



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



Estudio de factibilidad técnica-económica para producir grafeno a partir de neumáticos fuera de uso (NFU)

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Químico por

Cristián Felipe Ríos Padilla

Profesora Guía

Katherina Fernández

Profesor Comisión

Luis Felipe Montoya

Sumario

La problemática ambiental actual nos impone encontrar soluciones sustentables para abordar los desechos generados industriales y domiciliarios. Aunque se han realizado esfuerzos para reducir el uso de combustibles fósiles y utilizar energías renovables en su lugar, no es suficiente y otros desechos, como los neumáticos fuera de uso, no están siendo tratados apropiadamente. En el caso de nuestro país, se generaron 206.472 toneladas de NFU el año 2021 y la mayoría de estos se fueron a lugares para ser apilados o se reciclan sin obtener productos con valor agregado. Por ello, este trabajo propone una alternativa a escala piloto para la generación de grafeno, material con potencial distintas áreas, como la electrónica, a partir de NFU por medio del proceso de pirólisis. El proceso propuesto consiste en una molienda del NFU y posterior selección del caucho, para pasar al proceso de mezclado con hidróxido de potasio, en proporción 1 caucho:2 KOH. Luego, se llevaría a cabo la pirólisis por 8 horas, con pendiente de calentamiento de 5°C/min, hasta una temperatura de 1000°C. Posteriormente, el material sólido obtenido sería purificado mediante neutralización, con control de pH mediante HCl, con un set-point de 7, pasando a la última etapa de lavado con agua destilada y filtrado de material purificado.

Se consideró una generación anual de hasta 126 mil kg de grafeno puro con un precio de venta de \$6.500. Considerando esto, se evaluó económicamente esta alternativa y se concluyó que es una opción económicamente viable, obteniendo un VAN y una TIR de \$80.580.900 y 39% respectivamente. Adicionalmente, se encontró que el precio mínimo para que el proyecto sea económicamente viable es de \$6.147/kg.

Summary

The environmental issues of today require us to find sustainable solutions to deal with industrial and household waste. Although efforts have been made to reduce the use of fossil fuels and use renewable energies instead, it is not enough and other wastes, such as end-of-life tires, are not being properly treated. In the case of our country, 206,472 tons of end-of-life tires were generated in 2021 and most of these went to places to be piled up or are recycled without obtaining value-added products. Therefore, this work proposes a pilot-scale alternative for the generation of graphene, a material with potential in different areas, such as electronics, from NFU through the pyrolysis process. The proposed process consists of a grinding of the NFU and subsequent selection of the rubber, to pass to the mixing process with potassium hydroxide, in a ratio of 1 rubber:2 KOH. Then, pyrolysis would be carried out for 8 hours, with a heating slope of 5°C/min, up to a temperature of 1000°C. Subsequently, the solid material obtained would be purified by neutralization, with pH control by means of HCl, with a set-point of 7, passing to the last stage of washing with distilled water and filtering of purified material.

An annual generation of up to 126 thousand kg of pure graphene was considered of pure graphene with a selling price of \$6,500. Considering this, this alternative was economically evaluated and it was concluded that it is an economically viable option, obtaining an NPV and IRR of \$80,580,900 and 39% respectively. Additionally, it was found that the minimum price for the project to be economically viable is \$6,147/kg.

Tabla de Contenidos

1.	Introducción	6
2.	Objetivos	7
2.1.	Objetivo general	7
2.2.	Objetivos específicos.....	7
3.	Antecedentes Teóricos	8
3.1.	Responsabilidad Extendida del Productor y fomento del reciclaje	8
3.2.	Neumáticos Fuera de Uso (NFU).....	9
3.3.	Métodos de valorización de NFU.....	13
3.3.1.	Uso directo	13
3.3.2.	Trituración	15
3.3.3.	Incineración.....	17
3.3.4.	Pirólisis.....	17
3.4.	Grafeno: descripción y aplicaciones.....	23
3.5.	Proceso para la producción de grafeno por medio de pirólisis. (Wang et. Al 2019).....	26
4.	Bases y criterios de diseño.	28
4.1.	Proceso propuesto para escala piloto de generación de grafeno	28
4.1.1.	Determinación del flujo másico	28
4.1.2.	Especificación del proceso	29
4.2.	Equipos.....	31
4.2.1.	Molino de neumáticos	31
4.2.2.	Mezclador de KOH y gránulos de caucho.....	32
4.2.3.	Horno de pirólisis.	33
4.2.4.	Estanque de almacenamiento solución HCl concentrada	35
4.2.5.	Estanques de neutralización y lavado.....	36
4.2.6.	Filtro rotatorio	38

4.3.	Localización geográfica	39
4.4.	Diagrama de Flujo.....	39
5.	Análisis económico	42
5.1.	Inversión inicial.....	42
5.2.	Costos fijos.....	43
5.3.	Costos variables.....	44
5.4.	Estructura de costos consolidada.....	44
5.5.	Cronograma de inversión	46
5.6.	Flujos de caja.....	46
6.	Discusión.....	47
6.1.	Proceso de síntesis.....	47
6.2.	Crecimiento del mercado potencial	47
6.3.	Análisis evaluación económico.....	48
7.	Conclusiones	49
8.	Referencias.....	50

1. Introducción

La problemática ambiental actual implica la necesidad de encontrar soluciones sustentables para abordar los desechos generados por la industria y las personas por todo el mundo. Aunque se han realizado esfuerzos para reducir el uso de combustibles fósiles y utilizar energías renovables en su lugar, resulta especialmente preocupante la situación de los neumáticos fuera de uso (NFU). Cada año, se producen millones de toneladas de NFU, y este número continúa en aumento debido al incremento en la fabricación de automóviles. Estos neumáticos suelen terminar apilados en grandes terrenos, ya que no son biodegradables a corto ni mediano plazo. Además de los problemas sociales que acarrearán, como la creación de vertederos, la acumulación de NFU representa un riesgo para la salud pública, ya que sirve como hábitat para diversas especies de mosquitos, incluyendo aquellos que transmiten el dengue.

Por tanto, es fundamental buscar usos alternativos para estos desechos, más allá de simplemente acumularlos, a fin de reducir la contaminación generada por diversas actividades humanas, como la minería y el transporte. La construcción y la producción de energía son dos de los usos más antiguos que se les ha dado a los neumáticos fuera de uso.

Sin embargo, en la actualidad, las nuevas leyes ambientales exigen explorar nuevas formas de reutilizar los NFU para convertirlos en productos de mayor valor económico. En este contexto, este trabajo propone un sistema para producir grafeno a escala piloto mediante la pirolisis de los neumáticos fuera de uso, basándose en un proceso experimental. Esto permitiría dar un uso viable a una gran cantidad de neumáticos sin utilizar y, además, abriría la posibilidad de llevar a cabo este proceso a escala industrial.

No se ha encontrado evidencia de experiencias similares en este campo, excepto a nivel de laboratorio y sin ningún uso comercial. Por lo tanto, este trabajo representa un avance significativo en la utilización de los neumáticos fuera de uso y también en el ámbito del reciclaje a nivel industrial.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Establecer las bases para técnicas y el beneficio económico para producir grafeno a partir de NFU

2.2. Objetivos específicos

- Evaluación de las tecnologías existentes para la producción de materiales carbonosos, con énfasis en obtención de grafeno, a partir de NFU
- Proponer un protocolo a escala piloto para sintetizar dicho material
- Evaluar económicamente la producción de este material, considerando el mercado potencial del producto propuesto.

3. Antecedentes Teóricos

3.1. Responsabilidad Extendida del Productor y fomento del reciclaje

En el año 2016 fue publicada en el diario oficial la ley número 20.920, más conocida como REP, cuyo objetivo es disminuir la generación de residuos y fomentar su reutilización, reciclaje y otro tipo de valorización, a través de la instauración de la responsabilidad extendida del productor y otros instrumentos de gestión de residuos, con el fin de proteger la salud de las personas y el medio ambiente (Ley N° 20.920, 2016). Esta ley establece algunos productos prioritarios como son aceites lubricantes, aparatos electrónicos, baterías, envases y embalajes, pilas y neumáticos. Todos estos residuos cumplen con los criterios establecidos por dicha ley en el artículo nro. 9.

Esta pretende entregar una mejor gestión final de la vida útil de distintos productos, estableciendo las bases para un sistema de recolección, gestión y valorización de los materiales, haciendo participe de su gestión y reutilización tanto a las empresas productoras como importadoras, así como también a los consumidores según lo dispuesto por dicha norma. Además, establece algunas definiciones relativas al reciclaje y reutilización de productos.

En resumen, esta ley se presenta como un instrumento para la gestión de residuos. En esta normativa se definen los roles que cumplirían los distintos participantes dentro del proceso productivo (productores, importadores, estado, consumidores, entre otros.) y sus responsabilidades en el mismo. Por parte de los distribuidores y comercializadores, están obligados a establecer un sistema de gestión y operación de residuos, para recepcionar y almacenar. Además, deberán aceptar sin costo los residuos de productos prioritarios por parte de los consumidores. En el caso de los consumidores están obligados a entregar los residuos de productos prioritarios al sistema de gestión, bajo ciertas condiciones. Por último, por parte de la entidad estatal, más específicamente el Ministerio de Medio Ambiente (MMA), deberá diseñar e implementar programas de educación ambiental, con el apoyo de los gestores y productos prioritarios. Además, contará con un fondo para la financiación de proyectos destinados a la prevención de generación de residuos y al fomento de la reutilización y reciclaje de estos. Otra de las tareas del MMA es establecer metas sobre los productos prioritarios, contar con sistemas de registros para la trazabilidad y elaborar reglamentos para los procesos implicados en la ley REP.

3.2. Neumáticos Fuera de Uso (NFU)

Un neumático se define como una pieza de caucho con cámara de aire o sin ella, que se monta sobre la llanta de una rueda. La Figura 1 muestra un esquema de los materiales que lo componen.

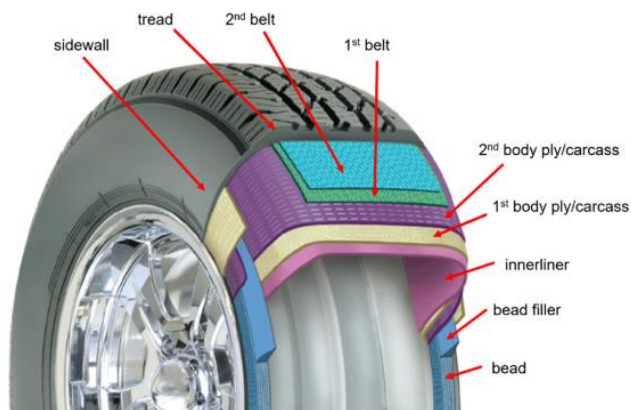


Figura 1. Esquema anatómico de un neumático

La Tabla 1 muestra la composición a nivel de materiales de distintos tipos de neumáticos. Es importante notar que dependiendo del uso que se le dé, la composición varía. Sin embargo, estas diferencias son mínimas y se podrían reciclar en primera instancia en una misma planta.

Tabla 1. Composición para diferentes tipos de neumáticos (pasajeros, camiones y minería) (Mushunje, 2018)

Ingredientes	Composición en porcentaje		
	Pasajeros	Camiones	Todo terreno
Caucho	47	45	47
Negro Carbón	21.5	22	22
Metal	16.5	25	12
Textil	5.5	-	10
Óxido de cinc	1	2	2
Sulfuro	1	1	1
Aditivos	7.5	5	6

Como se explica en el párrafo anterior, la composición de un neumático es compleja y contiene múltiples componentes dañinos para la salud y el medio ambiente. Por lo que el reciclaje de Neumáticos Fuera de Uso (NFU) es fundamental, debido a los distintos problemas que genera:

Generación de vertederos ilegales, generando problemas a la salud; proliferación de insectos que pudieran transmitir enfermedades como la malaria o el dengue; la quema ilegal de neumáticos que produce gases tóxicos para el medio ambiente, así como problemas respiratorios para la salud humana; desperdicio de un potencial materia prima para la generación de productos con valor agregado, entre otros.

