



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

**UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA DEPARTAMENTO DE
QUIMICO Y MEDIO AMBIENTE CONCEPCIÓN – CHILE**

PIROLISIS DE NEUMATICOS FUERA DE USO.

Trabajo de Titulación para optar al Título
de ingeniería en EJECUCIÓN QUIMICA
MENCION CONTROL.

Alumno:
Carla Danitza Carrasco Zapata.

Profesor Guía:
Cristian Pereira.

2023

DEDICATORIA.

En este proceso quiero agradecer a Dios por estar conmigo en todo momento y permitir terminar esta etapa académica, a mi mamá que ha sido un pilar fundamental para poder estudiar, a mi hijo, papá y hermanas, gracias por apoyarme en todo momento ya sea de una u otra forma, que sin ustedes todo hubiera sido más difícil.

A mi pololo que me ha tenido una infinidad de paciencia en las últimas semanas académica y a mi compañero y amigo Matías que ha hecho que mi camino por la universidad sea mas divertido en el cual he encontrado apoyo emocional cuando me he sentido colapsada académicamente.

RESUMEN.

En este trabajo se da a conocer sobre la pirolisis de NFU, componentes de la materia prima, procesos de pirolisis, productos que se forman, como influyen los parámetros en el producto final y normativas ambientales para las empresas de pirolisis de neumáticos en Chile.

INDICE.

1-	INTRODUCCIÓN.	8
2-	NEUMATICOS FUERA DE USO (NFU).	10
2.1-	Parque de vehículos.	10
2.2-	Composición del neumático.	11
3-	PIROLISIS	17
3.1-	Definición general de pirolisis.	17
3.2-	Pirólisis en neumáticos.	17
3.2.1-	Productos de pirolisis de neumático.	19
3.3-	Factores que influyen en el rendimiento de la pirolisis.	20
4-	PROCESO PIROLISIS DE NEUMATICO.	22
4.1-	Diagrama de proceso.	23
4.2-	Pirolisis lenta	24
4.3-	Pirólisis rápida.	25
4.4-	Aspecto técnico.	26
5-	NORMATIVA PARA UNA PLANTA DE PIROLISIS DE NEUMÁTICO EN CHILE.	29
6-	CONCLUSIÓN.	32

Índice de ilustración.

Ilustración 1 Anatomía de un neumático. (neumaticoskm0).	12
Ilustración 2 Estructura molecular caucho natural.	13
Ilustración 3 Estructura molecular caucho butadieno. (Zarini,2011).	13
Ilustración 4 Estructura molecular caucho Estireno-butadieno (Zarini, 2011).	13
Ilustración 5 Diagrama de proceso pirolisis de neumáticos. (Elaboración propia).	23
Ilustración 6 Comparación de parametros para pirolisis lenta y rapida.(Mejía Madrigal, S. A., & Upegui Sosa, S. A. (2021)).	26

Índice de tablas.

Tabla 2 composición de un neumático (Muzenda, 2014).	14
Tabla 3 composición de un neumático según el tipo de vehículo. (Muzenda, 2014).	14
Tabla 4 de gases que se forman en el proceso de pirolisis.	18
Tabla 5 Propiedades fisicoquímica del líquido pirolítico (Li et al,2004).	19
Tabla 6 Componentes en distintas T°. (Muzenda., 2014).	21
Tabla 7 Valores límites de emisión para la incineración (Decreto Supremo 29/2013 del Ministerio del Medio Ambiente).	30
Tabla 8 Concentraciones máximas permisibles para determinar la toxicidad de un residuo (: Decreto Supremo N°148/2004 del Ministerio de Salud).	31
Tabla 9 Niveles máximos permitidos de Presión Sonora Corregida en DB. (DS N°38, 2014).	31

Índice de gráfico.

Grafico 1 : Vehículos en circulación por región (Anac).	10
Grafico 2 Vehículo en circulación por tipo de transporte (porcentaje 2021).	11

SIGLA Y SIMBOLOGIA.

NFU: Neumático fuera de uso.

SBR: Estireno-butadieno.

IR: Polisoprenos.

BR: Polibutadienos.

N: Nitrógeno.

CO: Monóxido de carbono.

NO_x: Óxidos de nitrógeno

H₂: Dihidrógeno

CH₄: Metano

C_nH_m: Hidrocarburos.

CO₂: Dióxido de carbono.

C: Carbono.

H: Hidrógeno.

S: Azufre.

O: Oxígeno.

Cox: Ciclooxygenasa

H₂S: Ácido sulfhídrico.

MP: Material particulado.

SO₂: Dióxido de azufre.

NO_2 : Dióxido de nitrógeno

COT: Carbono orgánico total.

Cd: Cadmio

Hg: Mercurio.

Be: Berilio

Pb: Plomo.

Zn: Zinc

As: Arsénico.

Ni: Nitrógeno.

Se: Selenio.

Te: Telurio.

Sb: Antimonio.

Cr: Cromo.

Mn: Manganeseo.

V: Vanadio.

HCL: Ácido clorhídrico.

HF: Fluoruro de hidrógeno.

C_6H_6 : Benceno.

SBR: Estireno-butadieno.

IR: Polisoprenos sintéticos.

BR: Polibutadienos.

INTRODUCCIÓN.

En los últimos años a incrementado la cantidad de residuos de neumáticos en el mundo siendo este foco de contaminación ambiental. Los procesos de validación de este residuo no abarcan la cantidad necesaria de NFU para mitigar la cantidad de residuos que se generan.

Los neumáticos tienen propiedades llamativas para la obtención de productos del interés comercial e industrial, sin embargo, también tienen mucho contaminante los cual son difícil de procesar cumpliendo con las normas ambientales. Pero han hecho varios estudios sobre la pirolisis de NFU en donde se dio a conocer que es un proceso que se rige por parámetros específicos dependiendo el producto a obtener. El reactor es un equipo industrial que es el corazón de este proceso, sin embargo, el tipo de reactor a utilizar dependerá del producto que se quiera generar a mayor escala.

En este trabajo veremos detalladamente como es el proceso de pirolisis de NFU, los parámetros que más influyen en la composición del producto final, aspectos técnicos a considerar y la normativa ambiental para la instalación de una planta de pirolisis en Chile.

Objetivo general: Dar a conocer la técnica de pirolisis de neumáticos, sus procesos y parámetros.

