-5: Estrategias de sostenibilidad.

Fuente: um.com.co

#### **3.4.1. Reducción de residuos**

Mide cuantos neumáticos se reciclan y reutilizan en vez de ser llevados a vertederos y aumentar su acumulación. Este indicador refleja las tecnologías de reciclaje.

#### **3.4.2. Consumo de energías y recursos**

Analiza cuánta energía y recursos se utilizan en los procesos de reciclaje, comparando la eficiencia energética de diferentes métodos como la trituración o recauchado. Por ejemplo, la cantidad de energía utilizada por cada tonelada de neumáticos ya procesados.

#### 3.4.3. Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)

Evalúa las emisiones generadas en el proceso de reciclaje, como la pirólisis y la incineración, estas las compara con las emisiones de otros métodos. Por ejemplo, mide la cantidad de CO<sub>2</sub> emitido por tonelada de un neumático reciclado.

#### 3.4.4. Calidad de los productos ya reciclados

Mide la efectividad del material reciclado obtenido, como el caucho granulado y su reintegración en la industria.

#### 3.4.5. Impacto ecológico

Evalúa el impacto que los procesos de reciclaje tienen sobre el medio ambiente, tal como la contaminación del suelo, agua y aire. Por ejemplo, niveles de contaminación por metales pesados cercanos a plantas de reciclaje.

#### 3.4.6. Valorización y reutilización

Mide cuántos neumáticos son reciclados y reutilizados comparando con los que se incineran o desechan. Por ejemplo, porcentaje de neumáticos reciclados frente a aquellos que se envían a vertederos o incineradoras.

Estos indicadores permiten tener un seguimiento y evaluación detallada de las prácticas de reciclaje y su impacto en la sostenibilidad.

## **CONCLUSIONES**

La gestión de los neumáticos fuera de uso (NFU) es importante, ya que, si no se maneja adecuadamente, estos residuos no biodegradables pueden provocar problemas ambientales como la contaminación del suelo, del agua, emisiones tóxicas como compuestos orgánicos volátiles (COVs) y CO<sub>2</sub>, y problemas de acumulación. La economía circular en base a la gestión de los NFU se encarga de darles una alternativa sostenible mediante la reutilización, reciclaje y transformación.

En Chile existen normas que regulan la gestión de los residuos como la Ley de Responsabilidad Extendida del Productor (REP), esta obliga a las empresas a ser responsables de los neumáticos que ellos producen, aun así, hay que aplicar estrategias para que puedan mejorar la recolección y tratamiento de estos, fomentando sobre las prácticas responsables sobre la mala disposición de los neumáticos.

De las tecnologías analizadas en este trabajo, (reciclaje mecánico y pirolisis), ofrecen soluciones viables para transformar los NFU en recursos valiosos. Se encuentra que la pirolisis permite recuperar un 43% de aceite pirolítico, un 41% de negro de carbón y un 16% de gas de pirolisis reutilizable por cada 10.000 toneladas, teniendo una mayor inversión inicial debido a los equipos que se utilizan para mantener la temperatura elevada y controlar las emisiones. Ofreciendo productos con mayor valor comercial, generando una mayor rentabilidad a largo plazo. Por otro lado, el reciclaje mecánico aprovecha el caucho para aplicaciones como asfaltos modificados y materiales de construcción, es más económico en términos de costos de inversión. Pero el ingreso de los productos reciclados es menor ya que la calidad de los materiales recuperados no es tan alta.