Situación Mundial y Nacional

Según datos del año 2019, el mayor productor a nivel mundial de NFU es China con hasta la mitad de la cuota mundial, seguido por Estados Unidos y Europa que aportan con 23%. En tercer lugar, se ubica India con un 12% y el restante 20% es generado por el resto de los países. (Valentini, 2022)

Para el caso de la Unión Europea, el reciclaje de neumáticos y el desglose de sus usos se muestra en la Tabla 2 (ETRMA, 2021). Es importante notar que más de la mitad de los desechos no requiere ningún proceso complejo: son quemados para la producción de energía, se utilizan en la construcción de pisos antideslizantes, entre otros y en consecuencia, el aprovechamiento económico es mínimo debido a que no se obtiene ningún producto con valor agregado y, además, genera problemas ambientales adicionales como por ejemplo la producción de gases tóxicos y la contaminación de suelos. (Pieter Jan Kole, 2017)

Tabla 2. Destino de NFU UE 2019

Disposición final	Ton NFU
Obras civiles y trabajos públicos	112.507
Reciclaje	1.652.219
Recuperación energética	1.254.796
Fin desconocido	136.279
Total	3.155.801

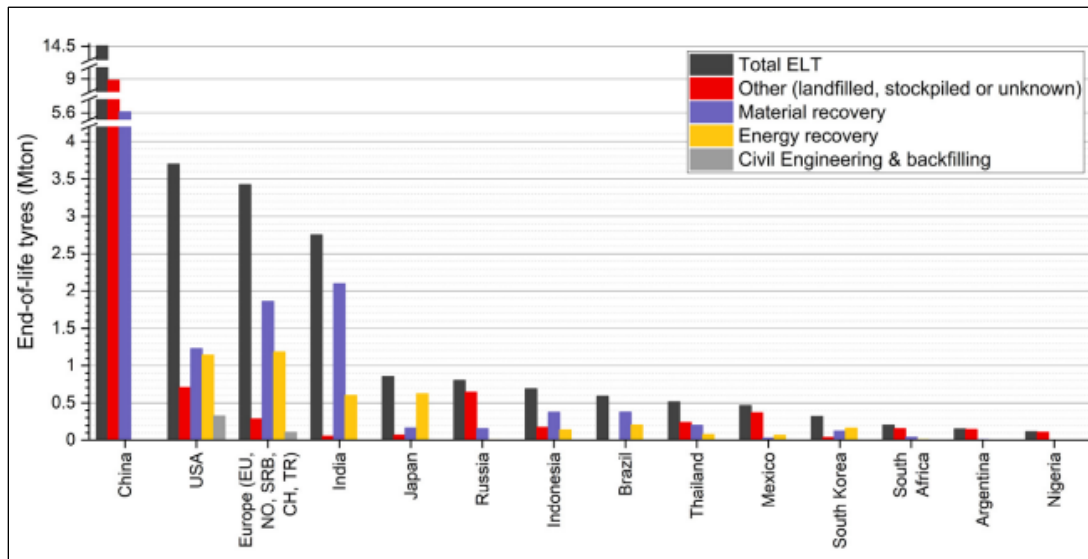


Figura 2. Disposición de neumáticos a nivel mundial (Valentini, 2022)

En Chile, en el caso de neumáticos de uso *comercial*, la principal actividad económica como es la minería genera gran cantidad de NFU llegando a las 34% y un stock de 69 mil toneladas, según se muestra en la Tabla 3. Luego de un año, los neumáticos cumplen su vida útil y son apilados sin ningún tratamiento previo.

La Figura 3 muestra la situación de apilamiento en la mina Radomiro Tomic. Esto ocupa un área de aproximadamente 67.500 m². Otro dato importante para considerar es el precio de cada uno de estos neumáticos en el mercado. Debido al aumento en la demanda de cobre por parte de los países industrializados, también el precio en los insumos ha aumentado llegando a precios de hasta US\$100.000 hacia el año 2011 (por cada neumático), datos entregados por Leighton Holdings, empresa contratista de la gran minería, por lo que es fundamental no desperdiciar esos recursos y utilizarlos de alguna forma para reducir al mínimo las pérdidas.



Figura 3. Acopio de NFU en mina Radomiro Tomic

Por otro lado, en el caso de los neumáticos de uso industrial, cómo se observa la Tabla 3. Stock nacional y generación anual de neumáticos separada por sectores al año 202, la cifra alcanza valores superiores a la registrada por el área doméstica. Esto podría suponer una ventaja a la hora de decidir hacia qué sector apuntar. La mayor existencia de NFU en zonas industriales, como la región del Biobío, significa una ventaja respecto a otros lugares, puesto que los servicios son más económicos y donde la disponibilidad de recursos es mayor. Para esto es importante notar la Figura 4.

Tabla 3. Stock nacional y generación anual de neumáticos separada por sectores al año 2021. (ANIR, 2021)

Uso	Ton NFU	Porcentaje
Agrícola, forestal e industrial	9.494	5%
Autos y camionetas	63.174	31%
Camiones y buses	60.794	29%
Minería y construcción	69.791	34%
Otros	3.219	2%
Total	206.472	100%

Por estas razones es importante buscar alternativas de reciclaje a las ya existentes, más aún cuando las nuevas normativas ambientales exigen la reutilización del 100% de estos materiales hacia el año 2026, bajo la ley 20.920 REP. Ya existen desde hace varios años iniciativas en esta dirección,

como es la planta trituradora de neumáticos inaugurada el año 2008 en Codelco Norte. Pero siempre se vuelve al mismo problema: el nulo valor agregado entregado al producto final, que es simplemente caucho granulado.

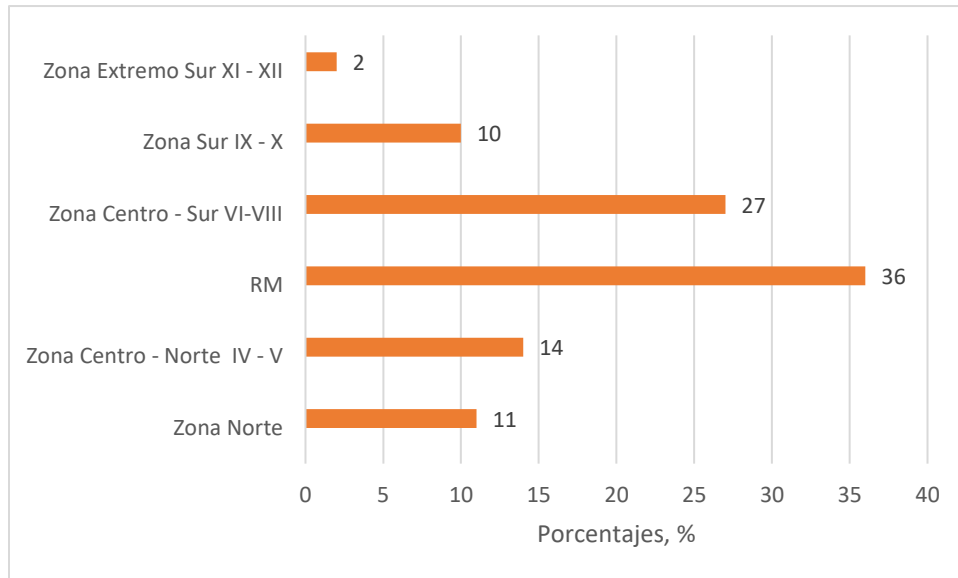


Figura 4. Distribución de NFU por macro regiones a nivel nacional

3.3. Métodos de valorización de NFU

El reciclaje de NFU nace como una solución al problema ambiental y económico que supone la disposición final de estos, existiendo distintas alternativas para utilizarlos de forma directa o como materia prima para productos con valor agregado.

3.3.1. Uso directo

El uso directo de los neumáticos corresponde al proceso de reciclaje primario. El proceso más utilizado corresponde al reciclaje primario, debido a su simpleza y bajo costo. Este proceso se caracteriza por el re uso del neumático en su estructura original, por ejemplo: en construcción de parques infantiles, defensa de muelles o rompeolas, estabilización de zonas anegadas, pistas de carretas o para retener agua en zonas agrícolas, entre otros usos. La Figura 5 muestra uno de los usos en un parque para niños. Algunas de las desventajas de este proceso son el límite de veces que se puede reutilizar y el nulo valor agregado del producto final.



Figura 5. Uso de NFU para la construcción de un parque para niños

Fuente: www.thebeautifulproject.es

3.3.2. Trituración

La trituración corresponde al reciclaje mecánico o secundario. En este tipo de reciclaje las propiedades del NFU no se ven alteradas, salvo a nivel de forma y tamaño. Está representado por métodos físicos, como son corte, molienda y limpieza, para producir material particulado de calidad de distintos tamaños, y ser usadas en procesos posteriores. En estos se puede distinguir la trituración a temperatura ambiente y criogénica (Rainey, 2016).

La trituración a temperatura ambiente es un método que consiste en disponer los neumáticos por una serie de molinos y separadores, para ser troceados con un determinado tamaño de partícula que se va reduciendo paulatinamente a medida que avanza el proceso. Este se realiza sin ningún tipo de enfriamiento en la temperatura de la materia prima, de ahí su nombre. Se pueden describir varias etapas en la trituración a temperatura ambiente: La primera corresponde a la separación de anillos metálicos laterales de los NFU, son extraídos para pasar al proceso de corte. Luego, la desfibrilación de los neumáticos en piezas de entre 40-150 mm. Se continúa con la separadora de cables del caucho y procesa los neumáticos en partículas de 10-20 mm; luego, el separador magnético separa los cables de los trozos de caucho. Después, el granulador reduce el tamaño de las partículas hasta $<7\text{mm}$. Luego se procede con el separador de fibras, para remover materia extraña y tejido de las partículas de caucho. Finalmente, el molino tritura partículas con tamaño de hasta 0.3 mm (Rainey, 2016). La Figura 6 muestra una planta de trituración a temperatura ambiente del procesamiento de NFU, similar a los procesos descritos anteriormente.



Figura 6. Proceso para la obtención de partículas de caucho a partir de NFU.

Fuente: Alibaba.com

La diferencia radica principalmente en el tipo de molinos, la cantidad de material capaz de procesar, el consumo energético, el tamaño de materia final obtenida, entre otras. Como se expuso anteriormente, esta etapa generalmente está ligada al algún otro método de valoración como puede

ser la pirólisis. Sin embargo, los gránulos obtenidos se pueden utilizar directamente en la fabricación de pistas, canchas, carreteras antideslizantes, etc. Entre las ventajas de esta tecnología están su amplia disponibilidad en el mercado y la no utilización de equipos refrigerantes. Sus desventajas son la alta potencia requerida, el alto desgaste de las cuchillas de corte y demás partes del molino, lo que se traduce en un alto costo en mantenimiento.

Por otro lado, trituración criogénica corresponde básicamente a un proceso de conversión de neumáticos en un material quebradizo, exponiendo la materia prima a temperaturas bajo -80°C , donde pierde su propiedad elástica haciendo el proceso de molienda más simple (Rainey, 2016).

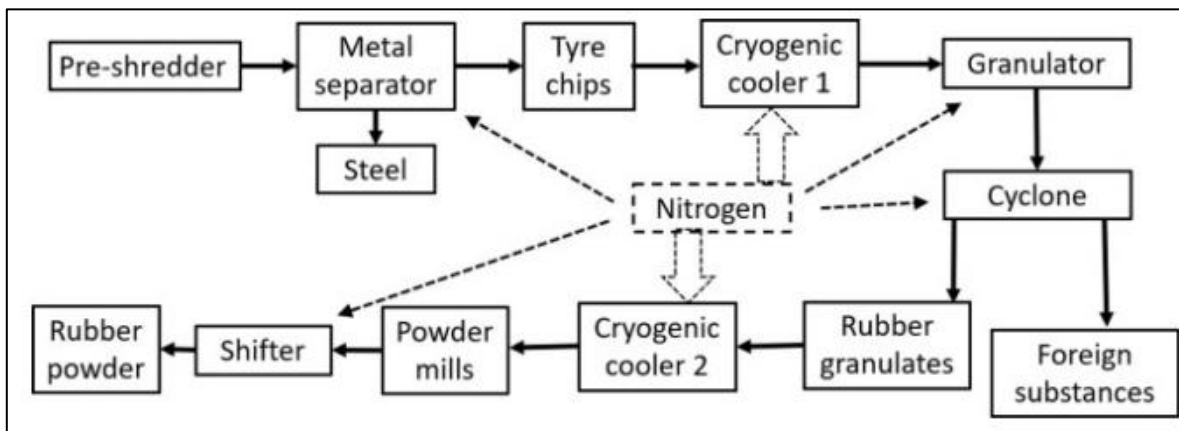


Figura 7. Representación esquemática del proceso de trituración criogénica

El proceso de trituración criogénica consta de un primer paso de enfriamiento del caucho con nitrógeno líquido generalmente. Luego, las piezas congeladas pasan a un molino (como un percutor o martillo), donde se muelen en piezas pequeñas de menos de 1 mesh. Luego, el material obtenido se lleva a secado, se separan las fibras y el metal, y se tamiza por tamaño. El tamaño de partícula es controlado generalmente por el número de ciclos de molido y el tiempo utilizado en el proceso de molienda. Sin embargo, el tiempo de inmersión en el agente congelante también es un factor determinante en el tamaño de partícula. La Figura 7 representa un diseño general para la molienda criogénica. Entre las ventajas de este proceso se cuentan los altos ratios de producción de molido de neumático y bajo uso de energía. Pero entre sus desventajas se encuentran la mayor inversión en equipos (como se puede apreciar en la Figura 7, requiere una fase de enfriamiento y secado). Además, en los costos de operación se debe tener en cuenta el costo de nitrógeno líquido (Zheng Xiao a, 2022).

3.3.3. Incineración

En este proceso se combustiona la materia orgánica del neumático a altas temperaturas en horno refractarios. Este proceso es espontaneo por encima de los 400°C, muy exotérmico y autosuficiente, necesitando energía solamente al inicio. Un incinerador está compuesto por distintas etapas: zona de almacenamiento y vertido, incinerador, grúas y mecanismos de carga, horno y equipos de control de la contaminación. El incinerador debe ser diseñado para que realice una combustión completa y que pueda soportar temperaturas sobre los 1150°C (Sharma, 2000). El valor calorífico de los neumáticos fluctúa entre 7500-8000 kcal/kg, por lo que se puede utilizar como combustible para el incinerador.

Aunque es un proceso relativamente sencillo y de bajo costo de instalación, también es un proceso altamente contaminante para el medio ambiente produciendo Monóxido de carbono, Xileno, Hollín, Óxidos de nitrógeno, Dióxido de carbono, Óxidos de zinc, Benceno, Fenoles, Dióxido de azufre, Óxidos de plomo, entre otros.