Objetivo específico 1: Proceso de pirolisis de neumáticos y sus productos.

Objetivo específico 2: Aspectos técnicos asociados a la pirolisis.

Objetivo específico 3: Normativa asociada para una planta de pirolisis en Chile.

CAPITULO 1.

Neumáticos fuera de uso (NFU)

2.1- Parque de vehículos.

El automóvil se ha convertido en un medio de transporte indispensable para el hombre generando un aumento de este artículo con el pasar de los años. Un estudio realizado por “Anac” dice que los vehículos livianos y medianos que circulan por las calles y autopistas de Chile alcanzo los cinco millones y medio en 2021, lo que implica un aumento de 4,2%, frente al año anterior, la tasa de motorización en Chile alcanza 3,6 habitantes por vehículo.

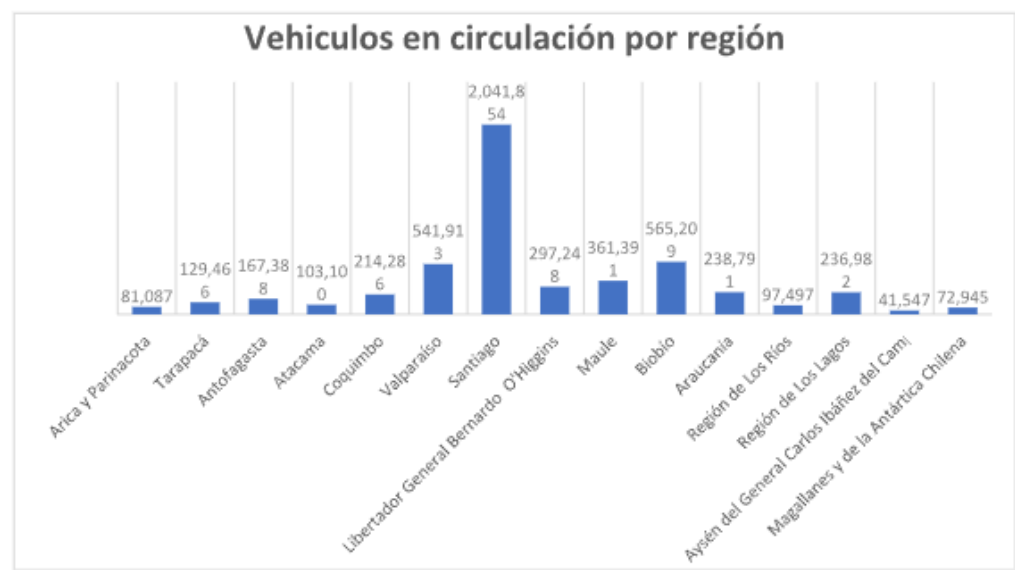


Grafico 1 : Vehículos en circulación por región (Anac).

En el grafico 1, podemos analizar que en la región de Aysén es donde se encuentra la menor cantidad de vehículos y que en Santiago esta la mayor parte de este, por ende, es donde se encuentra la mayor cantidad de NFU, siendo foco de contaminación ambiental, ya que la vida útil de un neumático es de 6 años y la degradación de este es de 80 años aproximado.

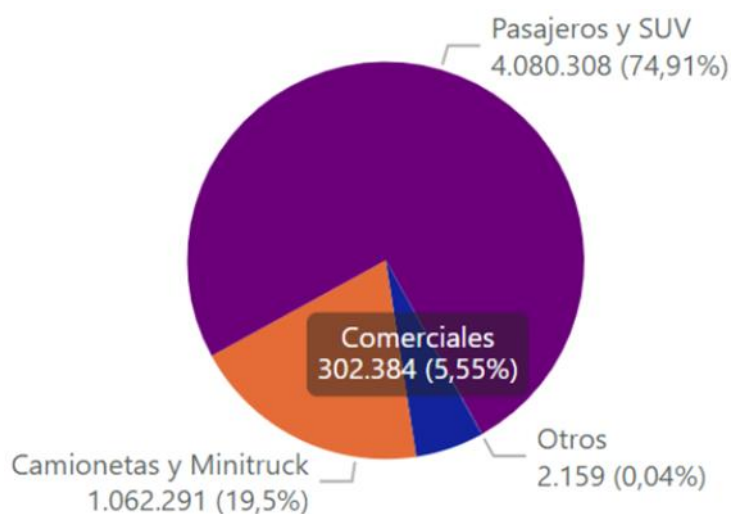


Grafico 2 Vehículo en circulación por tipo de transporte (porcentaje 2021).

En el grafico 2 vemos la cantidad de vehículos en circulación según el tipo de transporte, en donde nos podemos dar cuenta que el 75% corresponde a automóviles de pasajeros los cual suelen terminar en vertederos o en lugares que ayudan a la contaminación ambiental por lo cual los NFU es materia prima fácil de conseguir.

Se estima que en Chile se producen alrededor de 80 mil toneladas de NFU al año, cifra que podría alcanzar los 100 mil. La capacidad de valorización de neumático en el país es de 32mil toneladas anual aproximadamente, utilizándose principalmente como combustible en la industria del cemento y en la fabricación de gránulos de caucho para uso en pisos, canchas, etc., por lo que existe un déficit cercano a las 50mil toneladas al año, Siendo la pirolisis de neumático una buena opción para valorizar este residuo ya que es un proceso amigable con el medio ambiente, los productos del proceso se pueden comercializar y se evita la acumulación de este residuo que ha incrementado con el pasar de los años.

2.2- Composición del neumático.

El neumático es una pieza tubular y elástica que se monta en las ruedas de diversos vehículos, como automóviles, motocicletas, bicicletas y camiones, así como en maquinaria industrial y equipos. Su función principal es proporcionar una interfaz flexible y amortiguadora entre el vehículo y la superficie de la carretera o el terreno.