La información recopilada en este trabajo permite comprender que es fundamental desarrollar estrategias para medir el impacto ambiental, se pueden utilizar indicadores para evaluar, por ejemplo, el cuanto se está reciclando, o cuánto se reduce la contaminación o acumulación de los vertederos. Manejar los NFU de manera sostenible genera oportunidades económicas. A partir de tecnologías que no generan tanto daño en el medio ambiente.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] CONFORNAUTO. La historia del neumático: Una evolución sorprendente. [en línea]. <<https://www.confortauto.com/blog/confortauto/la-historia-del-neumatico-una-evolucion-sorprendente/?srsltid=AfmBOooYEFVLzq4BEIKpPTz8QKnXQ7C2LGyN4ML8efivmQqtHGGS-3fK>>. [consulta: 22 de octubre de 2024].
- [2] PÉREZ BELLO, Miguel Ángel, Tecnología de la suspensión, dirección y ruedas, España: Cie inversiones Editoriales Dossat 2000 S.L, 2004. ISBN 84-89656-56-8.
- [3] REVISTA RTT. ¿Sabes cuáles son las partes de un neumático? [en línea]. <<https://revistartt.cl/sabes-cuales-son-las-partes-de-un-neumatico-2/>>. [consulta: 30 de octubre de 2024].
- [4] GOODYEAR. How tires are made. [en línea]. <[https://www.goodyear.eu/es\\_es/consumer/learn/how-tires-are-made.html](https://www.goodyear.eu/es_es/consumer/learn/how-tires-are-made.html)>. [consulta: 30 de octubre de 2024].
- [5] CONTINENTAL NEUMÁTICOS. Tire production. [en línea]. <<https://www.continental-neumaticos.es/b2c/tire-knowledge/tire-production/>>. [consulta: 30 de octubre de 2024].
- [6] CONTINENTAL NEUMÁTICOS. Tire components. [en línea]. <<https://www.continental-neumaticos.es/b2c/tire-knowledge/tire-components/>>. [consulta: 30 de octubre de 2024].
- [7] ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO (OIT). Presentación sobre neumáticos. [en línea]. <[https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/%40americas/%40ro-lima/%40ilo-buenos\\_aires/documents/presentation/wcms\\_559575.pdf](https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/%40americas/%40ro-lima/%40ilo-buenos_aires/documents/presentation/wcms_559575.pdf)>. [consulta: 30 de octubre de 2024].
- [8] BAZÁN Mendoza, José Carlos. Control de calidad en la fabricación de materiales de caucho para la industria de reencauche de neumáticos. Ingeniero Químico. Callao, Perú: Universidad Nacional del Callao, 2017.
- [9] WORLD ECONOMIC FORUM. ¿Cómo podemos descarbonizar la industria de neumáticos para un futuro sostenible? [en línea]. <<https://es.weforum.org/stories/2024/01/como-podemos-descarbonizar-la-industria-de-neumaticos-para-un-futuro-sostenible/>>. [consulta: 04 de noviembre de 2024].

- [10] Proceso de fabricación del neumático. [en línea].  
<<https://es.scribd.com/document/331890905/Proceso-de-Fabricacion-Del-Neumatico>>.  
[consulta: 04 de noviembre de 2024].
- [11] Automoción y transporte. [en línea].  
<[https://www.acta.es/medios/articulos/automocion\\_y\\_transporte/046083.pdf](https://www.acta.es/medios/articulos/automocion_y_transporte/046083.pdf)>.  
[consulta: 04 de noviembre de 2024].
- [12] LA NACIÓN. Como se fabrica un neumático: De la materia prima al producto listo para usar. [en línea]. <<https://www.lanacion.com.ar/autos/al-volante/como-se-fabrica-un-neumatico-de-la-materia-prim-a-al-producto-listo-para-usar-nid10122021/>>.  
[consulta: 04 de noviembre de 2024].
- [13] TNU. Greenval technologies exploran capacidades sostenibles del negro de humo obtenido por pirólisis de neumáticos fuera de uso. [en línea].  
<<https://www.posventa.com/texto-diario/mostrar/4536381/tnu-greenval-technologies-exploran-capacidades-sostenibles-negro-humo-obtenido-pirolisis-neumaticos-fuera>>.  
[consulta: 06 de noviembre de 2024].
- [14] Indicadores ambientales: que son y para que sirven. [en línea].  
<<https://www.ecoembesthecircularcampus.com/indicadores-ambientales-que-son-y-para-que-sirven/>>. [consulta: 06 de noviembre de 2024].
- [15] Unidad 19: Ruedas, TPMS y neumáticos. [en línea].  
<<file:///C:/Users/fernando/Downloads/Unidad-19-Ruedas-Tpms-Neumaticos.pdf>>.  
[consulta: 06 de noviembre de 2024].
- [16] FEMPA. Neumáticos de invierno. [en línea]. <<https://www.fempa.es/wp-content/uploads/oldfiles/File/Colectivos/Automocion/DOSSIER%20Neumaticos%20de%20invierno.pdf>>. [consulta: 10 de noviembre de 2024].
- [17] Neumáticos RunFlat. [en línea]. <<https://www.neumaticoslíder.es/consejos-neumaticos/neumaticos-runflat#:~:text=El%20neum%C3%A1tico%20antipinchazo%20es%20un,caso%20de%20p%C3%A9rdida%20de%20presi%C3%B3n>>. [consulta: 10 de noviembre de 2024].
- [18] UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE. Instalación de una planta de pirolisis para valorización de neumáticos fuera de uso. [en línea].  
<<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2008/bmfci339r/doc/bmfci339r.pdf>>.  
[consulta: 10 de noviembre de 2024].
- [19] AMPHOS 21. Diagnostico de sustentabilidad de NFU. [en línea].  
<<https://economiecirculaire.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2019/06/8.-Diagnostico-de-sustentabilidad-de-NFU.-Amphos21-2017.pdf>>. [consulta: 11 de noviembre de 2024].