3.3.4. Pirólisis

La pirolisis (también llamado termo-destilación o termólisis) es un proceso en el cual se rompen enlaces químicos, sin la necesidad de ningún aditivo, bajo condiciones no oxidativas (en una atmósfera inerte o vacío) (Martínez, 2013). Mediante este proceso, se obtienen tres corrientes: una corriente gaseosa, compuesta principalmente por gases no condensables, una fracción sólida compuesta mayormente por carbono, metal y otros materiales inertes y una corriente líquida, compuesta principalmente por productos condensables. La Figura 8 muestra una simplificación del proceso. Es importante notar que una de las ventajas de este es que se pueden utilizar los productos producidos para disminuir los costos de energía, con rendimientos energéticos de entre un 70% y 90%. Sin embargo, los costos de una planta y el costo del tratamiento de residuos son algunas de las desventajas.

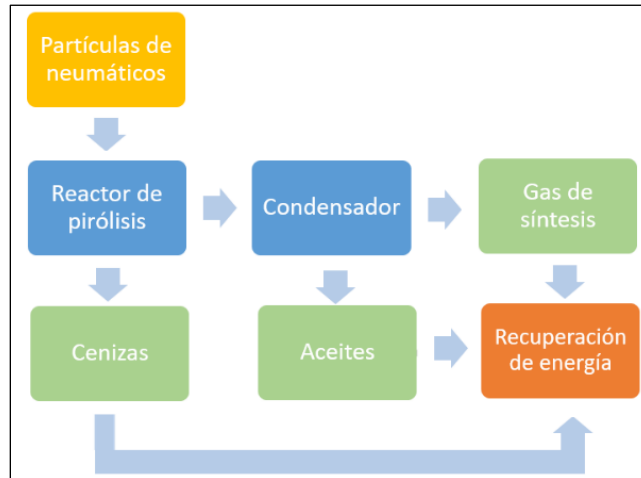


Figura 8. Esquema simplificado de pirólisis de neumáticos

La distribución de productos puede estar determinada por factores como temperatura y presión del proceso, velocidad en la transferencia de calor, el tamaño de partículas, tiempo de residencia, etc. Por ejemplo, un rápido enfriamiento favorece la generación de líquidos como producto, llegando en algunos casos hasta un 80% en peso. Por otro lado, una pirolisis lenta favorece la producción de carbonizado. Este proceso se conoce como carbonización y requiere una descomposición lenta a bajas temperaturas.

Como se mencionó anteriormente, en la pirolisis de neumáticos se generan tres corrientes, de las cuales se pueden obtener una variedad de productos con distintos usos.

En primer lugar, se tiene la corriente líquida. El aceite producto de la pirolisis es de tipo orgánico, de color café negruzco y con un fuerte olor acre. La manipulación debe ser cuidadosa, puesto que reacciona con la piel humana generando manchas permanentes y olores que perduran por varios días. Además, es de difícil remoción con detergentes. La composición de este aceite es variada: compuestos aromáticos (benceno, naftalenos, fenantrenos) con un 49%, alcanos (de 11 a 24 carbonos) y alquenos (8-15 carbonos), ambos suman un total de 16% aproximadamente. También se detectan pequeñas cantidades de nitrógeno, sulfuros y compuestos oxigenados. El poder calorífico de este aceite es alrededor de 44 MJ/kg. El uso principal de este líquido es como combustibles en hornos y plantas generadoras (Martínez, 2013).

Segundo se tiene la generación de gases, que comprende entre el 10-30% de peso el cual aumenta con el aumento de la temperatura. Este gas se puede utilizar como combustible, teniendo un poder calorífico de 30-40 MJ/Nm³. La composición de esta corriente son gases de tipo CO_x, H₂S y volátiles de 4 o más carbonos. Los primeros provienen principalmente de los compuestos orgánicos oxigenados presentes en los neumáticos. Los segundos, que se encuentran en bajas concentraciones, son producto de los enlaces sulfurados generados de la descomposición del caucho vulcanizado. Los terceros, el componente en mayor proporción en la fase gaseosa, se generan por la despolimerización del caucho estireno-butadieno (SBR, por sus siglas en inglés). Es importante notar que la fase gaseosa, al contener altas cantidades de metano y etano, se asemeja al gas natural. Con tan solo un 10-15% del gas generado se puede llevar a cabo todo el proceso. El resto se puede utilizar para el funcionamiento de otros equipos en la planta. (Muzenda., 2014)

Tabla 4. Factores que influyen en el rendimiento de la pirolisis (Muzenda., 2014).

Tamaño de partícula	Al haber un tamaño de partícula menor, aumenta el área superficial y en consecuencia, aumenta la transferencia de calor y 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.
Temperatura	El aumento de la temperatura de pirolisis conlleva una reducción en 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.
Tiempo de residencia	Aumentos en los tiempos de residencia genera una disminución de los montos de líquidos y sólidos, mientras los gases aumentan. Esto se debe principalmente a la descomposición de aceites en gases de forma permanente. Primeramente, se producen vapores de la pirolisis a una temperatura óptima, luego estos vapores se degradan en gases secundarios (esto es, vapores generan gases pesados (CH ₄ +C ₂ H ₄ +...) + gases livianos (CO+CO ₂ +H ₂)). Adicionalmente, al aumentar el tiempo de contacto de los volátiles (CO ₂) con los productos sólidos carbonosos, se genera una reacción secundaria para generar monóxido de carbono.

En último lugar, de la fase sólida se pueden obtener compuestos carbonosos para distintos usos. Las cenizas obtenidas de la pirolisis en función del poder calorífico se asemejan al carbón de alta calidad y puede ser utilizado como combustible, al igual que la fase líquida y gaseosa. También, los productos sólidos de la pirolisis se pueden utilizar para la fabricación de termoplásticos y como absorbentes de bajo costo para el tratamiento de RILES.

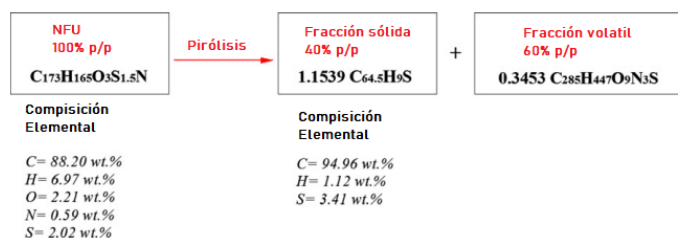
El residuo de la combustión también se puede transformar en carbón activado, llegando este a tener propiedades similares a carbonos activados comerciales. La Tabla 5 muestra las propiedades de carbón activado, obtenido de un proceso de tratamiento de negro de humo con ácido y luego activado a una temperatura de 900°C en un horno. (Muzenda., 2014)

Tabla 5. Propiedades de carbono activado obtenido a partir de negro de humo (Muzenda., 2014)

	Área sup. (m ² /g)	C	O	Si	S	Z	Ca
Negro de humo (sin tratar)	85	83	6	1.6	2.6	4.2	2.4
Negro de humo (HCl)	870	93	5.1	0.4	0.9	0.6	-
Negro de humo (HCl+act.)	940	94	4.3	0.4	0.8	0.6	-
Negro de humo (H₂SO₄)	800	87	5.9	0.6	1.8	2.9	1.8
Negro de humo (H₂SO₄+act.)	910	30	4.4	0.6	1.2	2	1.8
C. activado comercial	990	96	2.9	-	0.3	-	-

Según los análisis mostrados en la Tabla 5, la calidad de los productos obtenidos en comparación con los productos comerciales es similar. Sin embargo, no existe información en cuanto a la obtención de grafeno, pero si en relacionado a otro tipo de compuestos (Zheng Xiao a, 2022).

En otro punto, la reacción elemental que se lleva a cabo en una pirolisis para poder maximizar el producto que se quiere obtener. Se puede simplificar de la siguiente forma (Martínez, 2013):



Sin embargo, existen varias teorías de los mecanismos de reacción del caucho para la formación de productos.

Los polímeros son estructuras compuestas por enlaces simples y dobles de carbono, junto a otros elementos. En el caso particular del caucho, este está caracterizado por la mayor proporción de enlaces dobles en su estructura. En otros términos, se puede describir el proceso de pirólisis como una descomposición térmica que produce radicales libres muy reactivos, con una transferencia de hidrógeno y una subsecuente ruptura de la cadena principal del polímero. Según lo propuesto por *Groves et. al* (1990) la formación de dipenteno puede ser explicada de dos formas: como el resultado de una ciclización intramolecular para un posterior corte de la cadena (I) o también como el resultado de recombinación de monómeros por una reacción de tipo Diels-Alder (II) (fuente). Esta última son un tipo de reacción pericíclica de cicloadición, que se produce entre un compuesto con dos dobles enlaces conjugados y dienófilo (alqueno). La Figura 9 muestra el esquema de ambos mecanismos de reacción. Es importante notar que estas reacciones están estudiadas para el caucho natural, sin tomar en cuenta el azufre presente en el caucho vulcanizado. Tanasi et. al (2019) reporta una reacción de Diels-Alder donde también están presentes grupos atractores de electrones dienófilo, como es el caso del azufre en el caucho vulcanizado. De la misma forma, la presencia de grupos atractores de electrones en las posiciones C2 o C3 del dienófilo aumenta su velocidad de reacción.¹⁰

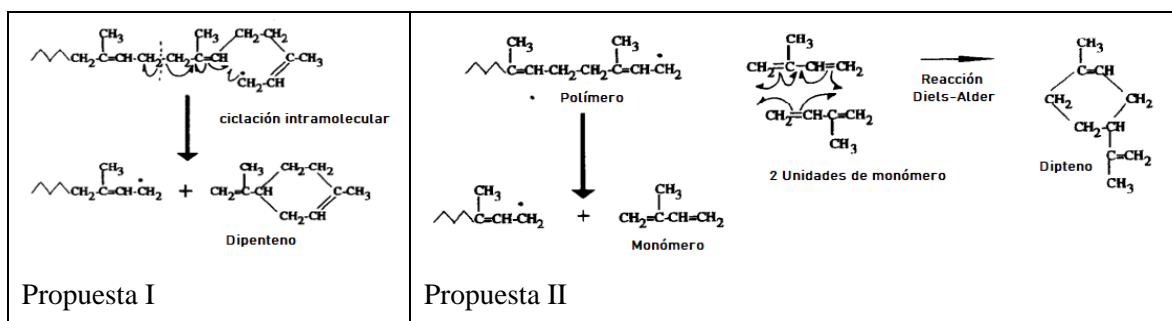


Figura 9. Mecanismos propuestos para la formación de compuestos más simples a partir de caucho natural en el proceso de pirólisis. por Groves et. al (1990)

Pakdel et. al, 2000 propusieron dos mecanismos: una reacción radical de alta energía y otra reacción de dimerización de baja energía. La primera se caracteriza por la producción de hidrocarburos de relación C:H alta y la segunda por una baja relación de C:H, como es el caso del dipenteno. Se cree que los dos mecanismos se producen durante el transcurso de la pirólisis, pero a diferentes ritmos, temperaturas y tiempos de la siguiente forma: el polímero de caucho se descompone térmicamente por una incisión Beta, produciendo radicales libres (intermediario de isopreno) para transformarse después en isopreno. Luego, las moléculas de isopreno en fase gaseosa se dimerizan en dipenteno. Sin embargo, si la temperatura del reactor y el tiempo de residencia son demasiado

altos, entonces el mecanismo de alta energía es el dominante, descomponiendo las moléculas de dipenteno en isorpropeno nuevamente, junto con otros compuestos. La formación de estos compuestos cíclicos por medio de los mecanismos propuestos anteriormente sería la primera parte para la formación de grafeno por medio de pirolisis, que es el objetivo final de este trabajo.

También durante el proceso y debido al contenido de azufre en las llantas vulcanizadas, se genera H_2S presente tanto en el gas como en el aceite de pirolisis. Los valores de estos varían en función de la marca y el tipo de llanta, fluctuando entre 1.54% p/p a 0.72% p/p, 1.9% p/p a 2.32% p/p y 0.21% p/p a 1.4% p/p para el aceite, *char* y gases producidos en la pirolisis respectivamente. Este compuesto es tóxico y nocivo para la salud, produciendo entre otras consecuencias irritación de vías respiratorias

3.4. Grafeno: descripción y aplicaciones.

El grafeno es un material bidimensional de carbono de hibridación sp^2 en forma de láminas, con una estructura geométrica hexagonal como panales de abeja, cuyo espesor es el equivalente al diámetro de un átomo (Xin Jiat Lee, 2019). Este material fue descubierto en el 2004 por Andre Geim y Konstantin Novoselov de la Universidad de Manchester, siendo reconocidos en el año 2010 con el premio nobel por este logro. El grafeno es un material muy estable, producto a que los átomos se encuentran muy cerca o muy apretados en el entramado cristalino del grafeno y sus materiales relacionados (Rudrapati, 2020). El grafeno se compone de carbono puro, donde cada átomo de carbono está unido por enlaces covalentes y donde las monocapas están unidas por fuerzas de Van der Waals. La Figura 10 muestra el entramado hexagonal característico del grafeno, que le otorga su estabilidad y propiedades.