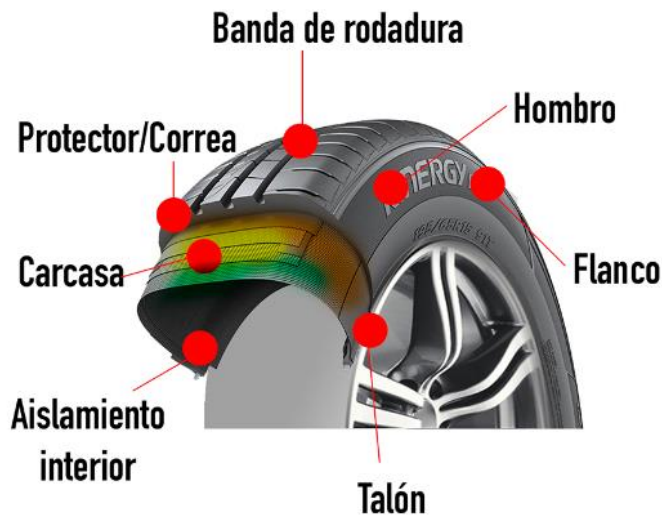


Ilustración 1 Anatomía de un neumático. (neumaticoskm0).

Banda de rodadura: La banda de rodadura es la zona que entra en contacto directo con el suelo. Está compuesta por una gruesa capa de caucho, ofreciendo una gran resistencia a impactos producidos durante su uso protegiendo la carcasa y la correa. El caucho que se utiliza cuenta con una propiedad de antiabrasión que aumenta la vida útil del neumático.

Hombro: Es la zona de la estructura del neumático que se sitúa entre la banda de rodadura y el flanco, es la zona que contiene la capa más gruesa de caucho de todo el neumático, por esa razón el Hombro es capaz de calmar el calentamiento y hacer desaparecer de una forma eficaz y realmente rápida todo el calor que naturalmente se acumula en el neumático durante la conducción.

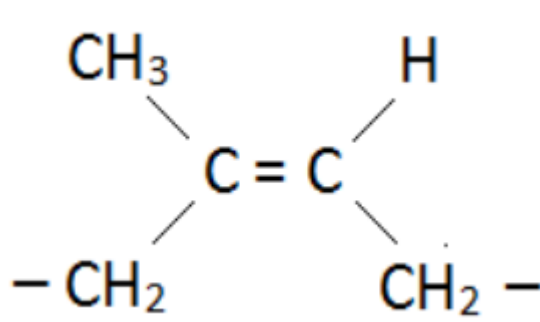
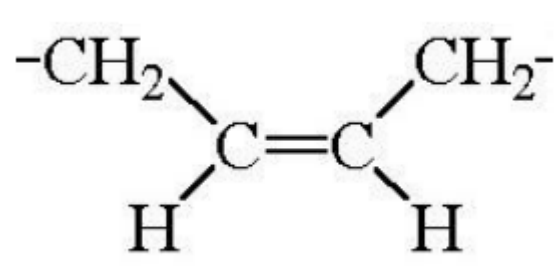
Talón del neumático: Es la zona de contacto con la llanta sujetándolo de una forma firme y segura. Está compuesto a su vez de varios elementos: alambre, relleno, caucho, todos estos elementos proporcionan una fijación adecuada entre la rueda y la llanta.

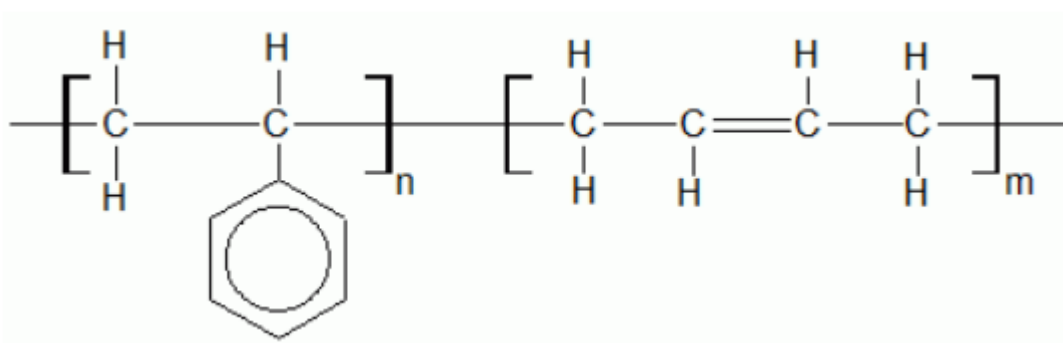
Protector/ correa: se ubica entre la carcasa y la banda de rodadura con el objetivo de proteger la carcasa. Absorbe los impactos externos y hace que la carcasa se mantenga intacta a pesar de impactos, pinchazos etc. De la misma forma hace que la capa de caucho y la carcasa se separen.

El neumático está compuesto principalmente por caucho vulcanizado, negro de humo, aros de acero, fibras reforzantes y alambres de acero.

El caucho sintético que se utiliza es estireno-butadieno (SBR), polisoprenos sintéticos (IR) y polibutadienos (BR) donde son mezclados con caucho natural y son vulcanizados mediante la adición de azufre y la aplicación de calor, para lograr aumentar la dureza, elasticidad y la resistencia a las bajas temperaturas.

En las siguientes Figuras se muestra la estructura molecular del caucho que se utiliza en el neumático.

Estructura molecular Caucho natural.	Estructura molecular Caucho sintético butadieno.
	
Ilustración 2 Estructura molecular caucho natural. (Zarini,2011).	Ilustración 3 Estructura molecular caucho butadieno. (Zarini,2011).

Estructura molecular del caucho sintético Estireno-butadieno.

Ilustración 4 Estructura molecular caucho Estireno-butadieno (Zarini, 2011).

Otros componentes que incluye es el negro de humo, el cual sirve para reforzar el caucho y ayudar a la resistencia a la abrasión, el aceite extensor que es una mezcla de hidrocarburos aromáticos que sirve para ablandar la goma y mejorar la vida útil, el azufre es utilizado para vincular las cadenas de polímero dentro de la goma y para prevenir la excesiva deformación a temperaturas elevadas.

Gracias a que los neumáticos contienen principalmente hidrocarburos de cadena larga, la regeneración de neumáticos para obtener estos hidrocarburos podría proporcionar un camino económicamente viable para tratar este tipo de residuos. La recuperación de los hidrocarburos valiosos de los neumáticos de desecho como materias primas químicas, reduciría la necesidad de los combustibles fósiles, lo que a su vez ayudaría a disminuir las amenazas de las reservas de combustibles fósiles y contribuye a la valorización del residuo

En la tabla 1 damos a conocer detalladamente una aproximación a los componentes principales del neumático.