- [20] ECO.ING. Evaluación de impactos económicos, ambientales y sociales. [en línea]. <<https://economiecircular.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2023/04/1.-Evaluacion-de-impactos-economica-ambientales-y-sociales.-ECO.ING-2011.pdf>>. [consulta: 11 de noviembre de 2024].
- [21] Estudio en ScienceDirect. [en línea]. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378382001001746>>. [consulta: 11 de noviembre de 2024].
- [22] Artículo en MDPI sobre poliremos. [en línea]. <<https://www.mdpi.com/2073-4360/15/7/1604>>. [consulta: 12 de noviembre de 2024].
- [23] Artículo en springer sobre reciclaje. [en línea]. <<https://link.springer.com/article/10.1007/s40518-014-0019-0>>. [consulta: 12 de noviembre de 2024].
- [24] Artículo en ScienceDirect sobre tecnologías emergentes. [en línea]. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128522000314#bib0140>>. [consulta: 15 de noviembre de 2024].
- [25] Energías renovables y sustentabilidad. [en línea]. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032113001408>>. [consulta: 15 de noviembre de 2024].
- [26] SIHAI ENERGY TECH. Continuous Rubber Powder Pyrolysis Plant. [en línea]. <[https://www.sihaienergytech.com/products/continuous-rubber-powder-pyrolysis-plant.html?gad\\_source=1&gclid=CjwKCAiAxqC6BhBcEiwAlXp452hYJAX1NcAFTKN2vk-Dd5R-mhX7KxSvIYcNffCeDvLEk7efOikkrxoCOn4QAvD\\_BwE](https://www.sihaienergytech.com/products/continuous-rubber-powder-pyrolysis-plant.html?gad_source=1&gclid=CjwKCAiAxqC6BhBcEiwAlXp452hYJAX1NcAFTKN2vk-Dd5R-mhX7KxSvIYcNffCeDvLEk7efOikkrxoCOn4QAvD_BwE)>. [consulta: 15 de noviembre de 2024].
- [27] SCIENCEDIRECT. Recycling of tires: Sustainable solutions for the future. [en línea]. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343723020535>>. [consulta: 15 de noviembre de 2024].
- [28] SIGNUS. Guía cityre. [en línea]. <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/[https://www.signus.es/wp-content/uploads/2024/05/Guia\\_Cityre.pdf](https://www.signus.es/wp-content/uploads/2024/05/Guia_Cityre.pdf)>. [consulta: 18 de noviembre de 2024].
- [29] NEOMATIQUE. ¿Cuál es el proceso de reciclaje de los neumáticos? [en línea]. <<https://www.neomatique.es/blog/cual-es-el-proceso-de-reciclaje-de-los-neumaticos>>. [consulta: 18 de noviembre de 2024].
- [30] SIGNUS. Reciclado de neumáticos: Transformación de un residuo en un recurso. [en línea]. <<https://www.signus.es/wp-content/uploads/2018/04/reciclado-de-neumaticos-transformacion-de-un-residuo-en-un-recurso.pdf>>. [consulta: 19 de noviembre de 2024].