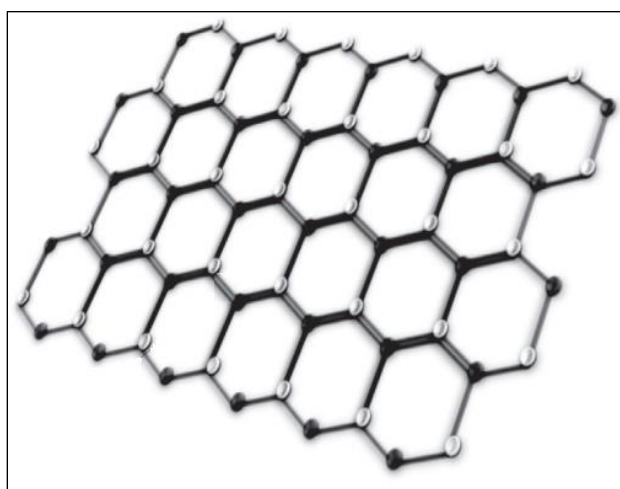


Figura 10. Estructura geométrica del grafeno (Xin Jiat Lee, 2019)

El grafeno es considerado un material con propiedades mecánicas, electrónicas, térmicas, ópticas y químicas, con gran superficie, conductividad térmica y eléctrica superior, alto movimiento de electrones, químicamente estable y excelente transmisión de luz (Rudrapati R., 2020), como muestra la Tabla 6. Como se puede observar, las propiedades le otorgan al grafeno un gran potencial en diferentes aplicaciones industriales como medicina, la industria electrónica, industria del papel, etc.

Tabla 6. Aplicaciones del grafeno (Rudrapati, 2020)

Aplicación	Descripción
Electrónica de alta velocidad	Las propiedades de conductividad del grafeno lo hacen ideal para la fabricación de dispositivos eficientes, ya que es necesario una alta conductividad eléctrica. Sin embargo, las aplicaciones comerciales del grafeno están sólo en las etapas iniciales.
Almacenamiento de datos	Un área de investigación importante, donde se están desarrollando discos duros de gran capacidad de almacenamiento. Estos estudios están enfocados en el reemplazo del óxido de indio y estaño por materiales de grafeno. Los resultados arrojan capacidades de lectura-escritura en discos de hasta 10 veces superior.
Tecnologías LCD	Actualmente las tecnologías de LCD utilizan contraelectrodos de óxido de indio y estaño. Pero estos materiales tienen desventajas: naturaleza quebradiza y su disponibilidad limitada. A diferencia de estos, el grafeno es flexible y su disponibilidad es más o menos ilimitada. Debido a esto, el uso del grafeno en tecnologías de smartphones, tablets y televisores inteligentes es un campo importante de investigación.
Supercapacitores	El boom tecnológico hace necesario el almacenamiento de grandes cantidades de energía para el funcionamiento de diversos dispositivos. Un supercapacitor es un dispositivo de almacenamiento de energía que utiliza una gran superficie interna para almacenar la carga para entregar corrientes más altas en comparación con los capacitores normales. Por su gran área interna, existe un campo de investigación para la fabricación de supercapacitores basados en grafeno.
Celdas fotovoltaicas	El cambio energético y las problemáticas ambientales, obliga a utilizar métodos alternativos de producción de energía. Las celdas fotovoltaicas son parte fundamental de este proceso. Su fabricación se basa en platino, por su alto costo su uso es muy limitado. Por otro lado, el grafeno es un excelente conductor que es un material potencial para las células solares. Su bajo costo y al ser un material liviano, lo hacen un candidato ideal para sustituir al platino en estas aplicaciones.

La Tabla 7 muestra un resumen de los métodos actuales para la producción de grafeno. Sin embargo, el objetivo de este trabajo es partir de un material poco común como son las llantas y llegar a un material de alta calidad.

Tabla 7. Resumen de métodos actuales para la producción de grafeno

Método	Descripción
Exfoliación micromecánica	La exfoliación micromecánica es un método de producción de materiales basados en grafeno que consiste en pelar sistemáticamente el grafito pirolítico ordenado con el uso de cinta adhesiva. Durante este proceso el grafeno se separa de los cristales de grafito, “descascarandolo”. Después de completar el pelado, el grafeno multicapa queda en la cinta. El grafeno se corta en varias escamas de pocas capas pelando continuamente el grafeno multicapa. En este proceso, las capas de grafeno se unen fuertemente por fuerzas de Van der Waals. Es un método de fabricación simple y fácil para producir materiales de grafeno, pero no es adecuado para la producción a gran escala de grafeno.
Exfoliación fase líquida (EFL)	Este es un método de producción de materiales de grafeno utilizando de disolventes como el ácido acético, el ácido sulfúrico y el peróxido de hidrógeno, exfoliando el grafito mediante ultrasonido. La metodología de sonicación se utiliza en la EFL para exfoliar el grafeno partiendo de grafito, ya que el grafito contiene diferentes capas de grafeno que se adhieren por fuerzas de Van der Waals. Este método se utiliza para fabricar nanorribones de grafeno, pero la producción a gran escala es complejo por este método.
Deposición química de vapor (CVD)	En este proceso, se utiliza níquel y cobre para la producción en gran escala de grafeno. Durante el proceso de CVD, la película de metal se deposita en el sustrato. Después del grabado químico, una mezcla que contiene carbono pasa a la cámara de reacción.
Síntesis de llama	La síntesis de llama es un método de producción en masa muy utilizado para la fabricación de nano partículas, siendo un método experimental para la producción de grafeno. Este método no está bien adaptado para la producción de grafeno si se compara con el CVD. Sin embargo, debido a su potencial de escalado, es un método que se mira con mucho interés por la comunidad científica.

3.5. Proceso para la producción de grafeno por medio de pirólisis. (Wang et. Al 2019)

Como se mencionó anteriormente, uno de los objetivos de este trabajo es obtener materiales carbonosos con valor agregado a partir de pirólisis de NFU. A nivel laboratorio Wang et al, 2019 propuso un proceso de la siguiente forma: la primera parte es obtener partículas de NFU de tamaños de entre 4-8 μm . Seguidamente esta materia prima es activada con KOH en una atmósfera de argón, bajo distintas temperaturas entre 800-1000°C con periodos fluctuando entre 2-8 horas de tratamiento, a una velocidad de calentamiento de 5°C/min. La Figura 11 muestra de gráfica el proceso llevado a cabo. Durante el estudio mencionado se hicieron muestra con y sin potasio, para medir el efecto de este en la formación de grafeno.

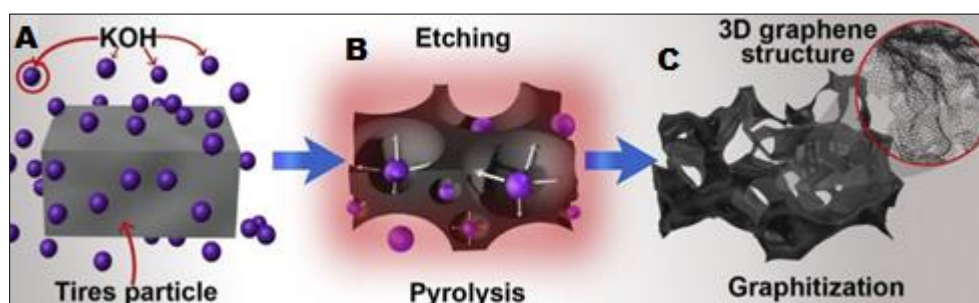


Figura 11. Esquemática de formación de grafeno a partir de NFU con activación de KOH.

Los resultados mostraron que la red 3D de grafeno se encontró recién a los 1000°C, pasando de una forma de carbono monolítico a grafeno. A los 900°C el potasio se activa y comienza a reaccionar con el carbono, generando la red deseada de este compuesto. Al mismo tiempo, el potasio remueve por medio de reducción los grupos funcionales existentes. Seguido a esto, las altas temperaturas de hasta 1000°C lleva en primer lugar a la restitución de enlaces, para luego con un reordenamiento de los átomos de carbono debido al potasio “grafitizandolo” a medida que la temperatura aumenta. Durante el proceso se generan distintas pérdidas de masa, siendo las más notorias aquellas que están entre 0-100°C, 140-240°C, 290-400°C y 800-940°C. Durante los primeros dos intervalos esta pérdida se genera debido a la pérdida de humedad y la dehidrogenación de los compuestos orgánicos para producir *char*. Cuando la temperatura sigue aumentando en el rango de 400-800°C, se pueden generar distintos compuestos que contengan potasio, y adicionalmente el potasio puede reducir el carbono para generar potasio metálico, hidrógeno y carbonato de potasio. Los resultados muestran que las mejores características para este producto se producen a los 1000°C y cuando se realiza un ciclo de hasta 8 horas de pirólisis, debido a que esa temperatura se consigue la

activación del potasio y también se consigue el mejor comportamiento en cuanto a la capacitancia de doble capa, característica deseada para una de las aplicaciones del grafeno: la construcción de supercapacitores. Una de las desventajas para poder escalar este proceso fue la poca información respecto a los equipos utilizados para llevar a cabo el experimento, su tamaño y la cantidad de material empleada. Por ello, se investigaron estudios similares en cuanto a materiales.

Olga Bicáková et al., 2016 propuso un sistema de co-pirólisis de NFU con aditivos. La Tabla 8 muestra las similitudes entre ambos procesos. En base a esto, se realizó el escalamiento del proceso posterior.

Tabla 8. Comparación de los procesos para el escalamiento.

Propiedad	Bicáková et al., 2016	Wang et al., 2019
Materia prima	Gránulos NFU	Gránulos NFU
Aditivo	Carbón	KOH
Vel. De calentamiento	5°C/min	5°C/min
Temperatura de pirólisis	800-1000 °C	900 °C

4. Bases y criterios de diseño.

4.1. Proceso propuesto para escala piloto de generación de grafeno

4.1.1. Determinación del flujo másico

La primera parte es determinar la base de cálculo para este proceso. Otros trabajos propone una capacidad de 840 toneladas de neumáticos al mes, así se deberían procesar 415 kg/h (Olivares Carmona, 2016). Considerando la ubicación de la planta en la región de Antofagasta, donde según los antecedentes previos, se generan (junto a las regiones de Tarapacá, Arica y Atacama) solo el 11% del total de NFU nacional. Por otro lado, (Tirel, 2017) presentó un proyecto de una planta trituradora con capacidad de 1.518 toneladas de gránulos anual. Esta planta estaría ubicada teóricamente en la comuna de Lampa, en la región metropolitana. La capacidad de procesamiento de esta planta sería 250 kg/h de gránulos de caucho. Los valores anteriormente presentados para proyectos de procesamiento de caucho podrían servir como base de diseño para el proyecto propuesto de esta memoria.

En base a esto, se propone una planta para pirolizar 500 kg/carga de mezcla como base de diseño. Así los equipos deben ser diseñados para esta capacidad, debido a que Wang et al., 2019 no especifica un flujo másico. Se debe considerar que el 47% de la masa total del neumático se recupera como materia prima para ser utilizada como gránulos de caucho.

4.1.2. Especificación del proceso

Se propone un sistema de dos partes: molienda mecánica y pirolisis. La Figura 12 propone un esquema basado en los pasos descritos por Wang et al., 2019 para el diseño propuesto, presentando las partes principales del proceso, para luego pasar al diseño de cada una de ellas.

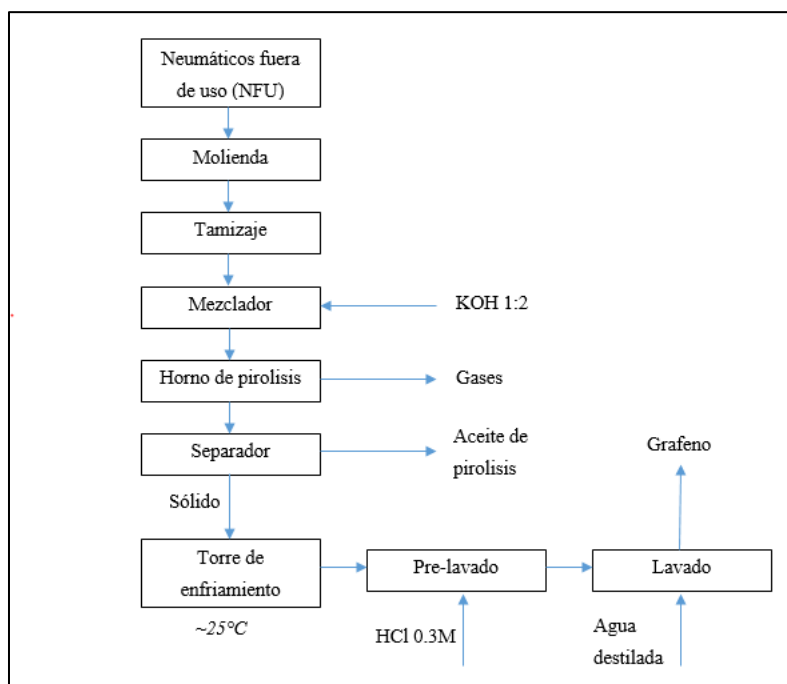


Figura 12. Diagrama de proceso pirolisis propuesto para obtener grafeno.

La primera parte del proceso consiste en una molienda mecánica se puede realizar con un molino de neumáticos capacidad de procesamiento de 443 kg/ciclo, con gránulos de hasta un tamaño de 5 mesh. La siguiente parte corresponde a un tamiz para separar los residuos restantes, además de un ciclón para obtener el tamaño de partícula deseado. Este último equipo también fue diseñado para las especificaciones de este trabajo. Considerando esto y además con los datos mencionados en la primera parte, aproximadamente el 47% de la masa total del neumático se recupera como materia prima.

Después de la molienda, corresponde la parte química del proceso. Se mezclan en proporción 1:2 gránulos de cacho con KOH, en un estanque bien agitado. Con el fin de evitar segregación, se debe considerar el tamaño de partícula del KOH y los gránulos sean similares. Se pueden emplear accesorios adicionales al mezclador para evitar la segregación a la salida del mezclador.