COMPOSICIÓN DE LOS NEUMÁTICOS USADOS	
Goma	38%
Rellenos (negro de carbón, sílice, creta de carbón)	30%
Material de refuerzo (acero, rayón, nailon)	16%
Plastificantes (aceites y resinas)	10%
Agentes de vulcanización (azufre, óxido de zinc, productos químicos diversos)	4%
Antioxidantes para contrarrestar el efecto del ozono y la fatiga de los materiales	1%
Varios	1%
Composición elemental	
Carbono	86%
Hidrógeno	8%
Nitrógeno	1%
Azufre	2%
Oxígeno	3%
Análisis proximal	
Volátiles	62%
Carbono fijo	30%
Fresno	7%
Humedad	1%

Tabla 1 composición de un neumático (Muzenda, 2014).

Como podemos ver en la tabla 1, los neumáticos fuera de uso tienen un bajo contenido de oxígeno y nitrógeno lo cual es una ventaja para el proceso de pirolisis, ya que aparte de tener bajas relaciones estequiométricas, forman menos contaminantes que utilizan nitrógeno combustible y oxígeno CO y NOx. El NFU tienen un bajo porcentaje de humedad y alto porcentaje de volátiles facilitando el proceso de combustión. Su gran porcentaje de carbono le otorga un alto valor calorífico (31,401 Mj/kg).

Composición porcentual (%)	Tipo de vehículo		
	Motocicletas	Autos y camperos	Camiones y buses
Negro de humo	20	28	28
Suavizantes, fibra textil, óxidos, antioxidantes, entre otros.	10-12	16-17	16-17
Caucho natural	35	14	27
Acero	5-10	14-15	14-15
Caucho sintético	10	27	14

Tabla 2 composición de un neumático según el tipo de vehículo. (Muzenda, 2014).

En la tabla 2 podemos ver que los NFU tienen variaciones dependiendo el tipo de neumático por lo cual podemos deducir que el neumático de motocicleta tiene un mayor porcentaje de caucho natural lo cual genera 55,6% de aceites con 0,83% de azufre lo que hace que este producto tenga mayor potencial como combustible, en comparación con el neumático de autos que tiene mayor porcentaje de caucho sintético el cual genera 47,4% de aceite con 1,35% de azufre, lo que lo hace un mejor candidato para la producción química.

Aunque es difícil saber la composición exacta de un neumático, ya que, dependiendo la marca, tamaño, entre otros requisitos, se le aplican distintos aditivos. A pesar de esto el proceso de pirolisis es el mismo en donde se controla de manera distinta, el tamaño en que se trabaja las partículas, temperatura y velocidad del proceso para obtener resultados óptimos.

CAPITULO 2.

Pirolisis

3.1- Definición general de pirolisis.

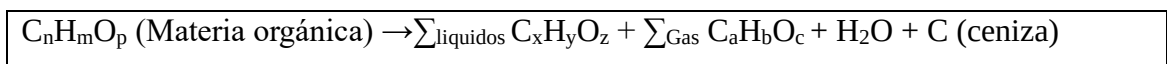
La pirolisis es un tratamiento termoquímico, que se puede realizar a cualquier producto orgánico que contenga carbono como elemento fundamental. El material se somete a altas temperaturas y, en un entorno sin oxígeno, experimenta un proceso de descomposición química y física que resulta en la formación de distintas moléculas.

La pirólisis se caracteriza como un tipo de termólisis que consiste en la descomposición térmica de un material en condiciones donde no hay presencia de oxígeno ni de algún reactante específico. Esta descomposición implica una serie compleja de reacciones químicas y procesos de transferencia de materia y calor. También puede ser definida como el paso que se da previo a la gasificación y la combustión.

Cuando se produce una pirolisis lenta a bajas temperatura deja solamente carbono como residuo, este se conoce como carbonización. Por medio de la pirolisis se puede obtener diferentes subproductos los cuales pueden ser útiles en el área de la tecnología.

La pirolisis produce gases condensables y carbón sólido o ceniza, el gas condensable puede descomponerse aún más en gases no condensables, líquido y carbón.

Teóricamente, el proceso de pirólisis puede estar representado en la siguiente reacción química, en donde los subíndices representan el número de átomos de cada elemento que constituye tanto la materia prima empleada como los productos obtenidos.



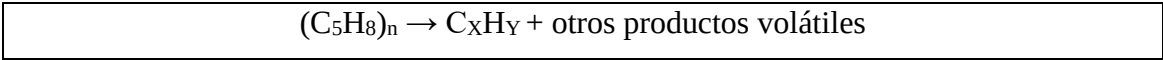
La fase líquida, que se forma durante el proceso de pirólisis, se extrae del gas de pirólisis solo durante el enfriamiento. En algunas aplicaciones específicas, estas dos corrientes (fase líquida y gases) pueden utilizarse conjuntamente. Esto se logra suministrando gases calientes directamente a un quemador o a una cámara de oxidación, lo que puede tener aplicaciones prácticas en diversos procesos industriales.

3.2-Pirólisis en neumáticos.

Consiste en la ruptura de enlaces químicos debido a la alta temperatura en ausencia de oxígeno. A nivel molecular, se pueden observar varias reacciones químicas que ocurren

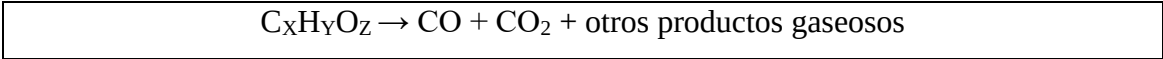
durante la pirólisis de neumáticos, lo que lleva a la formación de productos líquidos, gaseosos y sólidos.

Algunas de sus reacciones químicas que ocurren es la descomposición del caucho en donde los polímeros de caucho presentes en los neumáticos se descomponen en hidrocarburos más pequeños y otros compuestos volátiles.



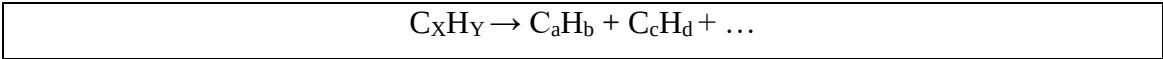
Ecuación simplificado descomposición del caucho.

En la descomposición de materiales carbonosos, como residuos de alquitrán y aceites, los cual se descomponen produciendo monóxido de carbono, dióxido de carbono y otros gases.