- [31] RESEARCHGATE. Factibilidad técnica y económica del reciclaje de neumáticos mineros fuera de uso mediante ozono. [en línea].  
<[https://www.researchgate.net/publication/359143171\\_Factibilidad\\_Tecnica\\_y\\_Economica\\_del\\_Reciclaje\\_de\\_Numaticos\\_Mineros\\_Fuera\\_de\\_Uso\\_mediante\\_Ozono](https://www.researchgate.net/publication/359143171_Factibilidad_Tecnica_y_Economica_del_Reciclaje_de_Numaticos_Mineros_Fuera_de_Uso_mediante_Ozono)>.  
[consulta: 19 de noviembre de 2024].
- [32] BESTON GROUP. Tyre Pyrolysis oil. [en línea].  
<<https://www.bestongroup.com/es/industry-news/tyre-pyrolysis-oil/>>. [consulta: 19 de noviembre de 2024].
- [33] BESTON ECO. Planta de pirolisis de neumáticos. [en línea].  
<<https://www.bestoneco.com/planta-pirolisis-neumaticos/>>. [consulta: 22 de noviembre de 2024].
- [34] TNU. Pirolisis: El futuro sostenible del neumático fuera de uso. [en línea].  
<<https://www.tnu.es/pirolisis-el-futuro-sostenible-del-neumatico-fuera-de-uso/>>.  
[consulta: 22 de noviembre de 2024].
- [35] ARRIGONI AMBIENTAL. Planta de reciclaje NFU por pirolisis. [en línea].  
<<https://arrigoniambientalnfu.cl/servicios/planta-de-reciclaje-nfu-por-pirolisis/>>.  
[consulta: 22 de noviembre de 2024].
- [36] LA TERCERA. Desde mañana la Ley de reciclaje será una realidad: Comienza con los neumáticos. [en línea]. <<https://www.latercera.com/pulso/noticia/desde-manana-la-ley-de-reciclaje-sera-una-realidad-comienza-con-los-neumaticos/KFGO5IH72JE3FEEZJAD2QW3Q6U/>>. [consulta: 23 de noviembre de 2024].
- [37] BIOBIOCHILE. Empresas crean sistemas que permite reutilizar neumáticos para generar materias primas secundarias. <<https://www.biobiochile.cl/especial/aqui-tierra/noticias/2021/10/29/empresas-crean-sistema-que-permite-reutilizar-neumaticos-para-generar-materias-primas-secundarias.shtml>>. [consulta: 23 de noviembre de 2024].
- [38] DERCOCHILE. Ley REP: Neumáticos en desuso.  
<<https://www.derco.cl/comunicaciones/ley-rep-neumaticos-en-desuso>>. [consulta: 23 de noviembre de 2024].
- [39] PAIS CIRCULAR. Ley de Responsabilidad extendida del productor (REP): Hoy se inician metas de recolección y valorización de neumáticos.  
<<https://www.paiscircular.cl/economia-circular/ley-de-responsabilidad-extendida-del-productor-rep-hoy-se-inician-metas-de-recoleccion-y-valorizacion-de-neumaticos/>>.  
[consulta: 23 de noviembre de 2024].
- [40] MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE (MMA). Ley REP: Se publicó decreto que obliga a empresas importadoras de neumáticos a recolectar y reciclar el 90% de ellos. [en línea]. <<https://mma.gob.cl/ley-rep-se-publico-decreto-que-obliga-a-empresas->

importadoras-de-neumaticos-a-recolectar-y-reciclar-el-90-de-ellos/ >. [consulta: 26 de noviembre de 2024].

[41] MMA. Neumáticos. [en línea].

<<https://economiacircular.mma.gob.cl/neumaticos/>>. [consulta: 26 de noviembre de 2024].

[42] MMA. Página Oficial del ministerio del Medio Ambiente. [en línea].

<<https://mma.gob.cl/>>. [consulta: 28 de noviembre de 2024].

[43] UNIVERSIDAD DE CHILE. Instalación de una planta de pirolisis para la valorización de neumáticos fuera de uso. [en línea].

<<https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/114707/Instalacio%cc%81n-de-una-planta-de-piro%cc%81lisis-para-la-valorizacio%cc%81n-de-neuma%cc%81ticos-fuera-de-uso-para-la-empresa-Reinvent.pdf?sequence=4&isAllowed=y>>. [consulta: 28 de noviembre de 2024].

[44] HSE SOFTWARE. Indicadores de cumplimiento ambiental y gestión de residuos más implementados. [en línea]. <<https://hse.software/2021/08/05/indicadores-de-cumplimiento-ambiental-y-gestion-de-residuos-mas-implementados/>>. [consulta: 28 de noviembre de 2024].

[45] WASTE TYRE OIL. Tyre pyrolysis plant cost. [en línea]

<[https://es.wastetireoil.com/Pyrolysis\\_plant/Pyrolysis\\_Plant/tyre\\_pyrolysis\\_plant\\_cost\\_347.html](https://es.wastetireoil.com/Pyrolysis_plant/Pyrolysis_Plant/tyre_pyrolysis_plant_cost_347.html)>. [consulta: 29 de noviembre de 2024].

[46] TIRE RECYCLING MACHINES. Automatic waste tire pyrolysis plant. [en línea].

<<https://tirerecyclingmachines.com/product/Automatic-Waste-Tire-Pyrolysis-Plant.html>>. [consulta: 29 de noviembre de 2024].

[47] TIRE RECYCLING MACHINES. Página principal. [en línea].

<<https://tirerecyclingmachines.com/#get-quote>>. [consulta: 29 de noviembre de 2024].