La siguiente etapa es la pirólisis. La primera parte corresponde a un proceso de secado. Basándose en la parte experimental de Wang et. Al., 2019 se propone un ciclo de 8 horas, con una velocidad de calentamiento de 5°C/min hasta llegar a una temperatura de 1000°C. Como no se tienen datos específicos del horno y según lo mencionado en la sección 3.6, el escalamiento se basará en los datos de equipo reportados por Bicáková et al., 2016 para un proceso análogo al propuesto por Wang et al., 2019.

Luego de la pirólisis, se envía a un lavado con solución de HCl al 0,3 M y luego nuevamente a un lavado con agua destilada, hasta obtener un pH cercano a 7.

4.2. Equipos

4.2.1. Molino de neumáticos

El molino de neumáticos se optó por no diseñarlo. En cambio, se investigaron distintas alternativas para poder satisfacer la demanda del proyecto. Tirel K., 2017 diseñó un horno de molienda criogénica con una capacidad de 500 kg/h y operado a -100°C . Los gránulos deben tener un tamaño 5 mm por lo que este molino sería una alternativa para esta memoria, pero también al utilizar una corriente de nitrógeno como enfriador aumentaría los costos de operación de una planta. Por lo que se optó por una alternativa disponible en el mercado de la compañía BEMT Co, Ltd, que cumple con los parámetros de tamaño de partícula. La Figura 13 muestra el equipo mencionado.

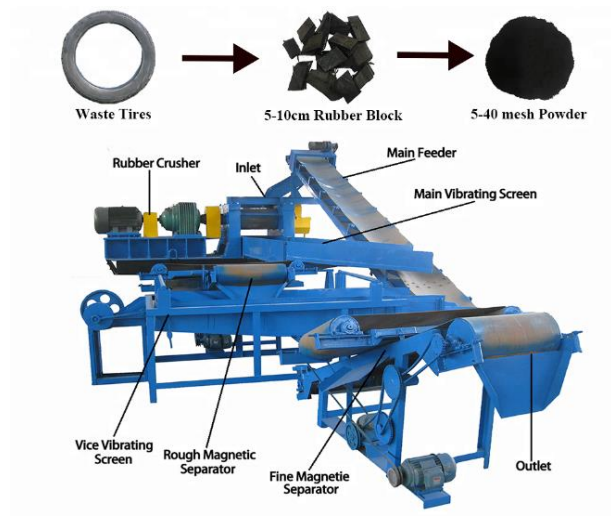


Figura 13. Molino de neumáticos BEMT Co, Ltda.

4.2.2. Mezclador de KOH y gránulos de caucho

Existen distintos equipos para utilizar en la parte de mezclado. Perry, 1997 propone diferentes clases de equipo según el uso para darle. Como se requiere mezclar dos sólidos granulados, se seleccionó un mezclador de cinta, el más adecuado para este tipo de operaciones según la literatura. La Figura 14 muestra un ejemplo de este tipo de mezclador. Se puede apreciar que se trata de un tambor con un juego de paletas internas.

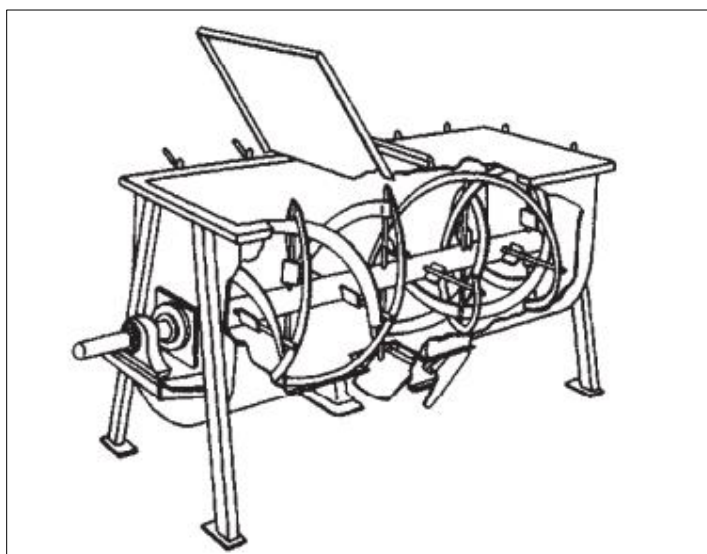


Figura 14. Mezclador de sólidos tipo cinta
Fuente: Perry, 1997

Para calcular el tamaño del equipo requerido se utilizó como base de cálculo la carga de 443 kg/ciclo. El tiempo de mezclado corresponde a 15 minutos según la recomendación de la literatura. Adicionalmente el llenado por lote no debe sobrepasar el 80% del volumen total del equipo, así como la velocidad de giro se recomienda generalmente en 50 rpm, aunque también está condicionado a la recomendación del fabricante.

Para determinar el volumen necesario del equipo, se requiere conocer la densidad tanto del KOH como de los gránulos de caucho, para determinar la densidad media de la mezcla. La Tabla 9 muestra los datos encontrados.

Tabla 9. Datos de los materiales para el cálculo del volumen del mezclador

Material	Densidad, g/cm³
Gránulos caucho	0.45
KOH	1.06*
Mezcla 1:2	0.86

*Para una presentación de pequeñas esferas, se supuso una densidad de la mitad del valor original para el material compacto.

4.2.3. Horno de pirólisis.

En esta sección se presentan las consideraciones para el escalado del horno de pirólisis y su posterior diseño. Se considera un reactor de ciclo discontinuo, debido que para procesos similares la literatura muestra que se utilizó este régimen de producción.

Se diseña el horno para pirolizar 500 kg/ciclo de mezcla. Cada ciclo tendría una duración de 8 horas, según los resultados de Wang et al., 2017 para lograr un producto de alta calidad y con las características deseadas. Se prevé un funcionamiento de 24 horas al día, esto es 3 ciclos diarios, con 252 días laborales dando como resultado 113 toneladas al año de grafeno. Considerando lo presentado por Martínez et al., 2013, la pirólisis genera hasta 40% de material sólido. Sin embargo, Bicáková et al., 2016 muestra una producción de hasta 60% de material sólido, para el caso en que se combina en alta proporción el caucho con otros aditivos. Debido a que el proceso propuesto es similar, se considerará este último valor. De esta forma, la Tabla 10 muestra los flujos máxicos utilizados para el diseño.

Tabla 10. Flujos utilizados para el diseño del horno de pirólisis

Item	kg/ciclo
Mezcla al horno	500
Grafeno impuro	300
Aceite de pirólisis	150
Gases	50

Adicionalmente, se tienen los valores a escala laboratorio del proceso propuesto por Bicáková et al, 2016 mostrados en la Tabla 11.

Tabla 11. Dimensiones horno para el diseño de Bicáková et al, 2016

Item	Valor
Largo, m (L1)	0.5
Diámetro interno, m (D1)	0.095
Carga, kg	0.33

Siguiendo las técnicas de escalamiento propuestas por Peña, R. 1978. Se tienen dos incógnitas: D2 y L2. La primera ecuación de escala se obtiene igualando los tiempos de residencia, esto implica la relación de los flujos promedio en el reactor y esto es igual a los volúmenes. De esta forma:

$$\gamma_{Q'} = \gamma_V \dots (eq. 1)$$

En segundo lugar, se obtiene la igualdad en la relación de flujo de alimentación:

$$\gamma_w = \gamma_Q = \frac{D_2^2 L_2}{D_1^2 L_1} = \frac{500}{0.33} \approx 1515 \dots (eq. 2)$$

Adicionalmente, se relaciona el volumen y la longitud del reactor de la siguiente forma:

$$\gamma_V = \gamma_{L3}$$

De esta forma, se obtiene:

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{L_1}{L_2} \rightarrow 0.19L_2 = D_2 \dots (eq. 3)$$

De esta forma, reemplazado (3) en (2):

$$\frac{(0.19L_2)^2 L_2}{(0.095)^2 0.5} = 1515 \rightarrow L_2 \approx \mathbf{5.74 \text{ m}}$$

Luego,

$$0.19 * 5.74 \approx \mathbf{1.10 \text{ m}}$$

Así, las dimensiones del horno diseñado son diámetro de 1.10 m y largo de 5.72 m. Con estos valores se puede determinar el valor del horno utilizando reglas heurísticas. Se investigaron

alternativas disponibles en el mercado de hornos de pirólisis. Una de ellas corresponde a un horno producido por la empresa *Shanghai Gehang Vacuum Technology Co., Ltd.*, mostrado en la figura 4.4.



Figura 15. Horno de pirólisis SIMUWU
Fuente: Shanghai Gehang Vacuum Technology Co., Ltd.

Este horno alcanza temperaturas de hasta 2000°C y los tamaños están en rango con los valores calculados anteriormente lo que confirmaría el diseño realizado

Otra alternativa a esto sería utilizar un horno de microondas para poder realizar la pirólisis. La ventaja de este equipo radica en la baja contaminación que genera su uso y el reducido tamaño. Se realizó una cotización con la empresa Fricke und Mallah Microwave Technology GmbH para un horno con estas características. Esta tecnología fue descartada debido a su alto costo y limitada capacidad de procesamiento.

4.2.4. Estanque de almacenamiento solución HCl concentrada

La función de este estanque es almacenar la solución de HCl para neutralizar cualquier resto de KOH presente en el grafeno de salida. Wang et. al, 2019 utilizó una concentración de 0,3M, sin embargo se optó por una solución concentrada al 2M para alcanzar el pH necesario en el estanque de neutralización. Es importante considerar las propiedades corrosivas de este compuesto a la hora de elegir el material de construcción. La

Tabla 12 muestra los parámetros de diseño del estanque. Se consideró un volumen de $\frac{1}{4}$ del estanque de neutralización.

Tabla 12. Parámetros de diseño estanque de almacenamiento KOH

Volumen de diseño, m³	0,35
Material	Acero inoxidable
Temperatura diseño, °C	25°C
Altura, m	0,77
Diámetro, m	0,77

4.2.5. Estanques de neutralización y lavado

El estanque de neutralización tiene como función el lavado con solución de HCl el material sólido saliente del horno de pirólisis. Es importante considerar que el material proveniente del horno debe estar a temperatura ambiente. Se consideró una densidad de $1,8 \text{ g/cm}^3$ para el material sólido saliente del horno, densidad del negro de humo común. Adicionalmente, se considera una producción por ciclo de 300 kg de material sólido, según los datos de la Tabla 10. Por reglas de diseño, el diámetro y la altura están en relación 1:1 y se adiciona un 20% por seguridad al volumen final. El volumen del estanque se calcula en función de la concentración de sólidos requerida en el filtro, esto es 30% en sólidos, según recomendación de la literatura. Luego, el volumen total del estanque es $1,2 \text{ m}^3$. Se debe implementar un control de pH en el estanque para lograr neutralizar el remanente de KOH, inyectando solución concentrada de HCl. La Tabla 13 muestra los parámetros de diseño del estanque.

Tabla 13. Parámetros de diseño Estanque de Prelavado

Volumen de diseño, m³	1,2
Material	Acero inoxidable
Temperatura diseño, °C	25°C
Altura, m	1,15
Diámetro, m	1,15

4.2.6. Filtro rotatorio

El filtro rotatorio tiene por objetivo concentrar el grafeno proveniente del estanque de neutralización y lavarlo para eliminar cualquier residuo remanente de HCl, KCl o KOH. Se determinó la masa de torta filtrada con la concentración de grafeno en el tanque de neutralización. Se consideró una velocidad de filtrado por área de filtro según las recomendaciones de la literatura. La

Tabla 14 considera los parámetros de diseño del equipo y el área resultante para la selección del equipo.

Tabla 14. Parámetros de diseño de filtro rotatorio

Masa torta después de filtrado, kg/h	300
Fracción sumergida	1/3
Filtrado promedio, kg/m²h	122
Conc. Sólidos, %m/v	30
Área de filtro, m²	0.82

Del catálogo de TEFSA™, se seleccionó un equipo con un área inmediatamente mayor, como se muestra en la Tabla 15. La Figura 16 muestra un esquema del equipo con sus dimensiones.

Tabla 15. Dimensiones filtro TEFSA

Área filtrante, m²	1,45	Longitud A, mm	2300
Diámetro tambor, mm	920	Anchura B, mm	2050
Anchura tambor, mm	500	Altura C, mm	1700
Número de celdas	14	Consumo Energía, kW	1,5



Figura 16. Filtro rotatorio TEFSA™
Fuente: gruptefsa.com

4.3. Localización geográfica

Las zonas más viables para la localización de la planta piloto serían: la zona de Antofagasta, donde se localiza la mayor parte de la industria minera; la región Metropolitana, debido a que cuenta con la mayor cantidad de NFU a nivel nacional y la zona del gran Concepción, por su zona industrial y la cantidad de NFU que genera anualmente. Se prefirió la localización fuera de Santiago, particularmente en la zona Concepción, en concordancia con las políticas públicas de descentralización. Se eligió un terreno de 1.667 m², con una bodega construida por un valor mensual de \$1.350.000 mensuales. La Figura 16 muestra el recinto la ubicación tentativa de la planta piloto.