Ecuación simplificado descomposición de materiales carbonosos.

Se produce craqueo térmico en donde los hidrocarburos más grandes experimentan craqueo térmico, dividiéndose en hidrocarburos más pequeños. Este proceso libera gases como metano, etileno, propileno y otros hidrocarburos gaseosos.



Ecuación simplificada de craqueo térmico

Gases que forman.	
Hidrocarburos ligeros	CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₃ H ₆
Gases orgánicos	CO, CO ₂ , oxido de azufre
Vapor de agua	H ₂ O
Gases resultantes de la carbonización	Gases asociados al carbón solido

Tabla 3 de gases que se forman en el proceso de pirolisis.

Se produce liberación de vapor de agua y otros compuestos volátiles debido al calentamiento de la humedad residual y a la descomposición de algunos componentes ligeros.

3.2.1-Productos de pirolisis de neumático.

Productos líquidos

El líquido que se produce es aceite de pirolisis, el cual es orgánico, de color marrón oscuro y tiene un fuerte olor a acre. La composición del aceite es aromáticos (benceno, tolueno, etilbenceno, xileno, estireno, naftaleno, fenantreno y antraceno.) que forman el 49%, los alcanos (de 11 a 24 carbonos) y los alquenos (8-15 carbonos), que juntos representan alrededor del 16%. También se detectaron pequeñas cantidades de nitrógeno, sulfuros y oxigenados. El uso principal de este líquido es como combustible para hornos y centrales eléctricas.

propiedades fisicoquímicas del líquido pirolítico.

Características	Valor
Densidad (kg/m ³)	962
Gravedad API (°)	15,0
Viscosidad a 50 °C (cSt)	2,44
Punto de inflamación (°C)	17,0
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	41,7
Humedad (% p/p)	0,88
Residuo carbón (% p/p)	1,78
Cenizas	Trazas
Análisis último (% p/p)	
Carbono	84,26
Hidrógeno	10,39
Nitrógeno	0,42
Azufre	1,54
Oxígeno y otros	3,39
H/C relación atómica	1,48

Tabla 4 Propiedades fisicoquímica del líquido pirolítico (Li et al,2004).

Productos Gaseosos.

El gas que se forma es entre el 10 y 30% y aumenta a medida que aumenta la temperatura. La corriente de gas contiene gases como COx, ácido sulfhídrico, gases volátiles que tienen al menos cuatro átomos de carbono. El COx y el H₂S se originan de los compuestos orgánicos que contienen oxígeno que se encuentran en los neumáticos. Los gases volátiles, que están presentes en pequeñas cantidades, se forman a partir de la ruptura de los enlaces de azufre que resultan de la descomposición del caucho vulcanizado. Es importante señalar que la fase gaseosa contiene cantidades importantes de metano y etano siendo similar al gas natural.

Este gas sirve como combustible gracias a su alto poder (calorífico 30-40 MJ/N_m), El cual es utilizado para alimentar el mismo proceso de pirólisis. Para este proceso se utiliza entre el 10 y 15% de gas producido, por ende, el gas restante se puede utilizar para alimentar otros equipos de la planta.

Productos sólidos.

Este se obtiene a partir de la fase sólida en diferentes aplicaciones. La ceniza obtenida de la pirólisis es similar al carbón vegetal, en términos de poder calorífico es de alta calidad, y puede utilizarse como combustible tanto en fase líquida como gaseosa. Los productos sólidos de la pirólisis se pueden utilizar para fabricar termoplásticos y como absorbente de bajo costo para el tratamiento de riles, también se puede transformar en carbón activado, llegando a tener propiedades similares a carbonos activados comerciales.

3.3-Factores que influyen en el rendimiento de la pirólisis.

La composición de los productos de pirólisis depende de las condiciones de funcionamiento del proceso, por sus diversas reacciones químicas que se favorecen en cada condición según los parámetros. Los parámetros que más influyen en la composición de este son, el tamaño de partículas, temperatura, tiempo de permanencia y velocidad de calentamiento.

A continuación, veremos detalladamente como influye estos parámetros en el proceso.

Tamaño de partícula: Al haber un tamaño de partícula menor, aumenta el área superficial y la transferencia de calor junto a la reacción de descomposición. Cuando el tamaño de partícula es mayor, la conductividad térmica es menor por lo que el calor no alcanza el núcleo del neumático. Esto genera que los núcleos de partículas grandes no sean

descompuestos completamente, dando como resultado un aumento en los sólidos carbonizados y disminución de los líquidos y gases. (Muzenda., 2014).

Temperatura: El aumento de la temperatura de pirolisis minimiza la cantidad de líquido producido, aumentando la cantidad de fase gaseosa. Esto se debe a la descomposición del vapor en gases de forma permanente. Por lo tanto, a altas temperaturas aumenta la generación de gases. (Muzenda., 2014).

En la siguiente tabla veremos los resultados de simulación de productos de pirólisis de neumáticos de desecho con alimentación de 12.500 kg/h a diferentes temperaturas de pirólisis, lo cual nos podemos dar cuenta que a mayor temperatura es mayor el producto gaseoso y menor el sólido, y que a menor temperatura se produce más sólidos que gaseosos.

Temperatura/°C	Char/kg·h ⁻¹	Metal/kg·h ⁻¹	Pirólisis Gas/kg·h ⁻¹	Aceite de pirólisis/kg·h ⁻¹
400	2307.45	1662.19	590.47	7810.89
500	2248.42	1662.19	689.34	7774.71
600	2166.66	1662.19	787.05	7762.66
700	2064.72	1662.19	872.10	7784.10

Tabla 5 Componentes en distintas T°. (Muzenda., 2014).

Tiempo de residencia: Al aumentar los tiempos de residencia genera una disminución de líquidos y sólidos, mientras los gases aumentan. Esto se debe principalmente a la descomposición de aceites en gases de forma permanente. Primero, se producen vapores de la pirolisis a una temperatura óptima, luego estos vapores se degradan en gases secundarios (gases pesados $\text{CH}_4+\text{C}_2\text{H}_4+\dots$) + gases livianos ($\text{CO}+\text{CO}_2+\text{H}_2$)). Adicionalmente, al aumentar el tiempo de contacto de los volátiles (CO_2) con los productos sólidos carbonosos, se generan una reacción secundaria para generar monóxido de carbono. (Muzenda., 2014).

Velocidad de calentamiento: Las velocidades de calentamiento más bajas requieren menos energía para completar la pirólisis, pero un tiempo de finalización más largo.

Por el contrario, las velocidades de calentamiento más altas necesitan más energía para completar la pirólisis, pero tienen un tiempo de finalización más corto. (Muzenda., 2014).

CAPITULO 3.

Proceso pirolisis de neumático.

4.1-Diagrama de proceso.

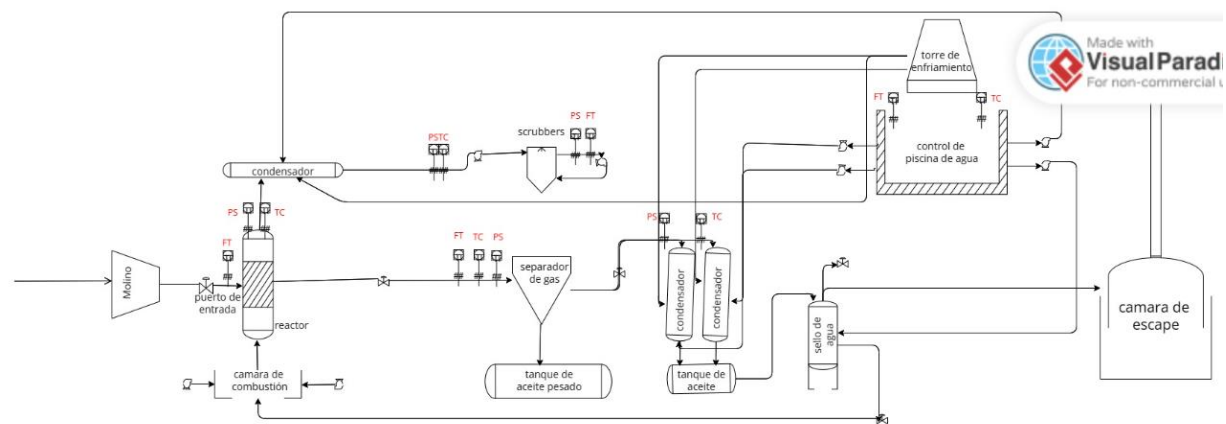


Ilustración 5 Diagrama de proceso pirólisis de neumáticos. (Elaboración propia).

El proceso de pirólisis de neumático comienza con la preparación de la materia prima en donde se retira el material que no se introdujera al reactor (alambres y piezas metálicas) la cual se puede poner a la venta.

Molino: Este se utiliza para triturar y reducir el tamaño de los neumáticos uniformemente , estos son sometidos a fuerzas mecánicas que rompen la estructura disminuyendo el tamaño de las partículas, el cual ayuda a aumentar la eficiencia en la descomposición térmica de los materiales.El tipo de molino se elige según los parámetros que se necesite para el proceso, considerando el tamaño de partícula, capacidad de procesamiento, y el producto final que se desee.

Puerto de alimentación:se controla el flujo de entrada de los neumáticos y el tamaño de este.

Reactor: Los neumáticos se calientan a la temperatura deseada para iniciar la descomposición térmica la cual es controlada por un sensor de temperatura.Los componentes orgánicos de los neumáticos se descomponen en productos gaseosos, líquidos y sólidos.

Después de finalizar el proceso en el reactor da como resultado el producto sólido (carbon) el cual se almacena y el producto gaseoso que va a un separador.

Scrubbers: Este equipo ayuda a reducir las emisiones contaminantes al ambiente. Sirve para lavar y limpiar los gases mediante la introducción de agua que captura y elimina los contaminantes gaseosos que se generan del reactor.

Separador de gases: Se separan y enfrían los productos que se generan los cuales son, gases que contienen hidrocarburos volátiles, gases no condensables y vapores de agua.

Durante este proceso algunos componentes gaseoso se condensan en forma liquida formando aceite piroliticos, que son productos liquidos obtenidos a partir de la descomposicion termica de los neumaticos , este aceite se le denomina” aceite pesado” debido a sus características (densos y viscosos) y se almacena en un tanque.

Condensador: El gas pasa por un condensador para purificar y separar mejor los componente de este y mejorar la calidad de los productos obtenidos (aceite y gas) en donde el aceite se almacena en un tanque y el gas se utiliza como energia para el proceso de pirolisis.

Torre de enfriamiento: Este se utiliza en distintas etapas del proceso , como en la condensación, scrubbers, sello de agua. Disminuye la temperatura de los gases y produce la separacion de fases.

Sello de agua: Es utilizado para controlar la entrada de oxígeno al reactor y crear una atmósfera anaeróbica durante el proceso de pirolisis.Los gases producidos durante la pirolisis, incluyendo hidrocarburos gaseosos, pasan a través del sello de agua. Como el extremo de la tubería está sumergido en agua, el gas puede escapar, pero el agua actúa como una barrera para evitar que el oxígeno del aire regrese al reactor.

Valvulas: Se utilizan en diferentes etapas del proceso para controlar el flujo de materiales y gases, el tipo de valvula que se utiliza depende del tipo de fluido, tamaño de tuberia , las condiciones de presion entre otros, la utilizacion adecuada es primordial para garantizar un control preciso , condiciones operativas seguras y eficiencia en la producción.

Sensores: Se utilizan sensores de temperatura, presión , velocidad de calentamiento en las distintas etapas del proceso , este sirve para monitorear y controlar el proceso asegurando un proceso eficiente ,seguro y que cumpla con los estandares ambientales.

El proceso que se describe puede tener pequeñas variaciones ya que depende del tipo de producto que se quiera obtener a mayor escala , si sera un proceso rapido o lento el cual ayudara a elegir mejor el reactor.

4.2-Pirolisis lenta

Es un proceso por lotes o semilotes, este tipo de proceso es de descomposicion pirolitica lenta a bajas temperaturas, se caracteriza por bajas velocidades de calentamiento , tiempo de residencia de solidos y vapores relativamente largos, que puede ser de minutos a horas. Los tiempos de residencia mas largos dan como resultado una conversión secundaria, produciendo mas coque, alquitran y productos termicamente estables. Este hecho hace que la pirolisis lenta tambien se le llame carbonización. A

diferencia de la pirólisis rápida, el objetivo de esta es la producción de carbón, aunque también se obtienen alquitran y gases que no necesariamente se recuperan.