Figura 17. Ubicación tentativa en sector industrial Palomares en Concepción, Región del Bío-Bío

4.4. Diagrama de Flujo

La Figura 18 muestra una ubicación tentativa de los equipos utilizados durante el proceso propuesto. En este diagrama no se consideró plantas de tratamiento para desecho, ni la planta de

osmosis. Tampoco incluyó los procesos anexos requeridos para tratar ni el aceite de pirólisis ni tampoco los gases resultantes del proceso. Adicionalmente, se incluyo en el esquema el balance de masa para la generación de 300 kg/ciclo de grafeno.

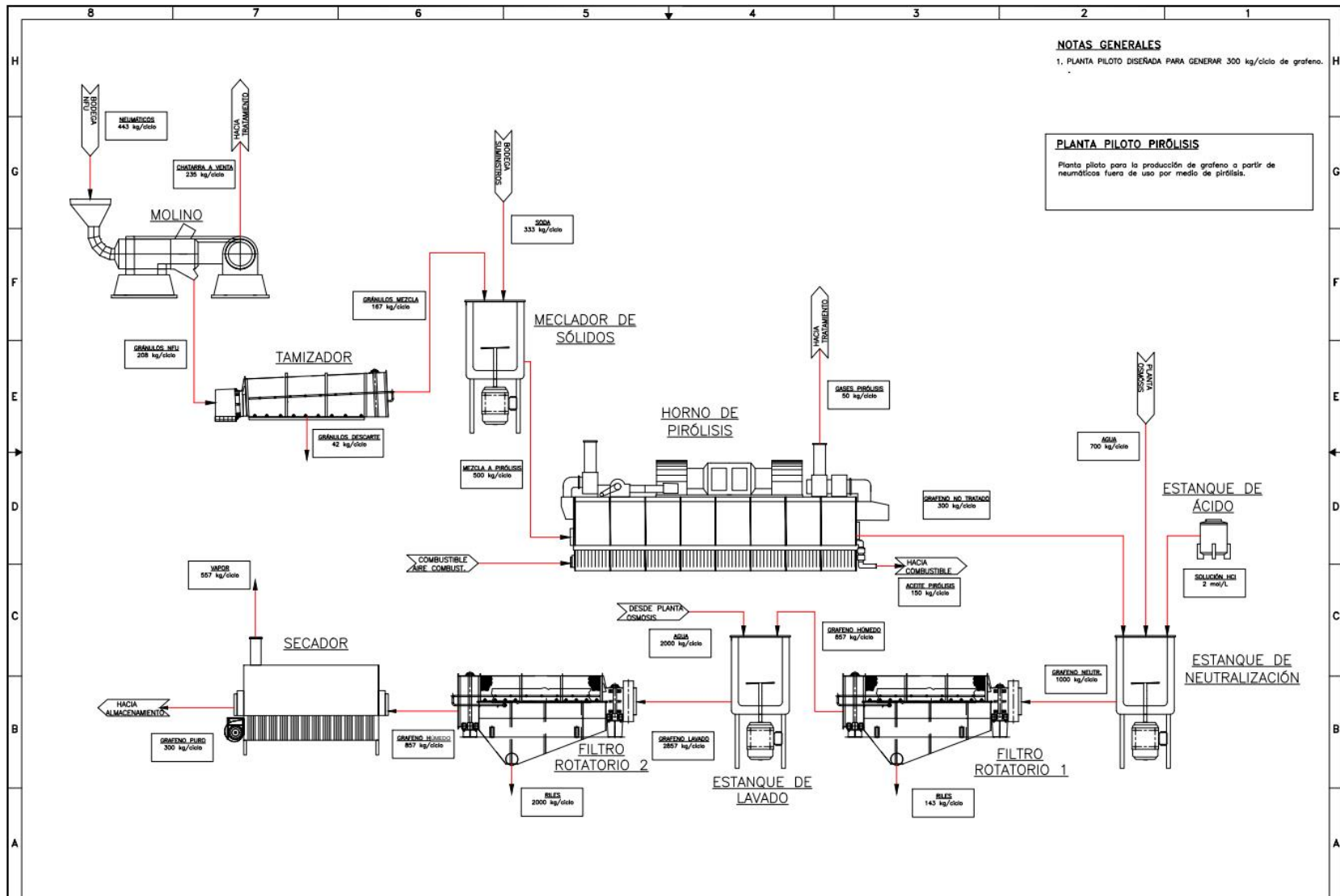


Figura 18. Diagrama de flujo para la pirólisis de NFU y posterior obtención de grafeno

5. Análisis económico

El análisis de la planta piloto de pirólisis se realizó con los costos de inversión inicial, costos fijos, costos variables, la depreciación de activos y los beneficios provistos. Se presenta también la estrategia de inversión y los flujos de caja correspondiente a distintos casos según los beneficios de las ventas.

5.1. Inversión inicial

La inversión inicial considera el costo de los equipos, el costo de instalación, capital de trabajo e imprevistos. El costo de equipos se determinó con costo de instalación incluido, el capital de trabajo se considera como el costo de abastecimiento de materias primas por los primeros 3 meses. Los imprevistos se pueden estimar como el 10% de costos de equipos. La Tabla 16 muestra un resumen de los ítems anteriormente mencionados.

Tabla 16. Inversión inicial

	Item	Costo, \$
Equipos	Molino de neumáticos	\$14,552,090
	Tamiz	\$1,541,600
	Mezclador de secos	\$3,771,600
	Horno de pirólisis	\$16,500,750
	Estanque almacenamiento HCl	\$2,042,950
	Estanque neutralización	\$2,042,950
	Estanque de agua	\$2,042,950
	Equipo de osmosis inversa	\$1,728,650
	Filtro rotatorio	\$15,715,000
Total Equipos		\$59,938,540
Capital de trabajo		\$5,993,854
Imprevistos		\$5,963,762
TOTAL		\$71,896,156

5.2. Costos fijos

Los costos fijos incluyen arriendo del terreno industrial para la instalación de la planta, los salarios de los ingenieros, técnicos y administrativos. Se considera por día: dos ingenieros para turno día y turno noche, seis operarios por día, un administrador y una persona de aseo. Se encontraron datos de las diferentes remuneraciones en la página de Wage Indicator Foundation. Se cotizó el arriendo de un galpón de 700 m² en la zona industrial de Concepción “Jaime Repullo”. La Tabla 17 muestra un resumen de los costos fijos.

Tabla 17. Costos fijos

SALARIOS				
CARGO	SALARIOS	NÚMERO	MENSUAL	ANUAL
Ingeniero jefe	\$1,205,000	2	\$2,410,000	\$28,920,000
Operador	\$867,952	6	\$5,207,712	\$62,492,544
Secretaría	\$450,000	1	\$450,000	\$5,400,000
Administrador	\$808,750	1	\$808,750	\$9,705,000
Aseo	\$360,000	2	\$720,000	\$8,640,000
TOTALES PERSONAL			\$9,596,462	\$115,157,544
ARRIENDO				
			MENSUAL	ANUAL
Galpón 1300 m ² zona industrial Concepción			\$2,000,000	\$24,000,000
TOTALES				
TOTAL MENSUAL			TOTAL ANUAL	
\$11,596,462			\$139,157,544	

5.3. Costos variables

Esta sección considera los costos relacionados a materias primas, de energía y de mantenimiento de equipos. En primer lugar, los neumáticos en si no tienen costo propiamente tal, pero se tiene asociado un costo de transporte desde el punto de acopio hasta la planta. Se debe realizar al menos 1 viaje diario para abastecer la planta de materia prima. Para esto se consideró el costo de transporte de materiales dentro de la ciudad. En segundo lugar, se tienen los costos asociados al agua y los reactivos utilizados en el proceso. La Tabla 18 resume los costos variables del proceso.

Tabla 18. Costos variables

Ítem	Por kg
Precio Venta	\$6,500
Costo Fijo	\$2,204
Costo Variable	\$2,043
Costo total	\$4,247
Margen	\$2,253

5.4. Estructura de costos consolidada

La estructura de costos consolidada corresponde un ítem resumen de los costos (fijo y variable), administración y venta y precio de venta del producto. La mayoría de los valores anteriormente mencionados fueron ya calculados, a excepción del precio de venta. En este caso, se investigaron los distintos valores en el mercado. Por ejemplo, un reporte del Graphene Council del año 2020 reporta en un rango de US\$50/kg y US\$3000/kg. (The Graphene Council, 2020). El portal Alibaba mostró precios entre \$73.700 y \$ 147.400. Se consideró el precio menor, por ser valores reportados en el portal para grafeno de calidad industrial.

En el caso de los costos de administración y ventas se considera un porcentaje del 10% del precio de venta, según datos de literatura.

La Tabla 19 muestra los valores por cada ítem por kilogramo de producto listo, además de los valores mensuales y anuales totales. Es importante notar el alto margen de ganancia resultante de este análisis, debido al alto precio de venta del producto y esto es considerando el menor valor de venta encontrado en la literatura. El valor de venta podría variar dependiendo de la calidad del producto final, datos que no existen debido a que no se tienen datos de calidad del producto a escala piloto. Considerando que el margen corresponde al 34,7% del precio de venta, el proyecto debería ser económicamente viable. Esto se debe confirmar con los flujos de caja.

Tabla 19. Estructura de costos consolidada

Ítem	Por kg
Precio Venta	\$6,500
Costo Fijo	\$2,204
Costo Variable	\$2,043
Costo total	\$4,247
Margen	\$2,253

5.5. Cronograma de inversión

La inversión inicial del proyecto es de \$71,896,156. Existen iniciativas gubernamentales que financian hasta el \$40.000.000 del proyecto (CORFO, 2023), el 40% se pretende financiar con inversionistas y el otro 30% con un préstamo. El préstamo se hizo a 3 años (Banco de Chile, 2023), con una tasa de interés al 17% anual (Banco Estado, 2023). La cuota mensual del crédito corresponde a \$6.741.642.

5.6. Flujos de caja

El horizonte del proyecto se hizo a 5 años, coincidiendo con. Los primeros dos años se consideró solo una producción del 50% de la capacidad total de la planta. El año 3 se aumentó la producción al 80% de la capacidad total. Para los años 4 y 5 se espera una producción total 126.252 kg. Anual de grafeno. La tasa de descuento utilizada fue del 15%. La Tabla 20 muestra los criterios de inversión del proyecto propuesto.

Tabla 20. Parámetros de validación de proyecto

Parámetro	Valor
VAN	\$80,580,900
TIR	39%

El Anexo 2 muestra el flujo de caja detallados realizados para el proyecto.

6. Discusión

6.1. Proceso de síntesis.

Durante este trabajo, se propuso un proceso para la generación de grafeno a escala piloto a partir de datos de laboratorio y no se encontraron experiencias similares probadas a esta escala actualmente. Si bien existen fuentes que describen procesos de pirólisis para materiales carbonosos (Xiao Kong, 2020), estos son a partir de otros insumos (como biomasa), usados en la industria como combustible, no así los NFU, que mayoritariamente son almacenados sin ningún uso o con tratamientos que no llevan a materiales con interés comercial. Se escaló una planta para la generación de hasta 300 kg/ciclo, produciendo anualmente hasta 126.252 kg de grafeno. Se podrían modificar tecnologías tradicionales para la síntesis como las mencionadas en la Tabla 7, sin embargo estos tienen desventajas respecto al proceso propuesto en este trabajo: alto costo de reactivos, baja producción, etc. lo que lo hace inviable para un escalamiento (Vestince B. Mbayachi, 2021). Por lo tanto, es fundamental probar el método propuesto a pequeña escala para conocer las calidades de los materiales obtenidos y si tienen cabida en el mercado.

6.2. Crecimiento del mercado potencial

El atractivo de este proyecto está en el mercado potencial proyectado para finales de la actual década. En el año 2022 el mercado de productos relacionados al grafeno (óxido de grafeno, 175,9 millones de dólares, y se prevé que para el año 2030 llegue hasta los 2.172,2 millones de dólares, suponiendo una tasa de crecimiento de hasta 30,5%. Este crecimiento se debe al potencial uso en electrónica, como supercapacitores y como conductores eléctricos, usos en la industria aeroespacial, industria automotriz, entre otras. (Fortune Business Insights, 2022). Debido a este crecimiento, es importante llevar a cabo iniciativas como las que se presentan en este trabajo para generar grafeno a escala industrial y con materiales de desecho, para tener una ventaja competitiva en cuanto a los costos. Sin embargo, hay aspectos negativos en la industria del grafeno que restringen el aumento en su producción. La contaminación de suelos agrícola, microbacteriana y de aguas debido al grafeno ha sido estudiado por el impacto medioambiental (Baysal A, 2020), esto ha generado que instituciones medioambientales como la Agencia de Protección Ambiental (EPA, en inglés) de Estados Unidos, puedan crear cuerpos legales limitantes para su producción (Fortune Business Insights, 2022). Por esto, este trabajo ofrece una alternativa más sustentable que los métodos tradicionales para la generación de grafeno debido al uso de materiales de desecho.