Para este proceso se utiliza generalmente reactor de lecho fijo son recipientes verticales en lo que se calienta únicamente el fondo del reactor, lo que genera un perfil térmico a lo largo de sus paredes, su calentamiento es en la mayoría de los casos indirecto para evitar fluidización en el lecho fijo. aunque en algunos casos emplea una corriente de gas inerte de arrastre que extraiga la fracción volátil generada para evitar fenómenos de reflujo de condensados y reacciones de craqueo secundarias indeseadas.

4.3-Pirólisis rápida.

Es un proceso que implica una rápida descomposición térmica gracias a que su velocidad de calentamiento es más alta. Este método, generalmente, requiere una materia prima que presente partículas de tamaño reducido, junto con dispositivos específicamente diseñados para la rápida eliminación de los vapores liberados.

La combinación de velocidades de calentamiento alta con tiempos de residencia cortos en la zona caliente, y el enfriamiento rápido de los productos volátiles, ayuda a la formación de productos líquidos. Este fenómeno se atribuye a que los volátiles liberados durante el proceso de pirólisis se condensan antes de que la reacción posterior descomponga las especies de mayor peso molecular en productos gaseosos. De esta manera, se logra obtener un combustible líquido con un mayor poder calorífico. De hecho, la pirólisis rápida es reconocida como una ruta eficiente para la conversión eficaz para la producción de combustibles líquidos,

La pirólisis rápida se ejecuta comúnmente en reactor de lechos fluidizados, reactores arrastrados, ablativos y de caída libre, en los cuales el tiempo de reacción varía desde milisegundos hasta segundos. Es ampliamente aceptado que el tiempo de residencia de los compuestos volátiles debe mantenerse por debajo de los 2 segundos. Si estos tiempos de residencia se extienden, se observan reducciones notables en los rendimientos orgánicos, lo que da lugar a la aparición de reacciones secundarias, como el craqueo térmico.

Técnica pirolítica	Período de asentamiento sólido (min)	Velocidad de calentamiento (° C / s)	Tamaño de grano (cm)	Temperatura. (°C)	Producir (proporción)		
					Aceite	Carbón	Gas
Lento	7,5-9,16	0,1-1	0,5-5	277-677	0,30	0,35	0,35
Rápido	0,0083-0,16	10-200	<0,1	577-977	0,50	0,20	0,30

Ilustración 6 Comparación de parametros para pirolisis lenta y rapida.(Mejía Madrigal, S. A., & Upegui Sosa, S. A. (2021)).

4.4-Aspecto técnico.

Al planificar la instalación de una planta de pirolisis, es fundamental examinar minuciosamente los aspectos técnicos asociados, que comprenden en detalle la implementación y el funcionamiento del sistema. Algunos de los elementos técnicos que se deben considerar incluyen la determinación del principal producto a obtener con mayor proporción (aceite, gas o carbón), la selección de los equipos, como el tipo de reactor y sus dimensiones, la capacidad de almacenamiento, entre otros aspectos relevantes. También es esencial definir la cantidad diaria de neumáticos fuera de uso (NFU) que se procesarán, la duración de los ciclos operativos, la naturaleza del proceso (continuo o semi continuo), el tamaño de las partículas resultantes, la posible utilización de catalizadores, la temperatura a la cual se llevará a cabo el proceso, velocidad de calentamiento. En términos generales, estos aspectos abarcan todos los elementos necesarios para garantizar que el proceso sea eficiente, seguro y cumpla con los estándares ambientales, asegurando así el funcionamiento óptimo de las máquinas y del sistema en su conjunto, con la producción de los resultados deseados.

A continuación, veremos un ejemplo de aspectos técnicos para una planta de pirolisis la cual fue investigada por Cristian Ríos para producir grafeno. (Ríos,2021).

Materia prima:	gránulos de NFU
Cantidad para procesar	500 kg/ ciclo
Ciclo	3
Velocidad de calentamiento	5°c / min
Temperatura de pirolisis	800-1000 °C
Producto generado	40 – 60 % solidos

Tipo de reactor	ciclo discontinuo
Diámetro	1, 10 m
Largo	5,72 m

Estos son algunos de los aspectos técnicos que se necesita para la producción de 130 toneladas de grafeno al año.

CAPITULO 4.

Normativa para una planta de pirolisis de neumático en Chile.

Actualmente, la tecnología de Pirólisis debe cumplir con las mismas normativas aplicadas para la tecnología de incineración, correspondientes a:

Decreto Supremo 29/2013, Ministerio del Medio Ambiente.

Norma de emisión para incineración, co-incineración y co-procesamiento , en donde Se establecen los valores límites de emisión de material particulado para la incineración, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, carbono orgánico total, monóxido de carbono, cadmio y sus compuestos, mercurio y sus compuestos, berilio y sus compuestos, plomo + zinc y sus compuestos, arsénico + cobalto + níquel + selenio + telurio y sus compuestos, antimonio + cromo + manganeso + vanadio, compuestos inorgánicos clorados gaseosos, compuestos inorgánicos fluorados gaseosos, benceno, dioxinas y furanos.

Criterio.		Valor limite
Material particulado.	MP	30,0
Dióxido de azufre.	(SO ₂)	50,0
Óxidos de nitrógeno.	(NO ₂)	300,0
Carbono orgánico total.	COT	20,0
Monóxido de carbono.	CO	20,0
Cadmio y sus compuestos, indicado como metal.	Cd	50,0
Mercurio y sus compuestos, indicado como metal.	Hg	0,1
Berilio y sus compuestos, indicado como metal	Be	0,1
Plomo + Zinc y sus compuestos, indicado como metal.	Pb + Zn	1,0
Arsénico + cobalto + níquel + selenio + telurio y sus compuestos indicados como elemento, suma total.	As + Co + Ni + Se + Te	1,0
Antimonio + cromo + manganeso + vanadio, suma	Sb + Cr + Mn + V	5,0

total		
Compuestos inorgánicos clorados gaseosos indicados como ácido clorhídrico.	HCl	20,0
Compuestos inorgánicos fluorados gaseosos indicado como ácido fluorhídrico	HF	2,0
Benceno	(C ₆ H ₆)	5,0
Dioxinas y furanos	TEQ	0,2

Tabla 6 Valores límites de emisión para la incineración (Decreto Supremo 29/2013 del Ministerio del Medio Ambiente).

Decreto Supremo 4/1992, del Ministerio de Salud.

Establece la norma de calidad del aire para el contaminante material particulado respirable MP10, con un límite de MP de fuentes nuevas, estacionarias y puntuales, de 112 mg/Nm3, Además, establece requerimientos del monitoreo de la emisión de MP y metodología de emisión, definiendo el requerimiento de la compensación del 100% de emisiones, con el acuerdo entre privados. Se permite el incremento de producción de material particulado, respectivo a la operación de la planta, en medida de que otra planta disminuya su emisión en una tasa igual.

Decreto 89/1989, Ministerio de vivienda y urbanismo.

Regula las medidas a implementar, para efectos de mitigar el impacto de las emisiones de polvo y material particulado en la ejecución de un trabajo.

Decreto Supremo 148/2004, del Ministerio de Salud.

Establece el reglamento para el manejo de los residuos peligrosos, estableciendo las condiciones mínimas para la descarga de ceniza en plantas de generación de energía. De acuerdo con ello, se debe cumplir con las concentraciones máximas permisibles (CMP) al aplicar la prueba de toxicidad, de lo contrario, el residuo tendrá que ser dispuesto en un relleno de seguridad.

Sustancia	Norma Chilena test toxicidad de lixiviación.
[mg/l]	[mg/l]
(As) Arsénico.	5

(Cr) Cromo.	5
(Hg) Mercurio.	0,2
(Pb) Plomo.	5
(Se) Selenio.	1
(Ba) Bario.	100
(C ₆ H ₆) Benceno.	0,5
(Cd) Cadmio.	1

Tabla 7 Concentraciones máximas permisibles para determinar la toxicidad de un residuo (: Decreto Supremo N°148/2004 del Ministerio de Salud).

Decreto Supremo N°38/2014, del Ministerio del Medio Ambiente.

Esta normativa establece los límites de ruidos generados por fuentes de emisión, con la cual se puede establecer los horarios en los cuales está permitido ciertos decibeles, dependiendo de la zona en la cual se encuentre ubicada la planta.

Zona y tipo de suelo.	Horario 7 a 21 hrs.	Horario 21 a 7 hrs.
I: Residencial, espacio público y/o área verde.	55 (dB).	45 (dB).
II: Zona I, que posee equipamiento.	60 (dB).	45 (dB).
III: Zona II, que posee actividades productivas y/o infraestructura.	65 (dB).	50 (dB).
IV: Actividades productivas y/o de infraestructura.	70 (dB).	70 (dB).

Tabla 8 Niveles máximos permitidos de Presión Sonora Corregida en DB. (DS N°38, 2014).

CONCLUSIÓN.

En conclusión, la pirolisis de neumáticos fuera de uso emerge como una tecnología prometedora con importantes implicaciones técnicas y medioambientales. A través de este trabajo, se ha buscado destacar los aspectos fundamentales de este proceso innovador.

La pirolisis de neumáticos no solo representa una solución eficaz para gestionar los neumáticos en desuso, sino que también ofrece la oportunidad de aprovechar recursos valiosos mediante la obtención de productos como aceites, gases y carbón. La comprensión de los procesos técnicos involucrados, desde la descomposición de polímeros hasta la formación de productos finales, es esencial para maximizar la eficiencia y minimizar el impacto ambiental.

Además, se ha destacado la importancia de considerar aspectos normativos en el establecimiento de plantas de pirolisis, garantizando el cumplimiento de regulaciones ambientales para un desarrollo sostenible.

La pirolisis se presenta como una alternativa prometedora en la gestión de residuos, al tiempo que abre perspectivas para el aprovechamiento responsable de recursos en la búsqueda de un futuro más sostenible.

BIBLIOGRAFIA.

Administrador. (2022, 18 enero). *¿Qué partes componen la estructura de un neumático?* NEUMATICOS KM 0. <https://www.neumaticoskm0.com/estructura-de-un-neumatico/>

Beston Group Co., Ltd. (2022, 14 marzo). *¿Qué es la pirólisis de neumáticos? | Proceso de pirólisis de neumáticos de desecho.* Beston Group. <https://bestonasia.com/es/waste-tyre-pyrolysis-plant/what-is-tyre-pyrolysis/>

Caballero, C. M. (2022, 18 octubre). *Pirólisis, una alternativa para el reciclaje de neumáticos en el marco de la Ley REP - País Circular.* País Circular. <https://www.paiscircular.cl/empresa-e-innovacion/pirolisis-una-alternativa-para-el-reciclaje-de-neumaticos-en-el-marco-de-la-ley-rep/>

Jesús, A. (2014, 26 mayo). *Pirólisis.* Ingeniería Química. <https://www.ingenieriaquimica.net/articulos/361-pirolisis>

Autocosmos. (2019, 5 agosto). *Cuáles son las partes que componen el neumático de un automóvil.* Autocosmos. <http://especiales.espanol.autocosmos.com/tipsyconsejos/noticias/2019/08/05/cuales-son-las-partes-que-componen-el-neumatico-de-un-automovil>

Del Congreso Nacional, B. (s. f.). *Biblioteca del Congreso Nacional.* www.bcn.cl/leychile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1054148&idVersion=&idLey=&tipoVersion=&cve=&i=>

Alomar, J. M. (2020, 23 abril). *Reciclaje de neumáticos en Chile, ley REP e innovación - país circular.* País Circular. <https://www.paiscircular.cl/industria/reciclaje-de-neumaticos-ley-rep/#:~:text=Seg%C3%BAn%20las%20estimaciones%20que%20fundamentaron%20las%20metas%2C%20en,caucho%20para%20uso%20en%20pisos%2C%20canchas%20y%20carpetas.>

Dquezada. (2003, 1 junio). *Utilización de neumáticos desechados como combustible alternativo en fábricas de cemento.* Monografias.com. <https://www.monografias.com/trabajos13/neuma/neuma>

Ríos Padilla, C. F. (2023). *Estudio de factibilidad técnica-económica para producir grafeno a partir de neumáticos fuera de uso (NFU).*

Nkosi, N., & Muzenda, E. (2014, July). A review and discussion of waste tyre pyrolysis and derived products. In *Proceedings of the world congress on engineering* (Vol. 2, pp. 2-4).