6.3. Análisis evaluación económico

Los datos mostrados en la Tabla 20, el VAN da un valor de \$80.580.900 y la TIR un valor 39%. Con estos antecedentes, el proyecto con el precio actualmente supuesto de \$6.500 por kg., es economicamente viable. Haciendo un análisis de sensibilidad respecto a la disminución del precio de venta, se obtienen los datos mostrados a continuación:

Tabla 21. Análisis sensibilidad precio de venta

Análisis	Producción, kg/año	Precio de venta, \$/kg.	Costos fijos, \$/kg.	Costos variables, \$/kg	VAN, \$	TIR, %
Caso propuesto	126.252	6.500	2.204	2.043	80.580.900	39
Reducción -5%	126.252	6.175	2.204	2.043	6.483.523	17
Reducción -10%	126.252	5.850	2.204	2.043	-67,613,854	5.3*10 ⁹
VAN = 0	126.252	6.147	2.204	2.043	0	15

Como se puede ver de los antecedentes obtenidos del análisis de sensibilidad del precio, el mínimo valor para que el proyecto sea economicamente viable es \$6.147 por kg. Como se puede observar, si se reduce más del 10% del valor actualmente considerado, se obtienen valores absurdos para la TIR. Sin embargo, con el precio actualmente propuesto para el producto, aún es comercialmente competitivo debido al valor mundial del grafeno. Es importante notar que la ventaja con respecto a otros procesos, es el costo de las materias primas, debido al uso de materiales de desecho para la síntesis. Aunque es importante realizar pruebas para comprobar la pureza del producto obtenido en el proceso propuesto, debido a la alta calidad requerida por los usos técnicos.

Un potencial aspecto no considerado durante la realización del proyecto, es la venta del aceite de pirolisis que podría tener un impacto en la viabilidad, reduciendo el precio de venta del producto. Este aceite tiene propiedades térmicas similares a hidrocarburos convencionales y podría suponer un ingreso extra para la planta, o bien, se podría adaptar la maquinaria para utilizar este combustible.

7. Conclusiones

Las conclusiones, referidas a los objetivos de este trabajo, son las siguientes:

- Se evaluaron las diferentes tecnologías disponibles para la producción de materiales carbonosos, enfocados en aquellas para producir grafeno. Respecto a las tecnologías convencionales para obtener grafeno, se descartaron debido a los costos y las bajas posibilidades de obtener un escalamiento a nivel piloto. Se investigó el proceso propuesto a escala laboratorio de Chao Wang, 2019 considerando como materia prima NFU. Este proceso mostró obtener buenos resultados en cuanto su pureza y sus capacidades eléctricas. Sin embargo, no menciona rendimientos ni tampoco detalles de los balances másicos. Bicáková et al., 2016 propuso un proceso de co-pirólisis de NFU con carbono, pero este proceso tampoco menciona rendimientos con respecto al proceso. Por ello, para realizar el balance, se tomó como base lo propuesto por Martínez, 2013.
- En base a lo anterior, se propuso una planta piloto para la producción de 167 kg/ciclo de grafeno, con 3 ciclos de producción diario por 252 días al año de producción. El proceso consideró molienda, separación por tamizaje, estanque de mezcla, horno de pirólisis, estanque de neutralización/lavado y dos filtros. Se consideró que la mejor opción para instalarlo era la región del Biobío, pues se fomenta la industria local y además existe amplia oferta de servicios, mano de obra y potenciales compradores del material. Además, al ser la segunda ciudad de mayor tamaño del país, cuenta con gran cantidad de materia prima para el proceso.
- Respecto al análisis económico del proyecto, se obtuvo una VAN y una TIR de \$ 80.580.900 y 39%, respectivamente. Esto nos muestra que, según la propuesta, el proyecto es económicamente viable para su realización para un precio de venta de \$6.500/kg. Adicionalmente, se obtuvo que el precio mínimo de venta para que aún siga siendo económicamente viable es de \$6.147/kg. Es importante analizar la posibilidad del uso del aceite de pirólisis en el proceso para poder disminuir los costos variables (uso de energía) y así aumentar el margen para disminuir el precio del producto final.

8. Referencias

- ANIR. (2021). *Estudio del Material Disponible País y el reciclado de los productos prioritarios en Chile*.
- Banco de Chile. (15 de Mayo de 2023). *Para Capital de Trabajo y Proyectos de Inversión*. Obtenido de <https://portales.bancochile.cl/empresas/financiamiento/creditos-comerciales/detalles/credito-en-cuotas>
- Banco Estado. (12 de Mayo de 2023). *Creditos Microempresas*. Obtenido de https://www.bancoestado.cl/imagenes/pdf/tarifas_credito_microempresas.pdf.
- Baysal A, S. H. (2020). Risks of graphene nanomaterial contamination in the soil: evaluation of major ions. *Environ Monit Assess*.
- Chao Wang, D. L. (2019). *Direct conversion of waste tires into three-dimensional graphene*.
- CORFO. (21 de JUNIO de 2023). *CORFO*. Obtenido de https://www.corfo.cl/sites/cpp/convocatorias/red_asociativa_economia_circular_diagnostico;jsessionid=PGL_NtphBBPYk6DHkmpyq3mIu15YD5x1Y3pWRqCoYrLum2GUOzmq!2109189921!-174070961
- ETRMA. (11 de mayo de 2021). *etrma.org*. Obtenido de The European Tyre & Rubber Manufacturers Association: https://www.etrma.org/wp-content/uploads/2021/05/20210520_ETRMA_PRESS-RELEASE_EL-2019.pdf
- Fortune Business Insights. (Octubre de 2022). <https://www.fortunebusinessinsights.com/graphene-market-102930>.
- Ley N° 20.920. (01 de junio de 2016). Santiago, Chile: Diario Oficial de la República de Chile.
- Martínez, J. D. (2013). Waste tyre pyrolysis – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Mushunje, K. O. (2018). A review of Waste Tyre Rubber as an Alternative Concrete Constituent Material. *MATEC Web of Conferences*, 199, 11003, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819911003>.
- Muzenda., N. N. (2014). A Review and Discussion of Waste Tyre Pyrolysis and Derived Products.

- Ningbo Gao, F. W. (2022). Tire pyrolysis char: Processes, properties, upgrading and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*.
- Olivares Carmona, D. (2016). *Planta de reciclaje de neumáticos de caucho. Maestría, Post Grado Economía y Negocios*. Santiago: Universidad de Chile.
- Pieter Jan Kole, A. J. (2017). Wear and Tear of Tyres: A Stealthy Source of Microplastics in the Environment. *International Journal Environmental Research and Public Health*.
- Rainey, A. R. (2016). Scrap Tyre Management Pathways and Their Use as a Fuel — A Review. *Energies*.
- Rudrapati, R. (2020). Graphene: Fabrication Methods, Properties, and Applications in Modern Industries. . *IntechOpen*.
- Sharma, V. &. (2000). Disposal of waste tyres for energy recovery and safe environment. *Applied Energy.*, 381-394.
- The Graphene Council. (2020). *The 2020 Graphene Survey*.
- Tirel, K. (2017). *Ingeniería de perfil de modernas plantas para reciclaje de neumáticos*. Santiago: Universidad de Chile.
- Valentini, F. &. (2022). End-of-life options of tyres. A review. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2022.08.006>.
- Vestince B. Mbayachi, E. N. (2021). Graphene synthesis, characterization and its applications: A review. *Results in Chemistry*.
- Xiao Kong, Y. Z. (2020). Synthesis of graphene-like carbon from biomass pyrolysis . *Chemical Engineering Journal*.
- Xin Jiat Lee, B. Y.-G. (2019). Review on graphene and its derivatives: Synthesis methods and potential industrial implementation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 163-180.
- Zheng Xiao a, A. P. (2022). Material recovery and recycling of waste tyres - A review. *Cleaner Materials*.

Anexo 1: Cotizaciones

Home / Industrial Machinery / Plastic & Rubber Processing Machinery / Rubber Recycling Machinery / Rubber Pyrolysis Machines



View larger image



Add to Compare Share

Beston Group No Installation Required Batch Pyrolysis 1-3T/D Plastic Tire Oil Sludge Small Pyrolysis Machine

2 buyers

>= 1 sets

\$40,000.00

\$500.00 DE DESCUENTO Ordena más de \$10,000.00 | [Get Coupon](#)

Benefits: Quick refunds on orders under US \$1,000 [Claim now >](#)

Model Number **BLJ-3**

Lead time: ①

Quantity (sets)	1 - 1	> 1
Lead time (days)	35	To be negotiated

Customization: Customized logo (Min. order 1 set)
Customized packaging (Min. order 1 set)
More >



Ver imagen más grande



Añadir para c... Compartir

Máquina automática de reciclaje de neumáticos de desecho, máquina de reciclaje de polvo de caucho granulado

FOB Referencia Precio: [Consiga El Último Precio](#)

>= 1 Sets

18.520,00 US\$

Beneficios: Reembolsos rápidos en pedidos de menos de 1000 US\$ [Reclamar ahora >](#)

Calidad: Sets

Muestras: **620,00 US\$/Set** Pedido mínimo : 1 Set [Comprar muestras](#)

Plazo de entrega: ①

Quantity (Sets)	1 - 1	> 1
Hora del Est.(días)	20	Para negociar

Personalizacion: Logotipo personalizado (Pedido mínimo 1 Set)
Embalaje personalizado (Pedido mínimo 1 Set)
More >



Ver imagen más grande



Compartir

Ready to Ship In Stock Fast Dispatch

Crusher ciclon de recogida de polvo

1 - 4 Unidades **1.800,00 US\$** 5 - 9 Unidades **1.750,00 US\$** >= 10 Unidades **1.700,00 US\$**

Beneficios: Reembolsos rápidos en pedidos de menos de 1000 US\$ [Reclamar ahora >](#)

Tipo

Eficiencia

Número de Modelo crusher ciclon dust collection \$1800.00

Plazo de entrega:

Quantity (Unidades)	1 - 1	2 - 5	> 5
Hora del Est.(días)	8	10	Para negociar

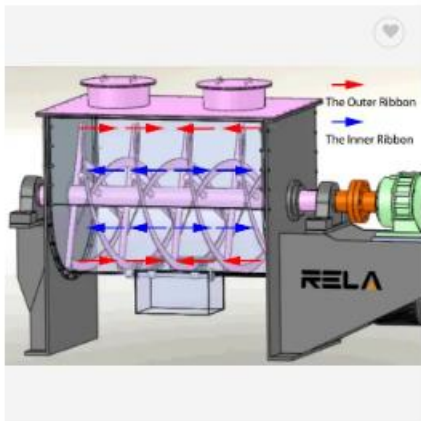
Detalles de la compra

Protección con Trade Assurance

Envío: Disfruta **Garantía de entrega a tiempo**. Recibe el 27 jun. mediante [Air Charter Express US \(Premium\)](#)
Con tecnología de [Alibaba.com](#) Logistics

Pagos: Disfruta de pagos cifrados y seguros [Ver detalles](#)

Devoluciones y reembolsos: Elegible para devoluciones y reembolsos [Ver detalles](#)



Ver imagen más grande



Añadir para c... Compartir

Mezclador de cinta horizontal, máquina mezcladora de polvo seco de acero inoxidable, CE, 50kg, 100kg, 200kg, 300kg, 500kg, 1000kg, 2000kg, 3000kg

CE [Ver más](#)

>= 1 Sets **4.800,00 US\$**

Beneficios: Regalo de cupón de 3 días: hasta US \$80 de descuento [Reclamar ahora >](#)

Número de Modelo

Muestras: WLDH-0.3 **4.800,00 US\$/Set** Pedido mínimo : 1 Set [Comprar muestras](#)

Plazo de entrega:

Quantity (Sets)	1 - 10	> 10
Hora del Est.(días)	30	Para negociar

Personalización: [Logotipo personalizado](#) (Pedido mínimo 1 Set)
[Embalaje personalizado](#) (Pedido mínimo 1 Set)
More ~



Ver imagen más grande



Añadir para c... Compartir

Máquina de reciclaje de neumáticos de desecho Raymond Roller Mill, para hacer polvo de goma, precio

1 - 4 Sets **20.500,00 US\$** >= 5 Sets **10.250,00 US\$**

Beneficios: US \$10 de descuento con un nuevo proveedor [Reclamar ahora >](#)

Energía (W)

Número de Modelo

Plazo de entrega: ⓘ

Quantity (Sets)	1 - 1	> 1
Hora del Est.(días)	60	Para negociar

Personalizacion: Logotipo personalizado (Pedido mínimo 1 Set)
Embalaje personalizado (Pedido mínimo 1 Set)
More >



Ver imagen más grande



Añadir para c... Compartir

Tanque ibc de acero inoxidable para transporte y almacenamiento de líquidos químicos, 1000l

1 - 4 Sets	5 - 9 Sets	10 - 14 Sets	>= 15 Sets
2.600,00 US\$	2.000,00 US\$	1.500,00 US\$	1.000,00 US\$

Beneficios: Regalo de cupón de 3 días: hasta US \$80 de descuento [Reclamar ahora >](#)

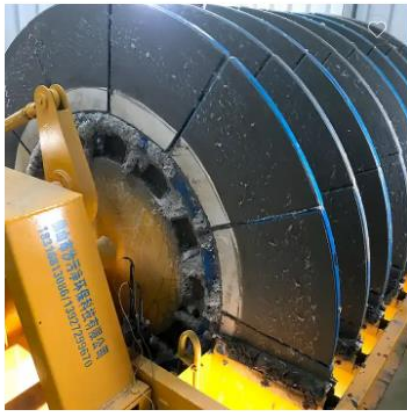
Número de Modelo:

Muestras: IBC Tank
200.000,00 US\$/Set Pedido mínimo : 1 Set [Comprar muestras](#)

Plazo de entrega:

Quantity (Sets)	1 - 10	> 10
Hora del Est.(días)	120	Para negociar

Personalización: Logotipo personalizado (Pedido mínimo 1 Set)
Embalaje personalizado (Pedido mínimo 1 Set)
More >



Ver imagen más grande



Añadir para c... Compartir

Filtro rotativo al vacío, de cerámica industrial, piedra

FOB Referencia Precio: [Consiga El Último Precio](#)

1 - 2 Sets	>= 3 Sets
20.000,00 US\$	12.000,00 US\$

Beneficios: Reembolsos rápidos en pedidos de menos de 1000 US\$ [Reclamar ahora >](#)

Calidad: Sets

Plazo de entrega:

Quantity (Sets)	1 - 1	2 - 5	> 5
Hora del Est.(días)	7	15	Para negociar

Detalles de la compra

Protección con Trade Assurance

Envío: [Comunícate con el proveedor](#) para negociar los detalles del envío
Disfruta [Garantía de envío a tiempo](#)

Pagos: ...
Disfruta de pagos cifrados y seguros [Ver detalles](#)

Devoluciones y reembolsos: Elegible para devoluciones y reembolsos [Ver detalles](#)



View larger image



Add to Compare Share

Home Use Pure Drinking Water Making Industrial Treatment RO System Filter Purification Plant Machine 500l/h Reverse Osmosis

★★★★★ 5.0 4 Reviews 4 buyers

No.18 Most popular in [New Water Treatment Machinery](#)

FOB Reference Price: [Get latest price](#)

\$1,200.00 - \$2,200.00 / set | 1 set/sets (Min. order)

Benefits: US \$500 coupons [Claim now >](#)

Model Number

Processing Capacity

Lead time: ⓘ	Quantity (sets)	1 - 1	> 1
	Lead time (days)	15	To be negotiated

Customization: [Alibaba.com build-in online customization](#) [Customise Now](#)
Customized logo (Min. order 1 set)
Customized packaging (Min. order 1 set)
More >

Casa / Maquinaria de construcción y construcción / Equipos de energía y minerales / Maquinaria de minería / Molino de mina



Ver imagen más grande



Añadir para c... Compartir

Molino de bolas de laboratorio pequeño, 200 a 800kg por hora

>= 1 Sets
5.200,00 US\$

Beneficios: Regalo de cupón de 3 días: hasta US \$80 de descuento [Reclamar ahora >](#)

Energía (W)

Número de Modelo

Muestras: 2.2kw, CY200
5.200,00 US\$/Set Pedido mínimo : 1 Set [Comprar muestras](#)

Personalización: Logotipo personalizado (Pedido mínimo 1 Set)
Embalaje personalizado (Pedido mínimo 1 Set)
More >

Detalles de la compra Protección con Trade Assurance

Envío: [Comunícate con el proveedor](#) para negociar los detalles del envío
Disfruta **Garantía de envío a tiempo** ⓘ

Pagos: ...
Disfruta de pagos cifrados y seguros [Ver detalles](#)

Devoluciones y reembolsos: Elegible para devoluciones y reembolsos [Ver detalles](#)

[Casa](#) /
 [Maquinaria de construcción y construcción](#) /
 [Equipos de energía y minerales](#) /
 [Maquinaria de minería](#) /
 [Tamiz vibratorio](#)



Máquina de criba de piedra caliza, arena de calcita, tamiz vibratorio lineal, equipo de tamizado de arena de cuarzo industrial

€ [Ver más](#)



1 - 4 Sets **1.880,00 US\$** |
 >= 5 Sets **1.580,00 US\$**

Beneficios: Regalo de cupón de 3 días: hasta US \$80 de descuento [Reclamar ahora >](#)

Número de Modelo:

Energía (W): 2*(0.4-0.75)KW US\$1880.00

Muestras: SZF-520, 2*(0.4-0.75)KW **2.500,00 US\$/Set** |
 Pedido mínimo : 1 Set |
 [Comprar muestras](#)

Plazo de entrega:

Quantity (Sets)	1 - 1	> 1
Hora del Est.(días)	12	Para negociar

Personalización:
 [Logotipo personalizado](#) (Pedido mínimo 1 Set) |
 [Embalaje personalizado](#) (Pedido mínimo 1 Set) |
 [More >](#)

[Ver imagen más grande](#)



Añadir para c... |
 Compartir

Detalles de la compra

Protección con Trade Assurance

Envío: [Comuníquese con el proveedor para conocer los detalles del envío.](#)

Anexo 2: Flujos de caja

1) Escenario base.

Precio de venta, \$	\$0	\$6,500	\$6,500	\$6,500	\$6,500	\$6,500 v		
Producción anual, kg	0	63126	63126	101001.6	126252	126252		
Año	0	1	2	3	4	5		
Ingresos por ventas (+)	\$0	\$410,319,000	\$410,319,000	\$656,510,400	\$820,638,000	\$820,638,000		
Costos fijos (-)	\$0	\$139,157,544	\$139,157,544	\$222,652,070	\$278,315,088	\$278,315,088		
Costos Variables (-)	\$0	\$128,944,588	\$128,944,588	\$206,311,340	\$257,889,175	\$257,889,175		
MARGEN (=)		\$142,216,868	\$142,216,868	\$227,546,989	\$284,433,737	\$284,433,737		
Gastos Administrativos (-)	\$0	\$139,157,544	\$139,157,544	\$139,157,544	\$139,157,544	\$139,157,544		
RO BRUTO (=)		\$3,059,324	\$3,059,324	\$88,389,445	\$145,276,193	\$145,276,193		
Amortizaciones (-)	\$0	\$6,741,642	\$6,741,642	\$6,741,642	\$6,741,642	\$6,741,642		
Depreciación (-)	\$0	\$6,171,259	\$6,171,259	\$6,171,259	\$6,171,259	\$6,171,259		
RO NETO (=)		\$0	-\$9,853,577	-\$9,853,577	\$75,476,544	\$132,363,291		
Ingreso por venta de activos (+)	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0		
UTILIDAD BRUTA (=)		\$0	-\$9,853,577	-\$9,853,577	\$75,476,544	\$132,363,291		
Impuestos (-)	\$0	-\$2,463,394	-\$2,463,394	\$18,869,136	\$33,090,823	\$33,090,823		
UTILIDAD NETA (=)		\$0	-\$7,390,183	-\$7,390,183	\$56,607,408	\$99,272,469		
Depreciación (+)	0	\$6,171,259	\$6,171,259	\$6,171,259	\$6,171,259	\$6,171,259		
Inversión Total (-)	\$71,427,440	0	0	0	0	0		
FLUJO DE CAJANETO (=)	-\$71,427,440	-\$1,218,924	-\$1,218,924	\$62,778,667	\$105,443,727	\$105,443,727		
							VAN, \$	\$80,580,900
							TIR, %	39%

2) Escenario precio -5%.

Precio de venta, \$	\$0	\$6,175	\$6,175	\$6,175	\$6,175	\$6,175 v		
Producción anual, kg	0	63126	63126	101001.6	126252	126252		
Año	0	1	2	3	4	5		
Ingresos por ventas (+)	\$0	\$389,803,050	\$389,803,050	\$623,684,880	\$779,606,100	\$779,606,100		
Costos fijos (-)	\$0	\$139,157,544	\$139,157,544	\$222,652,070	\$278,315,088	\$278,315,088		
Costos Variables (-)	\$0	\$128,944,588	\$128,944,588	\$206,311,340	\$257,889,175	\$257,889,175		
MARGEN (=)		\$121,700,918	\$121,700,918	\$194,721,469	\$243,401,837	\$243,401,837		
Gastos Administrativos (-)	\$0	\$139,157,544	\$139,157,544	\$139,157,544	\$139,157,544	\$139,157,544		
RO BRUTO (=)		\$0	-\$17,456,626	-\$17,456,626	\$55,563,925	\$104,244,293		
Amortizaciones (-)	\$0	\$6,741,642	\$6,741,642	\$6,741,642	\$6,741,642	\$6,741,642		
Depreciación (-)	\$0	\$6,171,259	\$6,171,259	\$6,171,259	\$6,171,259	\$6,171,259		
RO NETO (=)		\$0	-\$30,369,527	-\$30,369,527	\$42,651,024	\$91,331,391		
Ingreso por venta de activos (+)	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0		
UTILIDAD BRUTA (=)		\$0	-\$30,369,527	-\$30,369,527	\$42,651,024	\$91,331,391		
Impuestos (-)	\$0	-\$7,592,382	-\$7,592,382	\$10,662,756	\$22,832,848	\$22,832,848		
UTILIDAD NETA (=)		\$0	-\$22,777,145	-\$22,777,145	\$31,988,268	\$68,498,544		
Depreciación (+)	0	\$6,171,259	\$6,171,259	\$6,171,259	\$6,171,259	\$6,171,259		
Inversión Total (-)	\$71,427,440	0	0	0	0	0		
FLUJO DE CAJANETO (=)	-\$71,427,440	-\$16,605,886	-\$16,605,886	\$38,159,527	\$74,669,802	\$74,669,802		
							VAN, \$	\$6,483,522
							TIR, %	17%

3) Escenario precio -10%

Precio de venta, \$	\$0	\$5,850	\$5,850	\$5,850	\$5,850	\$5,850 v		
Producción anual, kg	0	63126	63126	101001.6	126252	126252		
Año	0	1	2	3	4	5		
Ingresos por ventas (+)	\$0	\$369,287,100	\$369,287,100	\$590,859,360	\$738,574,200	\$738,574,200	VAN, \$	-567,613,854
Costos fijos (-)	\$0	\$139,157,544	\$139,157,544	\$222,652,070	\$278,315,088	\$278,315,088	TIR, %	17%
Costos Variables (-)	\$0	\$128,944,588	\$128,944,588	\$206,311,340	\$257,889,175	\$257,889,175		
MARGEN (=)		\$101,184,968	\$101,184,968	\$161,895,949	\$202,369,937	\$202,369,937		
Gastos Administrativos (-)	\$0	\$139,157,544	\$139,157,544	\$139,157,544	\$139,157,544	\$139,157,544		
RO BRUTO (=)	\$0	-\$37,972,576	-\$37,972,576	\$22,738,405	\$63,212,393	\$63,212,393		
Amortizaciones (-)	\$0	\$6,741,642	\$6,741,642	\$6,741,642	\$6,741,642	\$6,741,642		
Depreciación (-)	\$0	\$6,171,259	\$6,171,259	\$6,171,259	\$6,171,259	\$6,171,259		
RO NETO (=)	\$0	-\$50,885,477	-\$50,885,477	\$9,825,504	\$50,299,491	\$50,299,491		
Ingreso por venta de activos (+)	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0		
UTILIDAD BRUTA (=)	\$0	-\$50,885,477	-\$50,885,477	\$9,825,504	\$50,299,491	\$50,299,491		
Impuestos (-)	\$0	-\$12,721,369	-\$12,721,369	\$2,456,376	\$12,574,873	\$12,574,873		
UTILIDAD NETA (=)	\$0	-\$38,164,108	-\$38,164,108	\$7,369,128	\$37,724,619	\$37,724,619		
	0							
Depreciación (+)	0	\$6,171,259	\$6,171,259	\$6,171,259	\$6,171,259	\$6,171,259		
Inversión Total (-)	\$71,427,440	0	0	0	0	0		
FLUJO DE CAJA NETO (=)	-\$71,427,440	-\$31,992,849	-\$31,992,849	\$13,540,387	\$43,895,877	\$43,895,877		

4) Escenario precio VAN=0

Precio de venta, \$	\$0	\$6,147	\$6,147	\$6,147	\$6,147	\$6,147 v		
Producción anual, kg	0	63126	63126	101001.6	126252	126252		
Año	0	1	2	3	4	5		
Ingresos por ventas (+)	\$0	\$388,007,904	\$388,007,904	\$620,812,646	\$776,015,808	\$776,015,808	VAN, \$	\$0
Costos fijos (-)	\$0	\$139,157,544	\$139,157,544	\$222,652,070	\$278,315,088	\$278,315,088	TIR, %	15%
Costos Variables (-)	\$0	\$128,944,588	\$128,944,588	\$206,311,340	\$257,889,175	\$257,889,175		
MARGEN (=)		\$119,905,772	\$119,905,772	\$191,849,235	\$239,811,544	\$239,811,544		
Gastos Administrativos (-)	\$0	\$139,157,544	\$139,157,544	\$139,157,544	\$139,157,544	\$139,157,544		
RO BRUTO (=)	\$0	-\$19,251,772	-\$19,251,772	\$32,691,691	\$100,654,000	\$100,654,000		
Amortizaciones (-)	\$0	\$6,741,642	\$6,741,642	\$6,741,642	\$6,741,642	\$6,741,642		
Depreciación (-)	\$0	\$6,171,259	\$6,171,259	\$6,171,259	\$6,171,259	\$6,171,259		
RO NETO (=)	\$0	-\$32,164,673	-\$32,164,673	\$39,778,790	\$87,741,099	\$87,741,099		
Ingreso por venta de activos (+)	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0		
UTILIDAD BRUTA (=)	\$0	-\$32,164,673	-\$32,164,673	\$39,778,790	\$87,741,099	\$87,741,099		
Impuestos (-)	\$0	-\$8,041,168	-\$8,041,168	\$9,944,698	\$21,935,275	\$21,935,275		
UTILIDAD NETA (=)	\$0	-\$24,123,505	-\$24,123,505	\$29,834,093	\$65,805,824	\$65,805,824		
	0							
Depreciación (+)	0	\$6,171,259	\$6,171,259	\$6,171,259	\$6,171,259	\$6,171,259		
Inversión Total (-)	\$71,427,440	0	0	0	0	0		
FLUJO DE CAJA NETO (=)	-\$71,427,440	-\$17,952,246	-\$17,952,246	\$36,005,352	\$71,977,083	\$71,977,083		